

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 6, № 2/3, 2000

KYIV

## ЗМІСТ

- Дудник А. В., Залюбовський І. І. Наукові задачі міжнародного космічного експеримента КОРОНАС-ФОТОН 3  
Коноваленко О. С., Івченко В. М., Лапчук В. П. Томографічна обробка даних бортових фотометрических спостережень 13  
Гримальський В. В., Івченко В. Н., Лизунов Г. В. Спутникові наблюдення іоносферних предвестників землетрясень 21  
Лялько В. І., Сиренко Л. А., Федоровський А. Д., Ходоровський А. Я., Шестопалов В. М. Оцінка впливу разломних структур на розподілення радіонуклідів в доніх отложинях з використанням косміческих снимків 31  
Федоровський А. Д., Якимчук В. Г., Новиков Р. І., Пахомов І. П., Суханов К. Ю., Теременко А. А. Дешифрування косміческих снимків: распознавание ландшафтных зон на основe структурного анализа 39

## CONTENTS

- Dudnik O. V. and Zalyubovsky I. I. Scientific tasks of international space experiment KORONAS-PHOTON 3  
Konovalenko O. S., Ivchenko V. M., and Lapchuk V. P. Tomographic processing of onboard photometric measurements 13  
Grimal'skij V. V., Ivchenko V. N., and Lizunov G. V. Satellite observations of ionospheric earthquake precursors 21  
Lyal'ko V. I., Sirenko L. A., Fedorovsky A. D., Khodorovsky A. Ya., and Shestopalov V. M. Estimating the influence of fracture-block structures on the distribution of radionuclides in bottom sediments with the use of space images 31  
Fedorovsky A. D., Yakimchuk V. G., Novikov R. I., Pakhomov I. P., Sukhanov K. Y., and Teremenko A. A. Interpretation of space snapshots of landscape zones on the basis of the structural analysis 39

- Зубко В. П. Міжнародні принципи щодо дистанційного зондування Землі*
- Логинов А. А., Самойленко Ю. І., Ткаченко В. А. Возбуждение меридионального течения дифференциальным вращением в жидком ядре Земли*
- Мороженко О. В., Шаврина А. В., Велесь О. А. Концепція моніторингу газового та аерозольного забруднення земної атмосфери (для висот більше 30 км) з борту Міжнародної космічної станції*
- Березовский В. А., Литовка И. Г., Чака Е. Г., Магомедов С., Мехед Н. В. Влияние дозированной гипоксии на метаболизм костной ткани в условиях осевой разгрузки задних конечностей*
- Дегтярьов В. В. Вимірювання дипольних магнітних моментів технічних об'єктів*
- Кирик В. В. Коммутация сильноточных электрических цепей в экстремальных условиях*
- Карачун В. В., Мельник В. Н., Лозовик В. Г. Многомерные задачи упругости подвеса поплавкового гироскопа*
- 45** *Zubko V. P. International principles relating to the remote sounding of the Earth*
- 53** *Loginov A. A., Samoilenco Yu. I., and Tkachenko V. A. Excitation of meridional flow by differential rotation in earth's liquid core*
- 69** *Morozhenko O. V., Shavrina A. V., and Veles' O. A. Conception of gas and aerosol pollution monitoring of the earth's atmosphere (for altitudes more than 30 km) on board the international space station*
- 77** *Berezovskiy V. A., Litovka I. G., Chaka H. G., Magomedov S., and Mehed N. V. Effect of the intermittent hypoxia on the bone tissue state after microgravitation modeling*
- 85** *Dehtiar'ov V. V. Measurement of magnetic dipole moments of engineering objects*
- 89** *Kyryk V. V. Commutation power of electrical circuits in extreme conditions*
- 92** *Karachun V. V., Mel'nik V. N., Lozovik V. G. Multy-dimensional problems of the elasticity of floating gyroscope holder*

#### НАШІ АВТОРИ

#### 98 OUR AUTHORS

УДК 523.165+523.14+523.76

# Научные задачи международного космического эксперимента КОРОНАС-ФОТОН

А. В. Дудник, И. И. Залюбовский

Харківський національний університет ім. В. М. Каразіна

*Надійшла до редакції 03.04.2000*

Приведено опис наукових цілей та задач міжнародного космічного експерименту КОРОНАС-ФОТОН, третього в серії супутників КОРОНАС. Представлено опис окремих приладів з комплексу бортової апаратури та наземних установок для супроводження наукового експерименту. Подаються попередні результати пробних включень установки для дослідження високочастотного радіовипромінювання магнітосфери Землі.

## ВВЕДЕНИЕ

Международный проект КОРОНАС-ФОТОН является третьим в серии проектов КОРОНАС, предназначенных для исследования процессов солнечного энерговыделения и глобальных солнечно-земных связей. Он является составной частью Национальной космической программы Украины и входит в Федеральную программу фундаментальных космических исследований России по разделу солнечно-земных связей. Кроме этого, проект ФОТОН — один из немногих, входящих в совместную программу Российской академии наук, Национальной академии наук Украины и космических агентств обеих стран по фундаментальным космическим исследованиям с использованием автоматических космических аппаратов.

Отличительными особенностями третьего из проектов КОРОНАС являются комплексные исследования высокоэнергетичного электромагнитного и корпускулярного излучений Солнца с высокой эффективностью на специализированном спутнике, изучение солнечно-земных связей путем наземного сопровождения спутникового эксперимента [3, 6].

В реализации проекта принимают участие немецкие и индийские ученые и специалисты на

основании программы научно-технического сотрудничества между Россией, Германией и Индией [8, 9].

Спутник, на котором устанавливается научная аппаратура, имеет круговую орбиту высотой 500 км с углом наклонения 82.5°. Точность ориентации на Солнце — лучше 10'. Общий вес бортовой научной аппаратуры составляет 650 кг.

## ЦЕЛИ И НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ ПРОЕКТА

Основными целями проекта являются:

1. Изучение жестких электромагнитных и корпускулярных излучений Солнца с помощью бортовой научной аппаратуры и идентификация всплесков этих излучений с солнечными вспышками и радиовсплесками по наземным наблюдениям в оптическом и радиодиапазонах;

2. Исследование воздействия солнечной активности в различных диапазонах длин волн на геоэффективные параметры, характеризующие состояние электромагнитной и радиационной обстановок в окрестностях Земли.

Задачи, решаемые комплексом бортовой научной аппаратуры, следующие:

— изучение временной динамики энергетических спектров жесткого электромагнитного излучения в широком энергетическом диапазоне от 12 кэВ до 2000 МэВ, создаваемого ускоренными во вспышках электронами, протонами и ядрами при их взаимодействии с атмосферой Солнца;

— проведение спектроскопических наблюдений линейчатого гамма-излучения ядерного происхождения и позитронной линии;

— измерения линейной поляризации жесткого рентгеновского излучения в диапазоне 20—150 кэВ во вспышках;

— изучение быстрой переменности рентгеновского излучения во вспышках;

— измерения вспышечного и медленно изменяющегося вакуумного УФ-излучения;

— затменные (атмосферой Земли) измерения УФ-излучения короны Солнца в семи спектральных окнах;

— измерения потоков нейтронов солнечного происхождения с энергией выше 5 МэВ;

— изучение энергетических спектров и зарядового состава ядер, ускоренных во время солнечных вспышек;

— регистрация и изучение динамики потоков электронов, протонов и альфа-частиц солнечного и магнитного происхождения, а также их взаимосвя-

зи с квазипостоянными и низкочастотными полями на орбите спутника.

Наземный комплекс аппаратуры предназначен для решения следующих задач [2]:

- идентификация рентгеновских и гамма всплесков с источниками оптического излучения путем использования цифровых изображений Солнца в ИК-линии Солнца  $\lambda = 1083$  нм и линии  $H_{\alpha}$  водорода;
- изучение взаимосвязи между всплесками жесткого электромагнитного излучения Солнца и случаями повышения яркости на видимом диске Солнца в оптическом диапазоне;
- наблюдение солнечного радиоизлучения на частотах 2.5 и 2.85 ГГц, и в континууме метрового диапазона длин волн;
- исследование условий и пространственных областей генерации серий всплесков высокочастотного радиоизлучения околоземного космического пространства во время различных проявлений солнечной активности и магнитосферных бурь;
- регистрация потоков ускоренных протонов и ядер косвенными наземными методами;
- выявление корреляционной взаимосвязи спорадического радиоизлучения магнитосферы Земли с динамикой радиационных поясов Земли и солнечной активностью.

Таблица 1. Бортовая научная аппаратура проекта КОРОНАС-ФОТОН

Аппаратура	Название	Разработчики
Спектрометр высокоэнергетичных излучений «Наталья-2М»	Временные профили и амплитудные спектры гамма-излучения в диапазоне 0.3—2000 МэВ. Регистрация нейтронов с энергиями 10—300 МэВ	Московский государственный инженерно-физический институт (МИФИ), Физический институт РАН (ФИАН)
Спутниковый телескоп энергичных частиц СТЭП-Ф	Питч-угловые зависимости и энергетические спектры электронов — 0.4—14 МэВ, протонов — 9.8—61 МэВ, альфа-частиц — 37—245 МэВ	Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина
Телескоп низкоэнергетического гамма-излучения РТ-2	Временные профили и амплитудные спектры рентгеновского излучения в диапазоне 20—200 кэВ (фоссивичмода с коллиматором); 0.1—2.0 МэВ (всенаправленный детектор)	Tata Institute of Fundamental Research (Bombay, India)
Поляриметр жесткого рентгеновского излучения «Пингвин»	Линейная поляризация жесткого рентгена, $E_x = 20—150$ кэВ. Рентгеновская и гамма-спектрометрия, $E_x = 20—1000$ кэВ. Регистрация нейтронов с энергиями 5—50 МэВ	Физико-технический институт им. А. Ф. Йоффе РАН (ФТИ РАН) — головной, МИФИ
Быстрый рентгеновский монитор БРМ	Быстрый тайминг жесткого рентгена, $E_x = 20—500$ кэВ в шести энергетических каналах	МИФИ
Анализатор заряженных частиц «Электрон-5-Песка»	Регистрация электронов с энергиями 0.04—2.0 МэВ, протонов с энергиями 3—60 МэВ и ядер ( $Z \leq 8$ ) с энергиями 2—20 МэВ/нукл	НИИ ядерной физики Московского Государственного университета (НИИЯФ МГУ)
Диагностический комплекс РЕЙС	Измерение низкочастотных электрических полей в диапазоне 0.1 Гц—1.0 кГц и магнитных полей в диапазоне 5—100 Гц	Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН (ИЗМИРАН)
Спектрометр УФ-излучения ФОКА (EUV-Phoka)	Регистрация вакуумного УФ-излучения Солнца, мониторинг состояния верхних слоев атмосферы	МИФИ, AIP (Potsdam, Germany), FhG Ipm (Freiburg, Germany)

Таблица 2. Научная аппаратура для наземного сопровождения спутникового эксперимента КОРОНАС-ФОТОН

Установка	Название	Исполнители
Установка для исследования радиоизлучения магнитосферы Земли	Изучение всплесков радиоизлучения и в континууме на частотах $f = 150$ и $500$ МГц	Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина
Солнечный телескоп СОТОС	Наблюдение Солнца на длинах волн $\lambda = 300—1200$ нм, цифровые изображения Солнца в линии $\lambda = 1083$ нм, бальмеровском континууме	Астрономическая обсерватория Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина
ПЗС-фотометр	Оптика $\lambda = 300—1100$ нм, 2048 пикселей	Астрономическая обсерватория Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина
Солнечный радиотелескоп сантиметровых волн	Радиоизлучение Солнца на частотах $f_1 = 2.5$ ГГц и $f_2 = 2.85$ ГГц	Крымская астрофизическая обсерватория
Солнечный радиотелескоп метровых волн	Радиоизлучение Солнца на частоте 280 МГц	Крымская астрофизическая обсерватория
Комплексная установка для регистрации всплесков околоземного ВЧ-излучения и атмосферных нейтронов на уровне моря	Изучение радиовсплесков в диапазоне 38—460 МГц; регистрация быстрых атмосферных нейтронов	Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина

## СОСТАВ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ ПРОЕКТА КОРОНАС-ФОТОН

В состав проекта включены:

- 1) бортовой комплекс научной аппаратуры (см. табл. 1) [8, 9];
- 2) комплекс наземных экспериментальных установок (табл. 2).

## БОРТОВАЯ НАУЧНАЯ АППАРАТУРА

Прибор «Наталья-2М» — главный прибор в комплексе бортовой научной аппаратуры. Он состоит из двух спектрометров: верхнего и нижнего [9]. Верхний спектрометр окружен антисовпадательной защитой, состоящей из сцинтилляционных колпака и плоского счетчика толщиной по 2 см (рис. 1). Детекторы обоих спектрометров одинаковы: каждый содержит восемь сцинтилляционных блоков из кристаллов CsI(Tl) размером  $4.5 \times 8 \times 36$  см $^3$ . Каждый блок просматривается двумя фотоэлектронными умножителями с противоположных сторон. Все восемь каналов во время работы на орбите будут стабилизированы подачей светового сигнала от единого высокостабильного светодиода через волоконные световоды. Для абсолютной калибровки используются радиоактивные альфа- и бета-источники. Прибор регистрирует выходные сигналы от гамма-лучей в четырех энергетических диапазонах

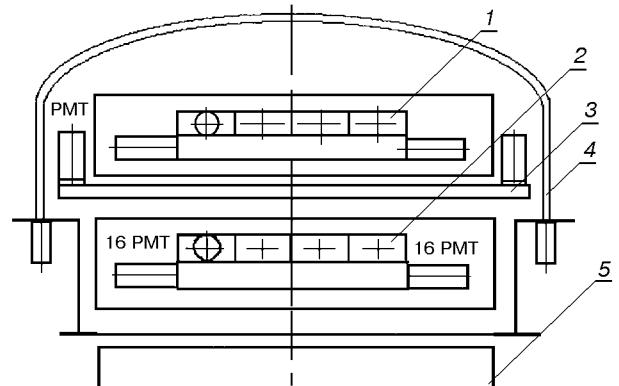


Рис. 1. Блок-схема прибора «Наталья-2М»: 1 — верхний спектрометр из 8 блоков (2 слоя по 4 шт.) сцинтилляторов CsI(Tl), 2 — нижний спектрометр из 8 блоков (2 слоя по 4 шт.) сцинтилляторов CsI(Tl), 3 — антисовпадательный счетчик из плоского круглого пластмассового сцинтиллятора, 4 — антисовпадательный «колпак» из пластмассового сцинтиллятора, 5 — блок электроники

и события «нейтронного» типа.

Неоднородность величины сигнала для различных положений источника составляет примерно 2 %. Измеренное на радиоактивных источниках и оцененное численным моделированием энергетическое разрешение для широкого параллельного пучка гамма-квантов составляет 14 % (при  $E = 0.660$  МэВ), 6.0 % ( $E = 10$  МэВ) и 12 % ( $E =$

= 100 МэВ). Разделение «гамма» и «нейтронных» событий осуществляется по форме сцинтилляционного сигнала [1]. Общий вес прибора составляет 450 кг, энергопотребление — 150 Вт.

Спутниковый телескоп электронов и протонов СТЭП-Ф предназначен для изучения динамики заряженных частиц высокогенеретичных электронов, протонов и альфа-частиц магнитосферного и солнечного происхождения, определения питч-угловых и пространственно-временных распределений захваченных и высывающихся частиц радиационных поясов Земли. Прибор состоит из блока детекторов, устанавливаемого на внешней обшивке космического аппарата, и блока обработки цифровой информации [5].

Блок детекторов (рис. 2) содержит в себе два идентичных кремниевых позиционно-чувствительных матричных детектора размером 45 мм × 45 мм и толщиной 350 мкм, и два сцинтилляционных детектора на базе кристаллов CsI(Tl), просматриваемых фотодиодами большой площади. Среднее поле зрения телескопа составляет 97° × 97°. Размер каждого из 36 квадратных элементов матрицы на полупроводниковом детекторе составляет 7.3 мм × 7.3 мм, что позволяет получить среднее угловое разрешение в общем поле зрения телескопа около 8°.

Активные площади полупроводниковых детекторов — 20 см<sup>2</sup>, сцинтилляционных кристаллических детекторов — 36 и 49 см<sup>2</sup>. Геометрический фактор прибора составляет 70—100 см<sup>2</sup>стэр. Прибор позво-

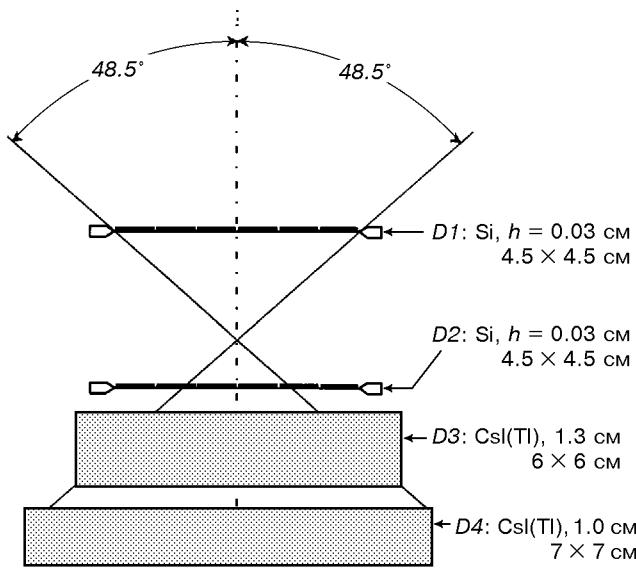


Рис. 2. Блок детекторов спутникового телескопа электронов и протонов СТЭП-Ф. D1, D2 — кремниевые позиционно-чувствительные полностью обедненные p-i-n-детекторы, D3, D4 — сцинтилляционные детекторы

ляет регистрировать потоки электронов в диапазоне энергий 0.15—10 МэВ, протонов в диапазоне энергий 4—62 МэВ и альфа-частиц в диапазоне энергий 14—250 МэВ.

Рентгеновский телескоп «РТ-2» включает в себя три детектора [7]. Они идентичны, за исключением углов зрения пассивных коллиматоров, равных 2, 3 и 5° (рис. 3). Для регистрации рентгеновских лучей используются NaJ(Tl)/CsI(Tl)-фосфор-детекторы. Толщины NaJ(Tl)- и CsI(Tl)-сцинтилляторов составляют 5 и 30 мм. Диаметр фосфора — 12.7 см. Сцинтилляторы окружены пассивной защитой и пластическими антисовпадательными счетчиками. Все детекторы работают параллельно в двух режимах: фосфор-мода (20—200 кэВ) и спектрометрическая мода (0.1—2.0 МэВ).

**Поляриметр жесткого рентгеновского излучения «Пингвин».** Принцип измерения поляризации основан на угловой анизотропии комптоновского рассеяния плоскополяризованного пучка фотонов. Детектор состоит из двух типов сцинтилляторов: шести органических монокристаллов p-терфенила, окруженных сборкой из шести кристаллов CsI(Tl). Фотоны, рассеянные в органическом монокристалле, поглощаются в CsI(Tl). Экспериментально измеряется число парных совпадений между рассеивателями и поглотителями с последующим выделением анизотропии.

Все счетчики стабилизированы высокостабильными светодиодами и радиоактивными гамма-источниками. Детектор окружен двумя полусферическими антисовпадательными сцинтилляционными счетчиками. Нейтроны регистрируются как по упругому рассеянию на водороде p-терфенила, так и по неупругому рассеянию на углероде, в основном благодаря реакции ( $n, n'3\alpha$ ). Разделение сигналов

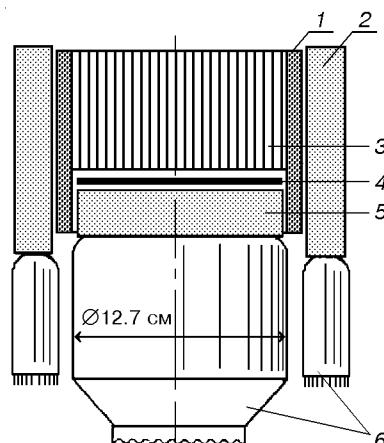


Рис. 3. Рентгеновский телескоп РТ-2: 1 — Ni/Sn/Pb защита, 2 — антисовпадательный сцинтиллятор, 3 — коллиматор, 4 — Na I (Tl), 5 — Cs I (Na), 6 — ФЭУ

от релятивистских и нерелятивистских вторичных заряженных частиц (гамма-события и нейтронные события) производится в обоих типах сцинтилляторов по форме импульса.

**Быстрый рентгеновский монитор «БРМ»** представляет собой сцинтилляционный счетчик на основе монокристалла  $\text{YAlO}_3(\text{Ce})$ . Размеры кристалла 60 мм в диаметре и 10 мм толщиной. Этот кристалл имеет преимущества по сравнению с обычно используемыми для подобных исследований неорганическими сцинтилляторами, а именно: быстрое время высыживания ( $\tau = 24 \text{ нс}$ ), что в 10 раз быстрее, чем для  $\text{NaJ}(\text{Tl})$ ; отсутствие медленного компонента светового выхода; химическая стойкость поверхности кристалла и отсутствие нечувствительного слоя; высокая прочность и твердость.

Кристалл просматривается фотоумножителем, стабилизированным светодиодом. Монитор регистрирует рентгеновское излучение в шести энергетических каналах, перекрывающих диапазон 20—600 кэВ (20—30; 30—40; 40—50; 50—70; 70—130; 130—600 кэВ). Записывается временной интервал, в течение которого в канале набирается заданное число импульсов. Время накопления зависит от интенсивности излучения, и для мощных вспышек оно автоматически уменьшается до нескольких миллисекунд. Диапазон времен накопления может быть изменен по команде с Земли.

**Анализатор заряженных частиц «Электрон-5-Песка»** предназначен для изучения солнечных энергичных частиц и аномального компонента Галактических космических лучей. Он состоит из трех частей: телескопа, аналоговой электроники и цифровой электроники [4]. Телескоп изготовлен из четырех полупроводниковых кремниевых ионно-

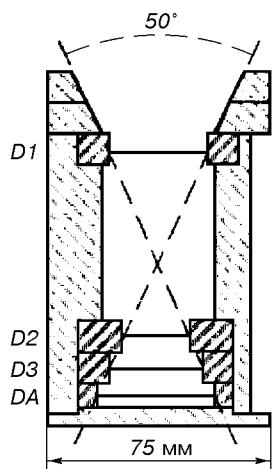


Рис. 4. Блок детекторов анализатора заряженных частиц «Электрон-5-Песка». D1, D2, D3, DA — кремниевые детекторы

имплантированных детекторов, расположенных в цилиндрической алюминиевой пассивной защите (рис. 4). Работа телескопа основана на «методике  $dE/dx - E$ ». Активные площади этих цилиндрических и полностью обедненных детекторов составляют соответственно: D1 —  $S = 9 \text{ см}^2$ ,  $h = 203 \text{ мкм}$ , D2 —  $S = 6 \text{ см}^2$ ,  $h = 315 \text{ мкм}$ , D3 —  $S = 9 \text{ см}^2$ ,  $h = 570 \text{ мкм}$ , D4 —  $S = 10 \text{ см}^2$ ,  $h = 285 \text{ мкм}$ . Угол зрения телескопа —  $50^\circ$ . Прибор регистрирует заряженные частицы в следующих энергетических диапазонах: электроны — 0.04—2 МэВ, протоны — 0.5—60 МэВ, альфа-частицы — 3—120 МэВ, ядра элементов с  $Z < 26$  — 1—50 МэВ/нуклон. Аналоговая электроника включает в себя узлы усиления (4 идентичных канала), пиковых детекторов, схем совпадений и антисовпадений, и преобразования аналоговых сигналов в цифровые. Цифровая электроника состоит из узла обработки цифровой информации и двух интерфейсов: один — для согласования с аналоговой электроникой, второй — для согласования с системой сбора научной информации спутника.

Комплекс «РЕЙС» включает в себя магнитометр «ФМ-2», сенсоры ДМП-1 и ДЕП-1. Магнитометр измеряет три составляющие магнитного поля в частотном диапазоне 0—4 Гц, прибор ДМП-1 изме-

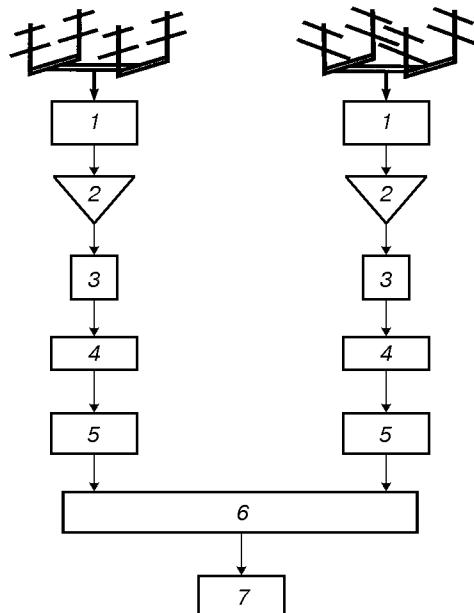


Рис. 5. Блок-схема установки для исследования радиоизлучения магнитосферы Земли: 1 — согласующе-симметрирующее устройство, 2 — антенный предварительный усилитель, 3 — кабель 30 м, 4 — супергетеродинный радиоприемник, 5 — милливольтметр, 6 — универсальный программируемый блок с АЦП, 7 — ПК IBM

ряет те же параметры в диапазоне 5—1000 Гц.

Две составляющие электрического поля в частотном диапазоне 0.1—1000 Гц измеряются сенсором ДЕП-1.

**Монитор мягкого рентгеновского и УФ-излучения «Фока»** измеряет полную интенсивность излучения от диска Солнца в семи спектральных окнах. Выделение окон осуществляется фильтрами УФ-диапазона, нанесенными на поверхность детектора, и фильтрами-отражателями видимого света, установленными в коллиматоре над детекторами. В качестве детекторов используются кремниевые фотодиоды, созданные фирмой IRD (США) специально для УФ-диапазона. Для уменьшения фоновой за- светки используется коллиматор с углом зрения 3°. Детекторы и электроника обеспечивают регистрацию излучения в динамическом диапазоне 10<sup>5</sup>. Ожидаемая чувствительность позволит регистрировать УФ-излучение короны спокойного Солнца.

#### УСТАНОВКИ ДЛЯ НАЗЕМНОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ СПУТНИКОВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

**Установка для исследования радиоизлучения магнитосферы Земли** позволяет проводить непрерывный круглосуточный мониторинг радиофона на двух фиксированных частотах из различных направлений небесной полусферы (рис. 5). В радиошумах магнитосферы Земли отображаются все проявления солнечной активности: вспышки в рентгеновском и УФ-диапазонах, выбросы энергичных протонов и электронов, воздействие на околосземное пространство межпланетных ударных волн, геомагнитных бурь. Установка включает в себя два радиотелескопа и радиоприемных устройства на частоты 150 и 500 МГц. Антenna система для приема сигналов на частоте 150 МГц представляет собой синфазную решетку из четырех 7-элементных антенн типа Удо-Яги. Сигналы на частоте 500 МГц принимаются антенной синфазной решеткой из 13-элементных антенн типа «волновой канал». Поскольку каждая из антенных систем способна принимать линейно поляризованные сигналы и конструктивно выполнена так, что имеется возможность механического вращения в вертикальной и горизонтальной плоскостях, с помощью установки возможно изучение направления прихода и степени поляризации принимаемых радиоспленесков.

Минимально регистрируемые спектральные плотности потоков радиоизлучения составляют 10<sup>-22</sup> Вт/(м<sup>2</sup>·Гц) на частоте 150 МГц и 10<sup>-21</sup> Вт/(м<sup>2</sup>·Гц) на частоте 500 МГц. Полоса пропускания радиотрактов равна 2 МГц.

В системе наблюдений потока радиоизлучения на обеих частотах используется персональный компьютер, дополненный универсальным программируемым блоком, который содержит в себе 10-разрядный АЦП и ЦАП, 8-канальный коммутатор входных аналоговых сигналов, 3-канальный программируемый модуль таймера и модуль прерываний. Для автоматизации наблюдений разработан комплекс программ, который позволяет проводить наблюдения, накапливать и хранить информацию в цифровом виде на стандартных носителях, а также трансформировать накопленную информацию в формат, удобный для дальнейшей научной обработки данных на любом IBM-совместимом компьютере.

Программой предусмотрены коррекция оператором в диалоговом режиме системной даты и системного времени, калибровочных значений спектральной плотности мощности шума. Программа также предусматривает задание оператором частоты опроса системы наблюдений и усреднение полученных данных. Она имеет модуль визуализации, который выводит на экран монитора в графическом режиме результаты наблюдений, системную дату, текущее значение мирового времени и некоторую служебную информацию.

**Солнечный телескоп СОТОС** дает возможность оперативно получать в цифровом виде изображения полного диска Солнца в линиях солнечного спектра и в континууме. Для выявления солнечных источников всплесков жесткого излучения наиболее перспективными являются наблюдения в ИК-линии гелия  $\lambda = 1083$  нм и в континуумах водородных серий. Свечение хромосферы в линии Не I  $\lambda = 1083$  нм возникает на высотах около 2000 км и определяется главным образом возбуждением кратковолновым излучением (< 50.4 нм) из короны. Изображение Солнца в этой линии весьма похоже на негатив рентгеновского изображения. На нем видны темные гелиевые точки (аналог ярких рентгеновских точек), корональные дыры — источники потоков солнечного ветра и другие образования. Мониторинг солнечной активности в гелиевой линии позволяет выявить крупномасштабные изменения, происходящие на Солнце до и во время всплесков жесткого излучения, а также связи между отдельными активными областями.

#### Основные характеристики телескопа:

Пространственное разрешение	2.5"
Спектральное разрешение	0.01 нм
Спектральный диапазон	300—1200 нм
Приемник излучения	ПЗС-линейка
Время записи изображения Солнца	0.5—2 мин

Фокусные расстояния зеркал:	
объектива, коллиматора	225 см
и камеры	
действующий диаметр зеркал	10 см
Аберрация комы	< 2"

Солнечные радиотелескопы РТ-3 и метровых волн предназначены для регистрации уровня спектрального потока мощности радиоизлучения Солнца на частотах 2.5 и 2.85 ГГц и в континууме метрового диапазона. Составными частями радиотелескопов являются параболическая антенна для наблюдения радиоизлучения Солнца в сантиметровом диапазоне и синфазная антenna решетка метрового диапазона.

Средняя рабочая частота радиотелескопа метровых волн составляет 280 МГц, полоса пропускания радиометра 10 МГц. Относительная точность регистрации радиоизлучения Солнца при постоянной времени  $\tau = 0.1$  с не хуже 1 %. Радиотелескопы и радиометры имеют аналоговые выходы для регистрации наблюданного уровня излучения двумя способами: традиционным на бумажной ленте с помощью самописцев и автоматизированным в цифровом виде на магнитных носителях в стандартном формате.

Для автоматизации записи уровня сигналов стандартный персональный компьютер дополнен универсальным программируемым 10-разрядным контроллером, в котором время преобразования аналогового сигнала в цифровой составляет 30 мкс. Управляющая программа позволяет выполнить ряд сервисных функций, облегчающих запись, хранение, визуализацию данных, калибровку и управление устройствами радиотелескопа. Относительная погрешность определения уровня мощности 1–3 %; постоянная времени регистрации — 0.1 с.

Спектральный интервал чувствительности ПЗС-фотометра позволяет записывать цифровые изображения Солнца в бальмеровском и пашеновском континуумах. Расчеты показывают, что участки солнечной поверхности с повышенной интенсивностью излучения в бальмеровском или пашеновском континуумах соответствуют местам с повышенной мерой эмиссии, а изменения во времени интенсивности излучения обусловлены, в первую очередь, изменениями электронной плотности солнечной плазмы.

Мониторинг, проведенный в длинах волн  $\lambda = 363.87$  или 818.9 нм с временным разрешением порядка нескольких минут, дает возможность получать данные о макроскопических неоднородностях электронной плотности плазмы, о динамике и морфологии областей с повышенной плотностью.

Основные характеристики фотометра:	
Диапазон спектральной чувствительности	300—1100 нм
Количество пикселей (2 регистра по 1024)	2048
Линейный размер светочувствительного слоя	24 мм

Фотометрическая нестабильность за 30 мин	< 1 %
Неравномерность чувствительности линейки (программная корреляция)	0.1—0.2 %

К настоящему времени созданы действующие модели одномерного и матричного ПЗС-фотометров для получения цифровых изображений Солнца в участках оптического спектра от УФ до 1.1 мкм в ИК-области и проведены наблюдения с высоким временным разрешением. Табл. 3 представляет основные технические характеристики одномерного и матричного ПЗС-фотометров.

Для регистрации и первичной обработки получаемых изображений создан программный комплекс IRIS.

#### Основные возможности комплекса:

- Визуализация, обработка и анализ изображений (FITS, BMP и др. форматов).
- Автоматизация работы с большими наборами данных.
- Интерфейсная оболочка для пользовательских процедур.
- Удобный интуитивно понятный язык программирования.
- Легкая расширяемость системы процедурами пользователя.

Комплексная установка для регистрации всплесков околоземного ВЧ-излучения и атмосферных нейтронов на уровне моря регистрирует всплески синхротронного радиоизлучения электронов, освобождаемых солнечными гамма-квантами на высоте 30—35 км атмосферы Земли за счет эффектов Комптона и образования пар; потоки ускоренных в мощных вспышках протонов и ядер по увеличению фона атмосферных нейтронов и мюонов на уровне моря; потоки низкоэнергетических протонов, ударные волны в плазме солнечного ветра по синхротронному радиоизлучению высывающихся из зон захвата магнитосферы сгустков энергичных электронов и протонов, и по всплескам нейтронов на уровне моря на фоне потока нейтронов от галактических космических лучей. Блок-схема установки изображена на рис. 6.

#### Основные характеристики блока высокочастотных радиочастотных трактов:

Частоты регистрации околоземного синхротронного радиоизлучения	38, 74, 120, 240—460 МГц
--	--------------------------

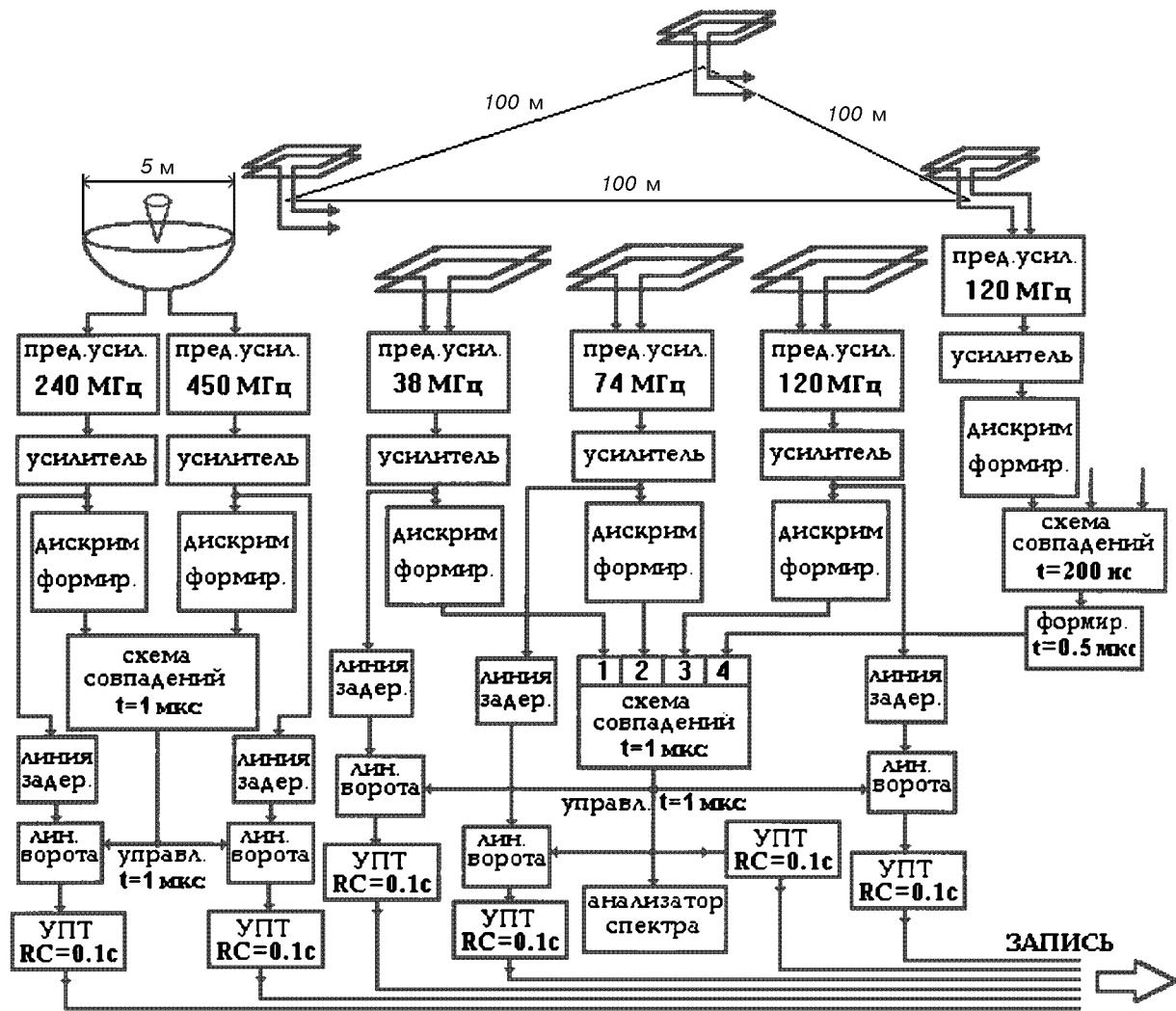


Рис. 6. Блок-схема установки для регистрации всплесков околоземного ВЧ-излучения и атмосферных нейтронов на уровне моря

Полоса пропускания  $\Delta f$

Разрешающее время схемы

совпадений  $\tau_{\text{разр}}$

Время интегрирования  $\tau_{\text{инт}}$

*Основные характеристики  
миононно-нейтронного детектора:*

Площадь регистрации

Время накопления

Число слоев пластмассового сцинтиллятора  
в двух блоках детекторов по  $5 \text{ м}^2$

Толщина свинцовой защиты в слое

Количество слоев свинцовой защиты

2 МГц

1 мкс

0.2 с

10 м<sup>2</sup>

0.2 с

2

5 см

ВЫСОКОЧАСТОТНОЕ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ  
МАГНИТОСФЕРЫ В ИЮЛЕ—АВГУСТЕ 1999 г.

С 20 июля по 16 августа 1999 г. были проведены пробные измерения потока радиоизлучения магнитосферного происхождения на частоте 151 МГц с помощью установки для исследования радиоизлучения магнитосферы Земли, описанной выше. Антенна во время проведения эксперимента все время была направлена в зенит. Всего наработано 650 ч наблюдений. В период с 20 по 24 июля и с 30 июля по 16 августа регистрация проводилась непрерывно, в то время, как 26 и 27 июля наблюдения проводились в отдельные промежутки времени.

Большое количество спорадических радиовсплесков, которое наблюдалось в указанный период, было обусловлено достаточно высокой солнечной активностью. Всего зарегистрировано 27 солнечных вспышек балла 1 и четыре вспышки балла 2, которые сопровождались 26 рентгеновскими вспышками балла M. Временной ход 3-часовых Кр-индексов геомагнитного поля на уровне поверхности Земли свидетельствует о том, что вспышки в период с 20 по 29 июля не были геoeffективными. Минимальные колебания магнитного поля зарегистрированы в этот период также и спутниками GOES8 и GOES10 на геостационарной орбите (высота 36 000 км). Однако после серии вспышек 29 июля баллов 1 и 2 и прихода высокоскоростного потока солнечного ветра в начале суток 30 июля в магнитосфере в этот же день развилась магнитная буря с максимумом в 19–22 UT. В тот же день частота и амплитуда спорадических радиовсплесков значительно увеличились в 16–18 UT.

Поскольку радиоизлучение земной магнитосферы представляет собой главным образом серии всплесков небольшой длительности (от нескольких секунд до 20–30 с) с амплитудами от  $10^{-23}$  до  $10^{-21}$   $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{Гц}^{-1}$ , в качестве индекса высокочастотного радиоизлучения было выбрано число радиовсплесков выше некоторого уровня. Уровень спектральной мощности радиоизлучения был выбран для того, чтобы не принимать во внимание большое число всплесков на уровне  $10^{-23}$   $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{Гц}^{-1}$ .

На рис. 7 показаны плотность и скорость солнечного ветра по данным спутника ACE; величины вертикальной составляющей и общих значений магнитного поля Земли, а также потоков электронов с энергиями более чем 2 МэВ на высоте 6.6 радиусов Земли по данным геостационарного спутника GOES10 в период с 29 по 30 июля 1999 г. Последним на этом графике приведен временной ход числа спорадических радиовсплесков на частоте 151 МГц выше уровня  $I_{\text{cp}} + \sigma$ , где  $I_{\text{cp}}$  — среднее значение спектральной плотности потока радиоизлучения магнитосферы Земли в данный полчасовой интервал за рассматриваемый период,  $\sigma$  — среднее квадратичное отклонение величины  $I_{\text{cp}}$ . Видно, что после прихода ударного фронта высокоскоростного потока солнечного ветра 30 июля в 6–8 UT значение вертикальной составляющей земного магнитного поля увеличилось примерно в четыре раза. Одновременно было отмечено интенсивное высыпание энергичных электронов: потоки их уменьшились более чем в 1000 раз. Максимальное же число спорадических радиовсплесков наблюдалось, как уже указывалось, спустя 8–10 ч. Этот факт указывает на то, что при значениях

параметра Мак-Илвайна  $L > 6$ , ни колебания и развитие неустойчивостей магнитного поля, ни высыпание электронов и других заряженных частиц высоких энергий не могут быть источниками высокочастотных радиовсплесков. Скорее всего, источник и излучающая область находятся во внутренних слоях магнитосферы, например во внутреннем радиационном поясе Земли и ионосфере на средних широтах. Если таковыми являются высывающиеся электроны с  $L = 2$  ( $L$  — оболочка наблюдения спорадического радиоизлучения), то можно предположить, что время  $t = 8–10$  ч совпадает со временем распространения волны радиальной диффузии энергичных электронов с  $L = 6.6$  до  $L = 2$ .

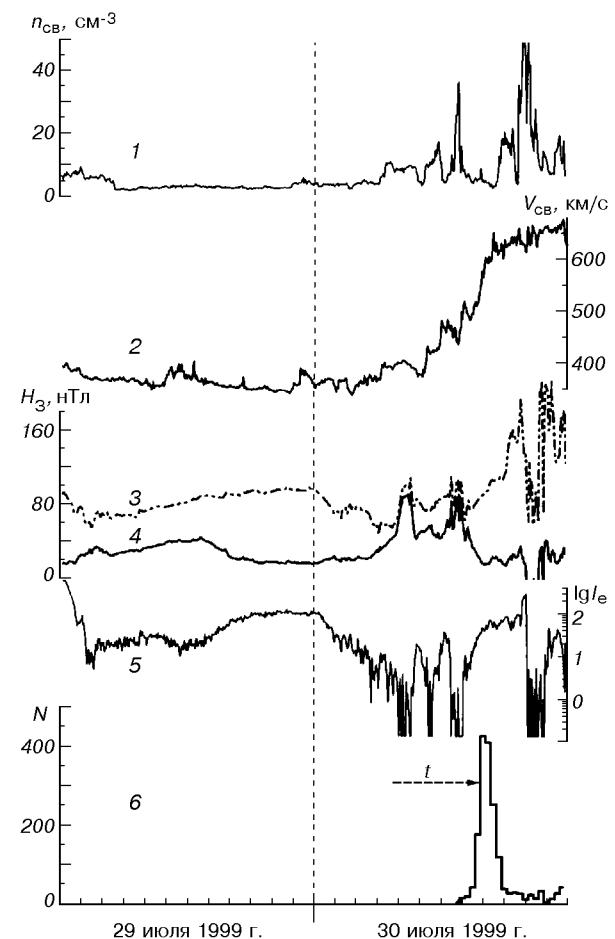


Рис. 7. Изменения геофизических параметров с 29 по 30 июля 1999 г.: 1, 2 — плотность и скорость солнечного ветра по данным ACE, 3, 4 — напряженность общего магнитного поля Земли и его вертикальной составляющей по данным GOES10, 5 — потоки  $J$  электронов ( $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{стэр}^{-1}$ ) с энергией  $E_e > 2$  МэВ по данным GOES10; 6 — число спорадических радиовсплесков  $N$  магнитосферы Земли на частоте 151 МГц

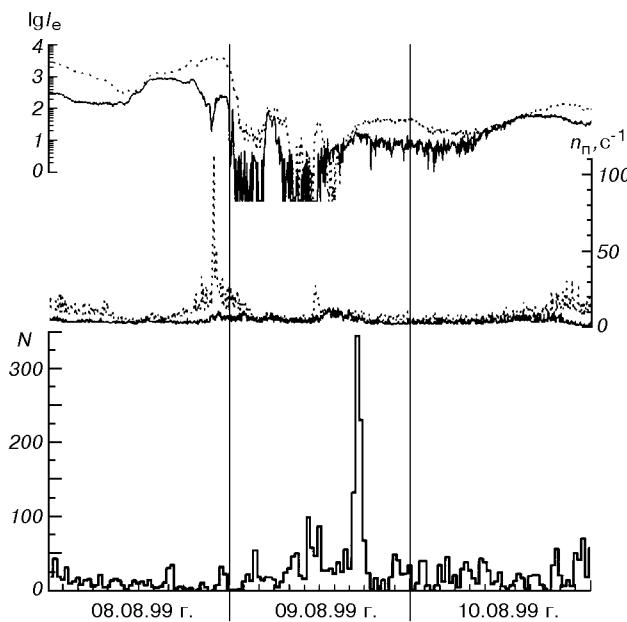


Рис. 8. Временной ход потоков электронов с энергией  $E_e > 2$  МэВ (верхняя кривая), протонов с энергией  $E_p > 1$  МэВ по данным спутника GOES10 и числа радиовсплесков на частоте 151 МГц в период с 8 по 10 августа 1999 г.

Значительное количество спорадических радиовсплесков в рассматриваемый период наблюдалось также 8—10 августа, когда по данным геостационарных спутников GOES8 и GOES10 после прихода ударной волны в околоземное пространство в 18 UT 8 августа в магнитосфере Земли начались интенсивные высыпания энергичных частиц. Из рис 8 видно, что высыпания электронов с  $E_e > 2$  МэВ начались примерно в 1 UT 9 августа, а максимум наблюдался через 16 ч. Заметных изменений потоков протонов с энергиями  $> 1$  МэВ 9 августа не наблюдалось по данным обоих спутников.

Таким образом, бортовой комплекс научной аппаратуры международного космического эксперимента КОРОНАС-ФОТОН и комплекс наземных установок позволяют глубже понять природу и тонкую структуру вариаций солнечной активности в различных спектральных диапазонах, а также исследовать причинно-следственные связи солнечно-земных явлений. Наземная установка для изучения высокочастотного радиоизлучения магнитосферы

позволяет изучать нестационарные процессы, происходящие в межпланетном пространстве и во внешних слоях земной магнитосферы.

1. Архангельский А. И., Котов Ю. Д. Возможности регистрации нейтронов гамма-спектрометром проекта «Фотон». Результаты расчета // Изв. РАН. Сер. Физ.—1997.—61, № 6.—С. 1167—1172.
2. Залюбовский И. И., Дудник А. В., Котов Ю. Д., Юрлов В. Н. Международный проект «Фотон» для комплексного изучения солнечной активности и солнечно-земных связей // Изв. РАН. Сер. Физ.—1997.—61, № 6.—С. 1173—1176.
3. Котов Ю. Д., Юрлов В. Н., Никольский С. И., Залюбовский И. И. Основные научные задачи спутникового проекта «Фотон» по изучению солнечных вспышек // Изв. РАН. Сер. Физ.—1997.—61, № 6.—С. 1162—1166.
4. del Peral L., Bronchalo E., Rodrigues-Frias M. D., et al. Pesca instrument for low-energy cosmic ions study in Photon satellite // Proc. 25th Internatioal Cosmic Ray Conf.—1997.—2.—P. 485—488.
5. Dudnik O., Malykhina T. The satellite «STEP» instrument for registration of energetic particle on board the Ukrainian spacecraft «Warning» // Proc. 16th European Cosmic Ray Symp. — Alcala (Spain), 1998.—P. 223—226.
6. Dudnik O. V., Zalyubovsky I. I. The Ukrainian instruments set for the ground accompaniment of the joint Ukrainian-Russian satellite project «Photon» to study the hard radiation of the Sun and Solar—Earth's magnetosphere connections // Adv. Space Res.—1998.—21, N 1/2.—P. 343—345.
7. Котов Ю. Д., Никольский С. И., Драновский В. И. Satellite Project «Photon» for the study of solar hard radiation // Coronas Information. — Potsdam: Astrophys. Inst., 1994.—9.—P. 1—12.
8. Котов Ю., Никольский С. И., Юрлов В. Н., Дамле С. В. Satellite Project PHOTON for Study of the Solar Flare Hard Radiation // Proc. 24th International Cosmic Ray Conf.—1995.—Vol 4.—P. 1263—1267.
9. Котов Ю. Д., Юрлов В. Н., Глыаненко А. С et al. Wide-band Spectrometer of Gamma-rays and Neutrons for Solar Satellite Project PHOTON // Proc. 24th International Cosmic Ray Conf.—1995.—Vol. 4.—P. 1267—1271.

#### SCIENTIFIC TASKS OF INTERNATIONAL SPACE EXPERIMENT KORONAS-PHOTON

O. V. Dudnik and I. I. Zalyubovsky

Description of scientific tasks and goals of the international space experiment KORONAS-PHOTON, third in the KORONAS series, is presented. Description of some instruments in the on-board scientific complex as well as in the ground-based installations for ground support of the satellite experiment is given. Preliminary results of test observations with the help of the installation for the study of high-frequency radio emission of the Earth's magnetosphere are discussed.

УДК 681.327.12.001.362:535

## Томографічна обробка даних бортових фотометричних спостережень

О. С. Коноваленко, В. М. Івченко, В. П. Лапчук

Київський національний університет ім. Тараса Шевченка

Надійшла до редакції 28.02.00

Двовимірна томографічна обробка даних бортових фотометричних вимірювань дозволяє відтворювати структуру (розділ яскравості) світних областей іоносфери. Розглянуто метод Кормака, який застосовується для обробки даних супутниковых спостережень іоносфери на лімбі Землі. Проведено моделювання бортових спостережень лімба та томографічної обробки модельних даних методом Кормака.

### 1. ВСТУП

В роботі розглянуто деякі методи томографічної обробки даних фотометричних спостережень емісій іоносфери з борту космічного апарату. Для оцінки можливостей томографії при лімбових фотометричних вимірюваннях проведено моделювання бортових спостережень та томографічної обробки даних. В проекті «Попередження» [1] планується виконувати спектрофотометричні спостереження лімба Землі в площині орбіти КА за допомогою фур'є-спектрометра, який буде зображення лімба (рис. 1).

Двовимірна томографічна обробка даних таких вимірювань дозволить відтворити структуру (розділ яскравості) світних областей іоносфери за висотою вздовж орбіти КА. Як правило, оптична товщина емісій верхньої атмосфери у видимому діапазоні спектра  $\tau \ll 1$ , що сприяє використанню

томографічних методів. Однак кути огляду об'єкта значно менші  $180^\circ$ , і це суттєво обмежує можливості томографічної реконструкції світної області.

Метод лімбових спостережень часто використовується для досліджень емісій в ІЧ-діапазоні спектру, бо спостереження слабких емісій на фоні «теплої» земної поверхні практично неможливі. В оптичному діапазоні лімбові спостереження дозволяють за рахунок геометрії в декілька разів збільшити оптичну товщину емісійних шарів, тобто зменшити вимоги до чутливості приймальної апаратури або покращити часову (і значить просторову) роздільність отримуваних даних. Попередні розрахунки вказують на можливість лімбових вимірювань емісій іоносфери з КА на орбіті висотою біля 600 км з відносною фотометричною точністю до 3 % при використанні фотоприймача на базі ПЗЗ-матриці з об'єктивом 70—90 мм, часом накопичення 0.2—2 с і роздільною здатністю по висоті 2—5 км.

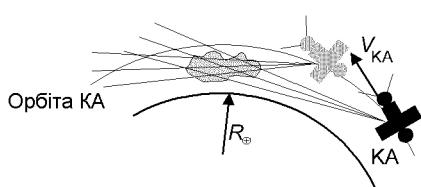


Рис. 1. Геометрія лімбових спостережень

### 2. ВИБІР МЕТОДУ ТОМОГРАФІЧНОЇ ОБРОБКИ

Існує великий вибір томографічних методів відтворення структури світних областей. При виборі методу слід враховувати кількість та геометрію

спостережень, характеристики реєструючої апаратури, а також час обчислень на наявній обчислювальній техніці.

Існуючі методи можна умовно розділити на кілька основних типів [2]:

#### A. Методи проекційного відтворення

##### A.1. Двовимірне проекційне відтворення

###### A.1.1. Метод паралельних пучків

###### A.1.2. Метод «віяла»

##### A.2. Тривимірне проекційне відтворення

#### B. Ітераційні методи

##### B.1. Алгебраїчне перетворення

##### B.2. Метод максимальної подібності

#### V. Методи фур'є-перетворень

Коротко розглянемо деякі з вище вказаних методів.

А. Методи проекційного відтворення використовуються для реконструкції об'єкта, який досліжується рівномірно з усіх сторін (об'єкт або реєструюча апаратура мають кутовий ступінь волі не менше  $180^\circ$ ) та відстань від нього до реєструючої апаратури є постійною величиною. На рис. 2 показано схему вимірювань при застосуванні методу паралельних пучків (двовимірний випадок):  $f(x, y)$  — невідома функція розподілу,  $O O'$  — відстань від об'єкта до реєструючої апаратури, реєструючі датчики розташовані вздовж осі  $O'x'$ .

Нехай функція  $p_\varphi(x')$ , де  $\varphi \in [0; 180^\circ]$ ,  $x' \in (-\infty; \infty)$ , описує проекційні дані реєструючої апаратури. Тоді зв'язок  $p_\varphi(x')$  з невідомою функцією розподілу  $f(x, y)$  задається виразом

$$p_\varphi(x') = \int_{-\infty}^{\infty} f(x', y') dy' = \\ = \iint f(x, y) \delta(x \cos \varphi + y \sin \varphi - x') dx' dy',$$

а перехід від системи координат об'єкта  $xOy$  до координатної системи реєструючої апаратури  $x'O'y'$  задається виразом

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}.$$

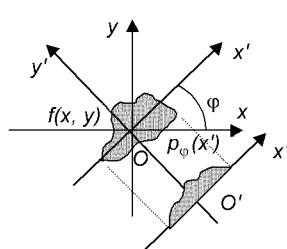


Рис. 2. Схема вимірювань при застосуванні методу паралельних пучків

Функцію  $p_\varphi(x')$  можна розкласти в ряд Фур'є за просторовою координатою  $x'$ :

$$P_\varphi(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} p_\varphi(x') \exp(-i\omega x') dx' = \\ = F(\omega_x, \omega_y)|_\varphi = F(\omega, \varphi),$$

де  $F(\omega_x, \omega_y)$  — двовимірне перетворення Фур'є функції  $f(x, y)$ ,  $\omega_x = \omega \cos \varphi$ ,  $\omega_y = \omega \sin \varphi$ . Можна показати, що невідома функція розподілу  $f(x, y)$  знаходиться так:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi d\varphi \left[ \int_{-\infty}^{\infty} dx' p_\varphi(x') h(x \cos \varphi + y \sin \varphi - x') \right],$$

де  $h(x') = F^{-1}(|\omega|)$  — зворотне перетворення Фур'є  $|\omega|$ .

Б. В найпростіших ітераційно-алгебраїчних методах області атмосфери, що спостерігається, розглядається як матриця елементів або пікселів (рис. 3) заданого розміру, кожне  $i$ -те спостереження  $b_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) є сумою добутків яскравостей  $x_j$  на довжину оптичних шляхів  $A_{ij}$  ( $j = 1, \dots, m$ ,  $m \leq n$ ) всіх елементів матриці, які знаходяться в напрямку даного спостереження. Для всіх  $n$  вимірів можна записати систему лінійних алгебраїчних рівнянь з  $m$  невідомими:

$$Ax = b.$$

З геометрії спостережень для кожного  $i$ -го виміру розраховуються оптичні шляхи  $A_{ij}$  в усіх елементах, які належать даному вимірюванню. Таким чином, невідомі яскравості можна знайти, розв'язавши систему лінійних рівнянь. Одну з модифікацій цього методу описано в роботі [3]. Частину атмосфери, що спостерігається, також можна подати у вигляді сферично паралельних шарів. В роботі [4] розглянуто алгоритм, що дозволяє відтворювати світні області за допомогою ітеративних процедур.

Розглянувши ці два принципово різні томографічні методи, можна зробити висновки про мож-

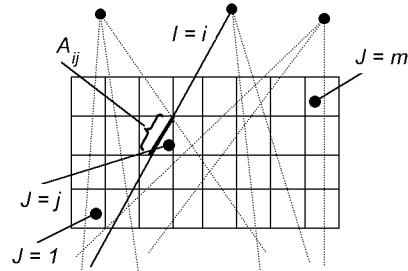


Рис. 3. Схема вимірювань при застосуванні методу алгебраїчного перетворення

ливість їх застосування до обробки даних лімбових спостережень емісій іоносфери. Геометрія лімбових вимірювань така, що світні області спостерігаються в обмеженому куті огляду, що не відповідає вимогам методів проекційного відтворення. Такі алгоритми можна застосовувати при надирних спостереженнях емісій іоносфери з високоорбітальних супутників.

Метод алгебраїчного перетворення невигідно застосовувати через суттєве, в декілька разів, збільшення лінійного розміру елементів світної області при невеликій (до 300) кількості вимірювань, що призводить до погіршення точності розрахунків та збільшення затрат часу на обчислення ітерацій.

### 3. МЕТОД КОРМАКА

Метод, розроблений А. Кормаком [5, 6], дозволяє відтворювати світну область, використавши лише лімбові спостереження. Розглянемо перетворення Кормака. Будемо вважати поле зору фотометра нескінченно малим і нехтувати самопоглинанням на шляху поширення світла та часом накопичення приладу.

На рис. 4 зображені геометричні побудови для пояснення зв'язку між функцією інтегральної яскравості  $f(p, \varphi)$ , яка спостерігається з борту КА на висоті  $H$ , та елементарною функцією яскравості утворення  $g(r, \theta)$  в площині орбіти КА. Обидві функції  $f$  та  $g$  зручно задати в полярних координатах. Кожен лінійний інтеграл  $f(p, \varphi)$  є сумою всіх  $g(r, \theta)$  вздовж напрямку, який задається відстанню  $p$  (від центра Землі) та кутом  $\varphi$  (від деякого опорного). Їх можна розкласти в ряд Фур'є за кутовою координатою:

$$f(p, \varphi) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} F_n(p) e^{in\varphi}, \quad (1)$$

$$g(r, \theta) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} G_n(r) e^{in\theta}$$

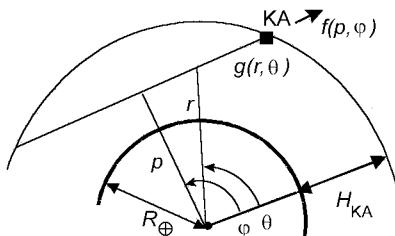


Рис. 4. Зв'язок між  $f$  та  $g$ . Кожен лінійний інтеграл  $f(p, \varphi)$  є сумою всіх  $g(r, \theta)$  вздовж напрямку, який задається відстанню  $p$  (від центра Землі) у площині орбіти КА та кутом  $\varphi$  (від деякого опорного)

де

$$F_n(p) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(p, \varphi) e^{-in\varphi} d\varphi,$$

$$G_n(r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} g(r, \theta) e^{-in\theta} d\theta$$

— коефіцієнти ряду Фур'є. Можна показати, що аналітичний зв'язок між  $F_n(p)$  та  $G_n(r)$  задається за допомогою перетворення Кормака [5, 6]:

$$G_n(r) = -\frac{1}{\pi} \frac{d}{dr} \int_r^{\infty} \frac{r F_n(p) T_n(p/r)}{p(p^2 - r^2)^{1/2}} dp, \quad (2)$$

де  $T_n(p/r)$  — поліном Чебишева I роду  $n$ -го степеня. Максимальним значенням верхньої межі інтегрування є радіус орбіти КА (у випадку колової орбіти)  $R = R_\oplus + H$ , або таке значення  $r$  при якому є визначена функція  $f(p, \varphi)$ .

Можна спростити (2) шляхом диференціювання по  $r$  та інтегрування частинами останнього виразу [7]:

$$G_n(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{dp}{(p^2 - r^2)^{1/2}} F_n(p) T_n(p/r). \quad (3)$$

Для чисельного інтегрування останнього виразу необхідно позбутися сингулярності в знаменнику, при  $p \rightarrow r$ . Для цього функцію  $F_n(p)$  можна аналітично задати так, щоб  $\frac{d}{dp} F_n(p) \propto (p^2 - r^2)^{1/2}$ . В [7] пропонується заміна  $x = p/r$ , і функція  $F_n(p)$  інтерполюється квадратичним сплайном  $Ap^2 + Bp + C$ . Тоді (3) можна записати так:

$$G_n(r) = -\frac{1}{\pi} [2Ar I_{1,n} + BI_{0,n}], \quad (4)$$

де

$$I_{m,n} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{x^m T_n(x)}{(x^2 - 1)^{1/2}} dx.$$

Інтеграл  $I_{m,n}$  знаходитьться за допомогою рекурентного співвідношення для полінома Чебишева I-го роду степеня  $n$ :

$$T_n(x) = 2xT_{n-1}(x) - T_{n-2}(x). \quad (5)$$

Наші чисельні розрахунки показали, що рекурсивні процедури потребують значного часу для обчислення коефіцієнтів (4).

В даній роботі пропонується позбутися сингулярності в (2) шляхом заміни  $p' = \sqrt{p^2 - r^2}$ . Тоді (2) можна записати так:

$$G_n(r) = -\frac{1}{\pi} \frac{d}{dr} \int_0^{\sqrt{R^2-r^2}} \frac{r F_n(\sqrt{p'^2+r^2}) T_n(\sqrt{p'^2+r^2}/r)}{p'^2+r^2} dp', \quad (6)$$

де поліном Чебишева обчислюється за формулою:

$$T_n(x) = \frac{1}{2} \left\{ [x + \sqrt{(x^2-1)}]^n + [x - \sqrt{(x^2-1)}]^n \right\} \quad (7)$$

при  $|x| \geq 1$ . Формула (7) дає виграш у швидкості обрахування полінома Чебишева  $T_n(x)$  приблизно в  $n!$  разів порівняно з рекурсивною процедурою (5).

Підставляючи (6) в другу формулу (1) можна знайти яскравість  $g$  в точці з координатами  $(r, \theta)$ . Виходячи з того, що  $g(r, \theta)$  та  $f(p, \varphi)$  — дійсні функції від дійсних величин, останні можна розкладати в звичайний тригонометричний ряд Фур'є. Тоді  $n = 0, 1, 2, \dots, n_{\max} - 1$ , де  $n_{\max}$  — кількість коефіцієнтів ряду Фур'є.

Слід зауважити, що даний метод томографічної обробки даних фотометричних спостережень можна застосовувати лише для лімбових спостережень, при яких в поле зору реєструючого приладу не попадає поверхня Землі. З (2) видно, що математично це можна записати

$$p > r > R_{\oplus}, \quad (8)$$

інакше при  $r < R_{\oplus}$  значення функції  $g(r, \theta)$  не матимуть фізичного змісту. Тому для обробки надирних спостережень слід користуватись іншим методом.

#### 4. АЛГОРИТМ ТОМОГРАФІЧНОЇ ОБРОВКИ МЕТОДОМ КОРМАКА

Нижче наведено алгоритм томографічної обробки даних методом Кормака. В формулі (6) коефіцієнти  $F_n(p)$  ряду

$$f(p, \varphi) = F_0(p) + 2 \sum_{n=1}^{n_{\max}} [F_n^c(p)\cos(n\varphi) + F_n^s(p)\sin(n\varphi)],$$

визначаються так:

$$\begin{aligned} F_0(p) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(p, \varphi) d\varphi, \\ F_n^c(p) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(p, \varphi) \cos(n\varphi) d\varphi, \\ F_n^s(p) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(p, \varphi) \sin(n\varphi) d\varphi. \end{aligned} \quad (9)$$

Для чисельного інтегрування останніх виразів дискретно задані значення  $\{\varphi_i, p_i, f_i\}$  інтерполяються сплайнами другого порядку [8] для визначення функції  $f(p, \varphi)$  для будь-яких  $p \in [p_{\min}, p_{\max}]$  та  $\varphi \in [\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$ . Коефіцієнти ряду Фур'є функції  $g(r, \theta)$  визначаються за допомогою перетворення Кормака (6):

$$G_0(r) = -\frac{1}{\pi} \frac{d}{dr} \int_0^{\sqrt{R^2-r^2}} \frac{r F_0(\sqrt{p^2+r^2})}{p^2+r^2} dp, \quad (10)$$

$$G_n^c(r) = -\frac{1}{\pi} \frac{d}{dr} \int_0^{\sqrt{R^2-r^2}} \frac{r F_n^c(\sqrt{p^2+r^2}) T_n(\sqrt{p^2+r^2}/r)}{p^2+r^2} dp,$$

де

$$T_n(x) = \frac{1}{2} \left\{ [x + \sqrt{(x^2-1)}]^n + [x - \sqrt{(x^2-1)}]^n \right\}$$

— поліном Чебишева I роду степеня  $n$  при  $|x| \geq 1$ . Верхня межа інтегрування була вибрана максимальною:  $R = p_{\max}$ . Кількість врахованих коефіцієнтів ряду Фур'є  $n_{\max}$  обмежена тим, що при збільшенні  $n_{\max}$  збільшується похибка другого інтеграла (10) внаслідок високого степеня полінома Чебишева. Інтегали (9), (10) визначаються методом трапецій з точністю 1—5 %.

Функція яскравості світної області  $g(r, \theta)$  визначається за формулою

$$g(r, \theta) = G_0(r) + 2 \sum_{n=1}^{n_{\max}} [G_n^c(r)\cos(n\theta) + G_n^s(r)\sin(n\theta)].$$

#### 5. МОДЕЛЮВАННЯ БОРТОВИХ ФОТОМЕТРИЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ СВІТНИХ ОБЛАСТЕЙ

Для відпрацювання томографічної обробки даних було проведено моделювання бортових фотометричних спостережень. В полярних координатах  $(r, \theta)$  задавався модельний об'єкт з гауссовим розподілом яскравості  $g(r, \theta)$  (за лінійною та кутовою координатами) на висоті  $h$  від поверхні Землі (рис. 5).

Для модельних розрахунків задавались такі параметри: висота орбіти КА  $H = 600$  км, поле зору  $\omega = 1.6^\circ$ , кількість фоточутливих елементів лінійки спектрофотометра  $N = 32$ . При цьому роздільна здатність по висоті складає 2.4 км для тангенційної віддалі 2445 км до об'єкта на висоті 100 км. Моделювання спостережень полягає у визначенні лінійної інтегральної яскравості  $f_i(p_i, \varphi_i)$  для кожного окремого вимірю  $i = 1, \dots, N_{\text{obs}}$  за відомим співвідношенням Радона:

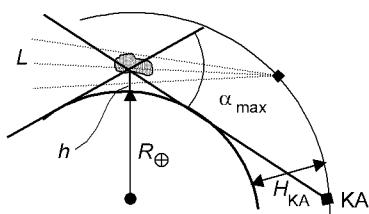


Рис. 5. Геометрія бортових фотометрических спостережень світної області іоносфери на висоті  $h$

$$f_i(p_i, \varphi_i) = \int g(r, \theta) dl, \quad (11)$$

де  $L$  — лінія інтегрування;  $g(r, \theta)$  — розподіл яскравості модельного об'єкта. Кількість вимірювань  $N_{\text{obs}}$  задається в межах кута  $\alpha_{\max}$ , який визначається формулою

$$\alpha_{\max} = 2 \arccos \frac{R_{\oplus}}{R_{\oplus} + h},$$

В межах цього кута всі спостереження  $f(p, \varphi)$  мають лінійну координату  $p > R_{\oplus}$ . Це відповідає умові (8). Для висоти модельного об'єкта  $h = 100$  км  $\alpha_{\max}$  становить  $20^{\circ}$ , і при збільшенні висоти збільшується повільно (рис. 6). При реальних спостереженнях кут  $\alpha_{\max}$  ще менший, тому що фотометричні вимірювання поблизу поверхні Землі ( $p \approx R_{\oplus}$ ) не використовуються.

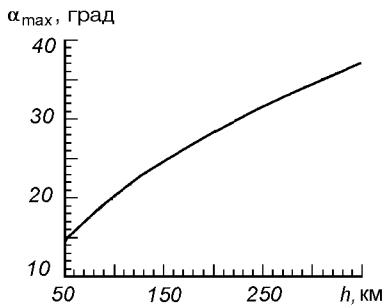


Рис. 6. Залежність кута огляду від висоти об'єкта

## 6. РЕЗУЛЬТАТИ

За описаним вище алгоритмом була проведена томографічна обробка модельних даних методом Кормака, результати якої подані на рис. 7—9. Задавалися кілька модельних об'єктів з гауссовим розподілом  $g(r, \theta)$  яскравості.

Наближення моделювання до реальних вимірювань створювалось двома способами: 1) введенням

шумової складової до результатів спостережень, що імітує «темновий струм» та шум зчитування фото-приймача, та 2) введення фону, на якому спостерігається об'єкт.

На рис. 7 наведено результат томографічної обробки спостережень трьох модельних об'єктів (а). Розподіл яскравості модельного об'єкта I задається ідеальною гауссіаною в координатах висота  $h$ , довгота  $\theta$  (в площині орбіти КА). Відтворений об'єкт (б) має розподіл яскравості, близький до модельного (в), але амплітуда гауссіан на 20 % менша. Також помітна відмінність у розподілі по кутовій координаті  $\theta$  (г). Це є наслідком того, що модельні об'єкти «спостерігалися» при невеликому куті огляду  $\alpha$ .

Для об'єкта II ідеальна гауссіана зашумлена. До функції вимірювань  $f(p, \varphi)$  додавалася випадкова додатна величина  $\Delta f$  (використано генератор випадкових чисел з періодом  $2^{32}$ ), така що  $0 \leq \Delta f \leq \eta_{\max}(f(p, \varphi))$ , де  $\eta \in (0, 1)$ . Таким чином, в модельні спостереження додавався шум з максимальною амплітудою  $100\eta$  відсотків від максимального значення функції  $f(p, \varphi)$ . 30 %-не «зашумлення» призвело до збільшення відносної амплітуди яскравості відтвореного об'єкта на 20—30 %. Проведені розрахунки показали, що при шумі з амплітудою менше 10 % від сигналу похибкою можна нехтувати.

При реальних спостереженнях емісій іоносфери завжди є фон, який погіршує відношення сигнал/шум. Модель фону III, величина якого постійна по кутовій координаті (г) і має гауссовий розподіл з висотою (в), та його відтворення (б) також зображені на рис. 7. В даному випадку фон можна розглядати як протяжний об'єкт (вздовж кутової координати  $\theta$ ), який виходить за межі кута огляду  $\alpha_{\max}$ . Тому по кутовій координаті  $\theta$  фон практично не відтворився.

На рис. 8 наведено результати обробки модельного об'єкта — ідеальної гауссіані, з амплітудою фону 80 % від амплітуди модельного об'єкта. Відсутність інформації про кутові розміри фону призводить до появи артефактів та збільшення амплітуди відтворених об'єктів на 20—50 %, а інколи і в 2—3 рази.

Можливості застосованого методу для розділення двох об'єктів демонструються рис. 9. Модель I — два ідентичні об'єкти з гауссовим розподілом яскравості по лінійній та кутовій координатах, розташовано на однаковій висоті. Модель II — ці ж об'єкти з доданим 30 % фоном (постійним по кутовій координаті), модель III — два об'єкти на різних висотах.

Як видно з рисунків, найкраще відтворилися

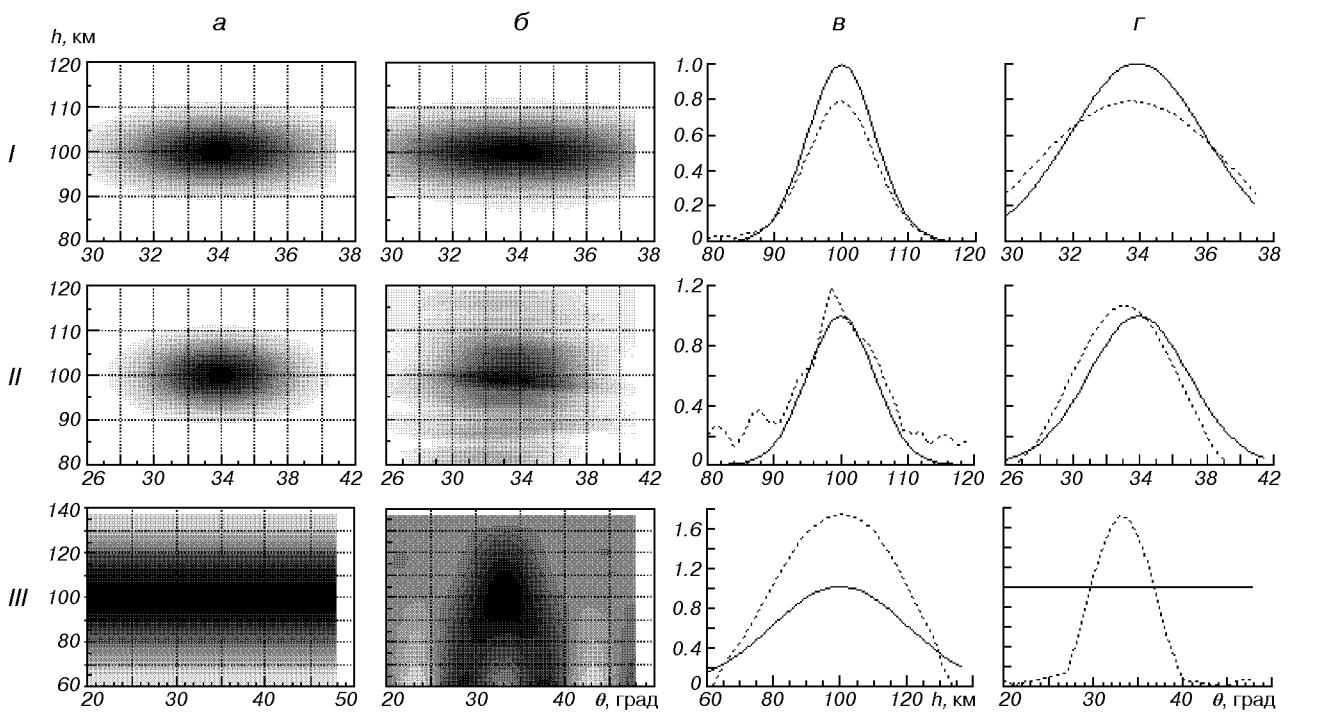


Рис. 7. Розподіли яскравості та профілі по лінійній та кутовій координатах для випадків: I — модельний об'єкт з гауссовим розподілом яскравості; II — модельний об'єкт I, до «спостережень» якого додано 30 %-й білий шум; III — модель фону з гауссовим розподілом по лінійній координаті та постійний — по кутовій. *a* — модельний об'єкт; *b* — відтворений об'єкт за 320 вимірюваннями; *v* — профіль за лінійною координатою *h*; *g* — профіль за кутовою координатою. Суцільна лінія — профіль модельного об'єкта, штрихова — відтвореного

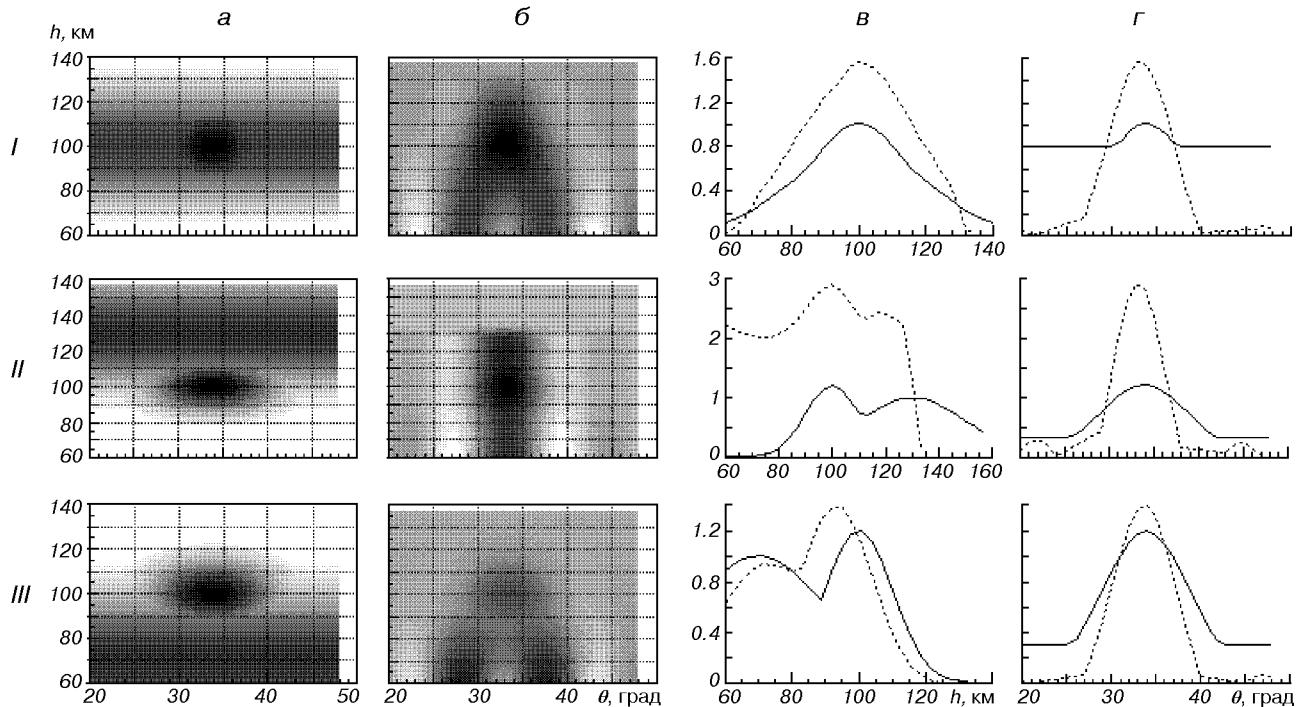


Рис. 8. Розподіли яскравості та профілі по лінійній та кутовій координатах для випадків: I — модельний об'єкт з гауссовим розподілом яскравості та 80 % фоном; II — модельний об'єкт «під 80 % фоном»; III — модельний об'єкт «над 80 % фоном». *a* — модельний об'єкт; *b* — відтворений об'єкт за 320 вимірюваннями; *v* — профіль за лінійною координатою *h*; *g* — профіль за кутовою координатою. Суцільна лінія — профіль модельного об'єкта, штрихова — відтвореного

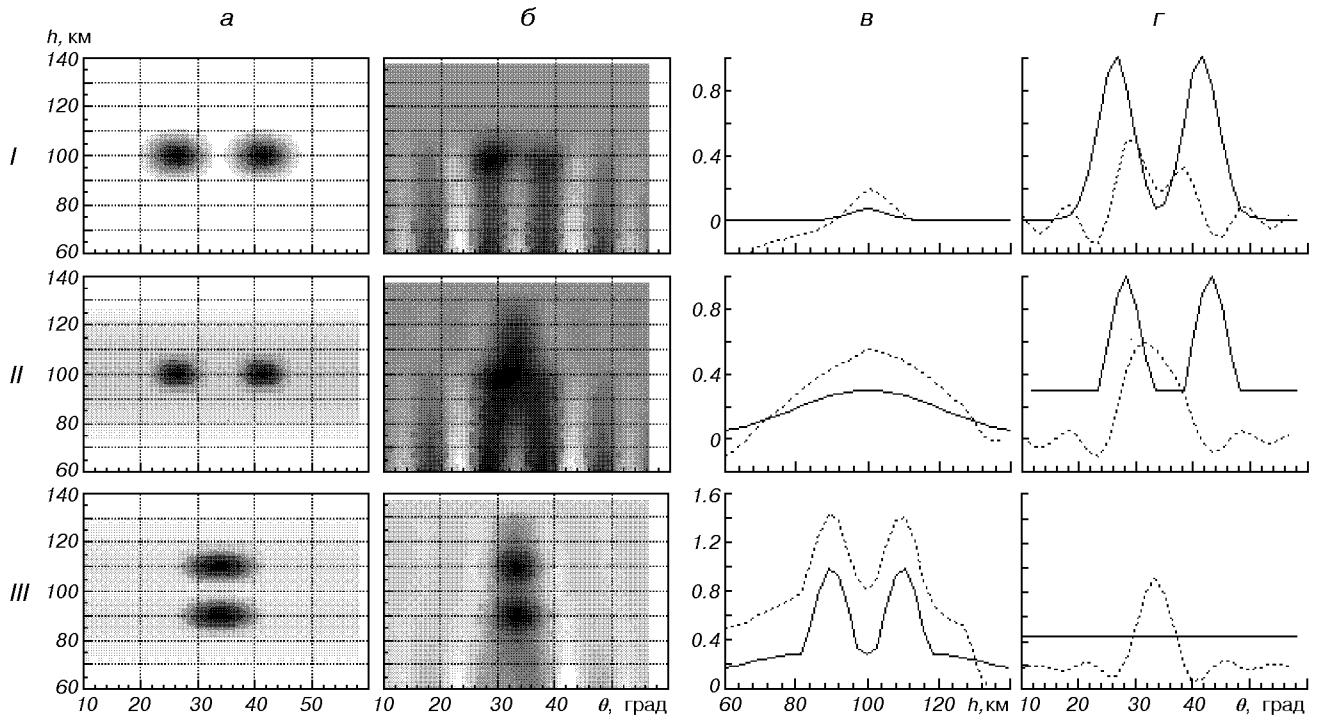


Рис. 9. Розподіли яскравості та профілі по лінійній та кутовій координатах для випадків: I — два модельних об'єкти з гауссовим розподілом яскравості, розташовані на однаковій висоті; II — два модельних об'єкти з доданим 30 % фоном; III — два модельних об'єкти з гауссовим розподілом яскравості, розташовані на різних висотах. а — модельний об'єкт; б — відтворений об'єкт за 320 виміріами; в — профіль за лінійною координатою  $h$ ; г — профіль за кутовою координатою. Суцільна лінія — профіль модельного об'єкта, штрихова — відтвореного

об'єкти з найбільшим кутовим розміром. Це наслідок того, що при відтворенні враховувалося всього 40 коефіцієнтів ряду Фур'є. При врахуванні більшої кількості коефіцієнтів значно збільшується час обробки, зростає похибка обчислення інтегралів (9), (10), та у відтворених об'єктах з'являються артефакти внаслідок високого степеня поліномів Чебишева.

Слід зауважити, що при чисельних розрахунках лінійних інтегралів (11) в моделюванні спостережень поле зору фоточутливого пристрою вважалося нескінченно малим. Тому питання впливу поля зору на якість томографічного відтворення в даній роботі не розглядалось.

Час обробки даних томографічних спостережень залежить від кількості вимірів, точності визначення інтегралів (9), (10) та їхньої кількості (кількості точок або пікселів, у яких визначається функція  $g(r, \theta)$ ). Для 320 вимірів, 2 %-ї точності інтегралів, кількості точок 900 (30×30 пікселів) час обробки становить 1—4 год на ПК «Pentium 166 МГц» з операційною системою UNIX, і біля 1 год на ПК з процесором «Celeron 400 МГц».

Метод Кормака дає задовільні результати при умовах: 1) висота об'єкта більша 300 км, 2) відносно мала яскравість фону, наприклад при спостереженнях в авроральних областях. Для висот 100 км кут огляду  $\alpha_{\max} = 20^\circ$  і мінімальний розмір об'єкта 4 км за висотою та  $2^\circ$  за кутовою координатою, для висоти 225 км —  $\alpha_{\max} = 30^\circ$ , мінімальний розмір об'єкта 3.4 км на  $1^\circ$ . Для слабоконтрастних об'єктів в іоносфері на висотах, менших 300 км, необхідні інші методи, з використанням надирних спостережень. В роботі [7] метод Кормака успішно використовувався для відтворення світніх областей на висотах 300—400 км.

Детальний аналіз (обмеження, вимоги до методів спостережень) та порівняння декількох томографічних методів обробки даних спостережень іоносфери розглядається в роботі [10], в якій кожен метод перевірено чисельним моделюванням.

Робота частково підтримувалась за рахунок теми Міносвіти та НАН України № 197U015786 та гранта INTAS-CNES-97-1769.

1. Коцаренко М. Я., Корепанов В. Є., Івченко В. М. Дослідження іоносферних провісників землетрусів (експеримент «Попередження») // Космічна наука і технологія.—1995.—1.—№ 1.—С. 96—99.
2. Cho Z. H.. Computerized Tomography // Encyclopedia of Physical Science and Technology. — London: Acad. press., 1987.—Vol. 3.—P. 507.
3. Kunitake M., Ohtaka K. Tomographic imaging of the ionosphere over Japan by the modified truncated SVD method // Ann. Geophysicae.—1995.—13.—P. 1303—1310.
4. Fesen C., Hays P. Two-dimensional technique for satellite airglow data. // Appl. Opt.—1982.—21.—P. 3784.
5. Cormack A. M. Representation of a Function by its Line Integrals with Some Radiological Applications. // J. Appl. Phys.—1962.—34.—P. 2722.
6. Cormack A. M. Representation of a Function by its Line Integrals with Some Radiological Applications II. // J. Appl. Phys.—1964.—35.—P. 2906.
7. Solomon S. C., Hays P. B. Tomographic Inversion of Satellite Photometry. // Appl. Opt.—1984.—23.—P. 3409.
8. Eberly D. The Magic of 3D Worlds: A Practical Approach to Real-Time Computer Graphics. Morgan-Kaufmann Publishers, San Francisco, CA. To appear, March 2000. Or article «Quadratic Interpolation of Meshes» on [http://www.magic-software.com/gr\\_intp.htm/meshintp.pdf](http://www.magic-software.com/gr_intp.htm/meshintp.pdf)
9. Sutton E., Na H. A Block Iterative Algorithm for Tomographic Reconstruction of Ionospheric Electron Density. Department of Electrical and Computer Engineering, Univ. of Iowa. // Preprint to appear in Int. J. Imag. System Technol.—1996., <http://www.icaen.uiowa.edu/~ecsutton/cit/cit.html>.
10. Frey H., Frey S., Larson D., Nygren T., Semeter J. Tomographic methods for magnetospheric applications. // Science Closure and Enabling Technologies for Constellation Class Missions eds. V. Angelopoulos and P. V. Panetta (Berkeley).—1998.—P. 72—77., <http://sprg.ssl.berkeley.edu/atmos/publication/constellation.html>.

#### **TOMOGRAPHIC PROCESSING OF ONBOARD PHOTOMETRIC MEASUREMENTS**

**O. S. Konovalenko, V. M. Ivchenko, and V. P. Lapchuk**

Defining the location and structure of airglow needs tomographic data processing of photometric measurements. The Cormack inversion is used for tomographic reconstruction of airglow. Both the observed function of column brightness and the volume emission rate function of airglow may be expanded in a Fourier series. The inversion allows the Fourier coefficients of volume emission rate function to be obtained using the Fourier coefficients of the observed function of column brightness. The software was developed, and a numerical simulation of onboard observations and their tomographic processing was made.

УДК 551.510.535:550.388.2

# Спутниковые ионосферные наблюдения предвестников землетрясений

В. В. Гримальский<sup>1</sup>, В. Н. Ивченко<sup>2</sup>, Г. В. Лизунов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут космічних досліджень НАНУ—НКАУ, Київ

<sup>2</sup>Київський національний університет ім. Тараса Шевченка

Надійшла до редакції 25.07.00

Подається огляд супутниковых спостережень сейсмогенних явищ в іоносфері. На основі наявних даних побудовано гіпотетичні портрети цих явищ. Проаналізовано основи, на яких «аномальні» збурення іоносферних параметрів розглядаються як провісники землетрусів.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Гипотеза о том, что некоторые ионосферные явления возникают под действием сейсмической активности Земли, давно обсуждается в литературе. Эта гипотеза не является общепризнанной. Ее экспериментальная проверка затруднена тем, что не известны признаки, позволяющие отделить сейсмогенные возмущения ионосферы от возмущений несейсмической природы. Анализируя данные, мы можем только предполагать, что между некоторыми ионосферными и сейсмическими событиями была связь, но ни в одном из описанных в литературе случаев, по-видимому, не можем этого доказать. На сегодняшний день ситуация такова: с одной стороны, имеется множество спутниковых и наземных наблюдений, свидетельствующих о том, что подготовка землетрясений вызывает определенные эффекты в ионосфере. С другой стороны, количество и качество наблюдений недостаточны для того, чтобы статистически верифицировать даже основные характеристики «ионосферных предвестников землетрясений».

К сейсмогенным явлениям в ионосфере относят весьма широкий круг явлений, часть которых регистрируется космическими аппаратами *in situ*, а часть дистанционно наблюдается с поверхности Земли (методами вертикального зондирования и радиопросвечивания ионосферы, регистрации сдви-

га фазы на радиотрассах сверхдлинных волн, при оптических наблюдениях свечения ночного неба и т. д.). При этом явления, регистрируемые методами наземных и спутниковых измерений, различаются между собой. С поверхности Земли наблюдаются эффекты, свидетельствующие о генерации плазменных неоднородностей в нижней и средней ионосфере (слоях D, E, F<sub>1</sub>). На характерных для спутниковых орбит высотах — в слое F<sub>2</sub> ионосферы и магнитосфере — такие неоднородности не возникают. Вместо них спутники регистрируют электромагнитные эмиссии и потоки энергичных частиц, которые не могут наблюаться с поверхности Земли. Поэтому данные об ионосферных предвестниках землетрясений в настоящее время образуют две разнородные группы: данные спутниковых и данные дистанционных наземных измерений. Настоящая работа посвящена обзору спутниковых данных.

Впервые корреляция электромагнитных эмиссий ионосферы с землетрясениями была обнаружена при анализе данных спутника «Интеркосмос-19», зарегистрировавшего аномальные всплески КНЧ- и ОНЧ-волн. По спектральному составу эти всплески напоминали авроральные и магнитосферные шипения, но наблюдались в таких областях среднеширотной ионосферы, куда ни те, ни другие проникать не должны, и где шипения не генерируются локально (при имевшей место спокойной гелиофизической обстановке). В работах [4, 6] было пока-

зано, что обнаруженные излучения коррелировали с сейсмической активностью: во-первых, эмиссии наблюдались на L-оболочках, пересекающих эпицентры соответствующих землетрясений, а во-вторых, возникали за несколько часов (иногда за сутки) до главного толчка, продолжаясь примерно столько же после. Эти два соответствия — времени и места — и явились основанием для предположения [4, 6] о сейсмогенном происхождении наблюдавшихся шипений.

В дальнейшем различными научными группами был проведен ретроспективный анализ наблюдений целого ряда ионосферных и магнитосферных спутников, в результате которого были обнаружены многочисленные корреляции между ионосферными и сейсмическими событиями (см. работы [7, 15, 16, 23, 27] и библиографию в них). Однако интерпретация этих наблюдений столкнулась с целым рядом трудностей. Прежде всего, все данные о сейсмогенных эффектах в ионосфере были получены спутниками как дополнительные результаты экспериментов, нацеленных на исследование иных явлений, в основном эффектов солнечно-земных связей. Последние наиболее заметны в авроральных областях магнитосферы, где на их фоне сравнительно слабые сейсмогенные возмущения практически неразличимы. В средних и низких широтах солнечная активность слабее маскирует сейсмические воздействия, но здесь научная аппаратура спутников включалась лишь эпизодически. Кроме того, чувствительность приборов, настроенных на работу в авроральной ионосфере, недостаточна для регистрации фоновых событий в среднеширотной ионосфере. В результате спутник с работающим комплексом научной аппаратуры сравнительно редко мог регистрировать сейсмоэффекты над эпицентральной зоной землетрясения.

Следующее затруднение связано с селекцией ионосферных предвестников землетрясений на фоне возмущений несейсмической природы, о чем было сказано выше. Обсуждаемые авторами совпадения ионосферных и сейсмических событий во времени и пространстве могут происходить случайно; чтобы убедиться в наличии здесь причинно-следственной связи, необходим большой наблюдательный материал, который еще не накоплен.

По-видимому, все, кто занимается изучением литосферно-ионосферного взаимодействия, соглашаются в том, что существенный прогресс в этой области невозможен без новых экспериментов. В настоящее время разрабатывается сразу несколько спутниковых проектов, которые позволят исследовать отклик ионосферы на процессы «внизу» — в нижней атмосфере, на поверхности Земли, в ли-

сфере. На финальной стадии подготовки находятся французский микроспутниковый проект DEMETR (с ориентированной датой запуска в 2001—2002 гг.), украинский «Вариант» (в 2002 г.) и американский TIMED (май 2000 г.). Еще целый ряд проектов находится на стадии предварительной проработки: украинский «Попередження», российский «Предвестник». Данный обзор написан в связи с подготовкой проектов «Вариант» и «Попередження» и имеет целью проанализировать круг явлений, которые предполагается исследовать в этих проектах.

В работе будут рассмотрены основные типы аномальных возмущений ионосферы, относимые к сейсмогенным, и построен ожидаемый «портрет» ионосферного предвестника землетрясения при его наблюдении с борта спутника (раздел 2). В этой части мы не подвергаем сомнению само существование обсуждаемых ионосферных возмущений; спорной является гипотеза об их сейсмогенном происхождении. Вопросам, связанным с верификацией данной гипотезы, посвящен раздел 3.

## 2. ГИПОТЕТИЧЕСКИЕ ПОРТРЕТЫ ИОНОСФЕРНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕРЯСЕНИЙ

На основе представленных в литературе данных попробуем составить «обобщенный образ» ионосферного предвестника землетрясения. Будем исходить из оптимистической точки зрения, состоящей в том, что ионосферные предвестники землетрясений существуют, что они возникают в результате закономерного процесса литосферно-ионосферного взаимодействия и что спутниками были измерены некоторые, возможно разрозненные, характеристики этого процесса. Следуя [7], выделим следующие типы сейсмогенных эффектов, регистрируемых спутниками: (i) вистлерные пояса — электромагнитные и квазиэлектростатические УНЧ-ОНЧ-шипения, заполняющие вытянутые вдоль геомагнитных L-оболочек области ионосферы и магнитосферы, (ii) МГД-колебания сегмента L-оболочки, опирающегося на эпицентр землетрясения, (iii) крупномасштабные неоднородности ионосферной плазмы, (iv) вариации потоков энергичных частиц, высыпающихся в ионосферу из радиационных полей. Все эти эффекты были обнаружены ретроспективно. Эффекты возникали за несколько часов (иногда за несколько суток) до главного толчка, нарастали с его приближением и длились примерно столько же после окончания землетрясения.

**(i) Вистлерные пояса.** Излучение данного типа охватывает обширные сектора L-оболочек, прохо-

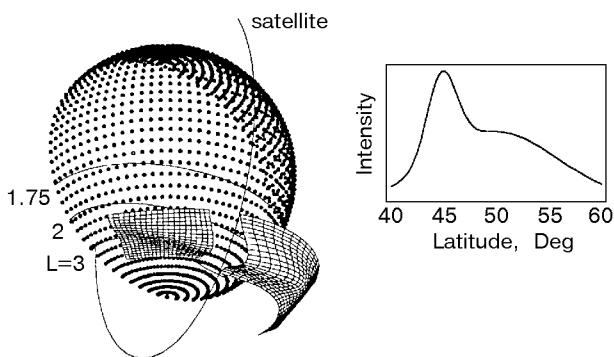


Рис. 1. Предполагаемая структура вистлерного пояса. Слева — распределение интенсивности КНЧ-ОНЧ-волн в горизонтальном сечении вистлерного пояса (интенсивность излучения пропорциональна высоте рельефа). На поверхности глобуса показаны геомагнитные параллели, соответствующие значениям параметра  $L = 1.75, 2, 3$ . Справа — интенсивность эмиссии вдоль траектории спутника

дящих через эпицентр землетрясения. По геомагнитной широте излучение локализовано в сравнительно узком диапазоне углов  $\delta\Phi \approx 5\ldots20^\circ$ , но по геомагнитной долготе простирается вплоть до  $\delta\Lambda \approx 100^\circ$ . Предполагаемый образ вистлерного пояса показан на рис. 1 (по данным [7]). Представление о его пространственной структуре возникает благодаря тому, что орбита спутника с каждым новым витком смещается на запад и таким образом сканирует область, занятую излучением, в долготном направлении. На высотах 600...1000 км протяженность вистлерных поясов составляет порядка тысячи километров по широте и пять-десять тысяч километров по долготе. Вертикальное распределение излучения не может быть восстановлено по измерениям на одном спутнике, но тот факт, что вистлерные пояса часто наблюдались попарно на противоположных концах силовых линий геомагнитного поля, свидетельствует, что излучение распространяется вдоль  $L$ -оболочек через магнитосферу вплоть до магнитоспряженной ионосфере.

Сказанное не означает, что электромагнитное излучение поступает в ионосферу снизу или генерируется в нижней ионосфере над эпицентром землетрясения, а затем распространяется вдоль силовых линий магнитного поля вверх. Модовый состав вистлерных поясов более сложен и состоит из смеси волн, распространяющихся в различных направлениях. Некоторые данные свидетельствуют о том, что вистлерные пояса, возможно, связаны с волноведущими ионосферными неоднородностями (предполагается, что эти неоднородности, дакты, имеют

сейсмогенное происхождение), наполняемыми вистлерами естественного происхождения [9, 10].

По спектральному составу — это шипение. Спектр излучения очень широкий и без выраженных максимумов и минимумов охватывает область частот от сотен Гц до нескольких десятков КГц (УНЧ и ОНЧ диапазоны) с характерной плотностью излучения  $E_i \approx 10 \text{ мкВ}/(\text{м} \cdot \text{Гц}^{1/2})$ . Некоторые типичные виды спектров, измеренные различными спутниками, приведены в работах [7, 17, 21]. По имеющимся данным нельзя наверняка установить модовый состав шипений, но характер поляризации волн, содержащих как квазиэлектростатическую  $\delta E = -\nabla\varphi$ , так и вихревую составляющую электромагнитного поля  $\delta B$ , и сам вид частотных спектров, не имеющих особенностей в точках плазменных резонансов  $\omega_{pi}$ ,  $n\omega_{ci}$ , приводят нас к заключению, что шипения возникают в результате возбуждения вистлерной ветви плазменных волн (см. приложение).

Благодаря огромным размерам, вистлерные пояса регистрировались спутниками чаще, чем другие типы сейсмогенных эффектов в ионосфере. Именно вистлерные пояса были впервые описаны в работах [4, 6] в качестве предвестников землетрясений, а общее их число, наблюдавшееся в различных экспериментах, близко к сотне.

(ii) Альвеновские волны. В отличие от вистлерных поясов, этот тип излучения хорошо локализован в пространстве и, по сути, представляет собой колебания кусочка  $L$ -оболочки геомагнитного поля, опирающегося на эпицентральную зону землетрясения (точнее, на проекцию эпицентральной зоны на высоту  $h \approx 100$  км). По геомагнитной долготе данное возмущение охватывает сектор  $\delta\Lambda \approx 10^\circ$ , а по геомагнитной широте локализовано в чрезвычайно узких пределах  $\delta\Phi \approx 0.5\ldots1^\circ$ . При наблюдении на высотах 600—1000 км, область возмущения воспринимается как широкий, но тонкий слой, пересекаемый орбитой спутника. Толщина «листа» 40—100 км, а длина по магнитной параллели — около 1000 км. Столь четкая локализация и вполне однозначная сопряженность области, занятой излучением, с эпицентральным районом землетрясения делают МГД-возмущение весьма «выигрышным» типом предвестника землетрясения. Но локальность эффекта является препятствием для его обнаружения; в литературе описано около двух десятков спутниковых наблюдений подобного рода возмущений над землетрясениями.

С точки зрения спектрального состава данное излучение состоит из смеси волн (альвеновских и магнитозвуковых) с частотами от единиц до сотни Гц (КНЧ-диапазон). Спектр излучения резко обре-

зается снизу (по данным спутника «Интеркосмос-Болгария-1300»  $f_{\min} \approx 8$  Гц [7]), но не имеет четкой верхней границы, простираясь в УНЧ-область с монотонным уменьшением спектральной интенсивности (при переходе от 10 до 100 Гц — на два порядка); максимальные амплитуды МГД-возмущений, достигаемые на низкочастотном краю полосы излучения, составляют  $\delta B = 0.3...3$  нТл при  $f = 1...10$  Гц. По-видимому, с увеличением частоты расширяется диаграмма направленности излучения:  $\delta\Phi \approx 6^\circ$  при  $f \approx 500$  Гц [21]. Сказанное иллюстрирует коллекция спектров, приведенная на рис. 90, 91, 93 в монографии [7], и рис. 5 в [21].

(iii) Плазменные неоднородности. Прежде чем перейти к обзору спутниковых наблюдений, отметим, что вплоть до высот абсолютного максимума ионосферы  $h_{\max} = 250...300$  км плотность и макроскопические движения ионосферных слоев надежно отслеживаются методами вертикального зондирования ионосферы с поверхности Земли. В наземных наблюдениях накоплено множество данных о сейсмогенных возмущениях нижних слоев ионосферы, в первую очередь — вертикального распределения плазменной плотности  $n_p$ . Спутниковые наблюдения ( $h \gg h_{\max}$ ), как правило, не обнаруживают подобных возмущений  $n_p$  в верхних слоях ионосферы и магнитосфере. Возможно, из-за того, что зарождение плазменных неоднородностей происходит в нижних слоях ионосферы, а транспортировка неоднородностей вверх требует выполнения достаточно специфичных условий неустойчивости типа Рэлея—Тэйлора.

Вначале приведем данные об аномалиях нижней ионосферы ( $h < h_{\max}$ ), полученные методами ионосферного зондирования. Следуя общепринятому подходу, выделим качественную зависимость ионосферных возмущений от силы готовящегося землетрясения. В случае достаточно сильных землетрясений наблюдается:

- уплотнение слоя F<sub>2</sub> ионосферы  $+\delta n_p \approx n_p$  в широких «поясах», размеры которых достигают тысячи километров по широте и нескольких тысяч километров по долготе;
- ущербление событий внезапного и быстрого (в течение  $< 15$  мин) расплывания спорадических слоев E<sub>s</sub> (т. н. «отсечки»);
- возникновение перемещающихся ионосферных неоднородностей, связанных с распространением медленных (с периодом  $T \approx 2..3$  ч) МГД-волн [11];
- генерация мелкомасштабных плазменных неоднородностей и турбулентных движений слоев ионосферной плазмы (размер неоднородности —

десятка метров и более, возмущение плотности  $\delta n_p / n_p$  порядка нескольких процентов).

В случае достаточно слабых землетрясений проходит разогрев ионосферы, приводящий к перетеканию плазмы из области повышенного давления (с радиусом порядка нескольких сотен километров вокруг эпицентра) в соседние области. При этом, плотность слоя F<sub>2</sub> над эпицентром уменьшается:  $-\delta n_p \approx 0.2n_p$ .

Перечисленные эффекты регистрируются за один-трио суток до начала толчков. Понятия «сильного» ( $M > 5$ ) и «слабого» ( $M < 5$ ) землетрясения весьма произвольны, поскольку физически не только магнитуда землетрясения определяет ионосферный отклик.

Измерения на спутнике «Atmospheric Explorer-C» (AE-C), выведенным на чрезвычайно вытянутую орбиту с минимальной высотой 160 км и максимальной высотой 4300 км, обнаружили аномалии ионной плотности  $n_i$  и электронной температуры  $T_e$  ионосферной плазмы ниже и в области максимума слоя F<sub>2</sub>. Т. Гайворонская [2] разделяет зарегистрированные AE-C вариации  $n_i$ ,  $T_e$  накануне землетрясений на три типа:

- 1) разуплотнение слоя F<sub>2</sub> ( $-\delta n_i \approx 0.5n_i$  в области размером около 1000 км вдоль траектории спутника) при практически неизменной  $T_e$ ;
- 2) долгопериодные волновые возмущения  $n_i$ ,  $T_e$  — перемещающиеся ионосферные неоднородности;
- 3) слабые квазипериодические вариации  $n_i$ ,  $T_e$ , которые автор связывает с интерференцией ионнозвуковых волн.

Эти результаты вполне укладываются в схему возмущений нижней ионосферы, очерченную выше.

Анализ данных, полученных спутником AE-C в верхних слоях ионосферы и магнитосфере ( $h \gg h_{\max}$ ), не выявил каких-либо аномалий плазменных параметров. То же относится и к измерениям на других спутниках. Исключение, возможно, составляют данные ISIS-2, в одном или двух случаях обнаружившем разрежение магнитосферной плазмы в области, магнитосопряженной с эпицентром землетрясения. Наблюдавшаяся вариация плотности составляла  $-\delta n_p \approx 0.1n_p$  при размере плазменной каверны в несколько сотен километров вдоль траектории спутника. В работе [7] высказано предположение, что это — плазменный «пузырь» (plasma bubble), всплывающий из E-слоя ионосферы, но на наш взгляд, обсуждаемые экспериментальные данные недостаточны для обобщений.

Наконец, упомянем о дистанционных измерениях полного содержания электронов (ТЕС) в столбе

Таблица 1. Спутниковые наблюдения ионосферных предвестников землетрясений

КА	Год	h, км	Землетрясение: M, Δt	Отмеченные явления	Литературный источник
OGO-6 (NASA)	1969	400—1100	1) ЗТ не отождествлялось, 2) $M = 5.4$ , $\Delta t$ — часы	1) Электростатическое излучение $E = 10\ldots100 \text{ мкВ/м}$ , $f = 0.01\ldots3 \text{ кГц}$ . Поясная структура излучения: протяженность по долготе $\delta\Lambda \approx 100^\circ$ , широте $\delta\Phi \approx 10^\circ$ . 2) Локализованное магнитное возмущение на L-оболочке ЗТ ( $0.1\ldots1 \text{ кГц}$ )	[4, 18]
ISIS-2 (CNSA)	1979	круг. 1400	$M > 6$ , $\Delta t = 2\ldots6.5 \text{ ч}$	Уменьшение на 10 % плотности плазмы в области, магнитосопряженной с эпицентром ЗТ (разовое наблюдение)	[4, 7]
AE-C (NASA)	1973	140—4300	$M = 6$ , $\Delta t < 14 \text{ ч}$	Уменьшение $n_p$ на 20 % на высоте $h = 150 \text{ км}$ над эпицентриальным районом, квазиволновые возмущения $n_p$ , $T_e$	[2]
GEOS-1 (ESA)	1977	2050—38000	$M > 5$ , $\Delta t = 1\ldots2 \text{ ч}$	Электромагнитные шипения $f = 150\ldots1000 \text{ Гц}$	[25]
GEOS-2 (ESA)	1978	ГСО 36000	$M > 4$ , за 2 ч до и в момент ЗТ	Электромагнитное шипение $\delta B < 10^{-3} \text{ нТл}$ , $f = 0.15\ldots3 \text{ кГц}$ на L-оболочке ЗТ	[25, 26]
«Интеркосмос-19»	1979	600—1000	39 ЗТ с $M > 5$ , $\Delta t$ : десятки часов до и после ЗТ	Квазиэлектростатические эмиссии $E \approx 10 \text{ мкВ/(м}\cdot\text{Гц}^{1/2}$ , $f = 0.14\ldots15 \text{ кГц}$ . Поясная структура излучения над ЗТ. Протяженность поясов: 300—500 км по геомагнитной широте и 5000 км по геомагнитной долготе	[4, 6, 19]
«Интеркосмос-Болгария-1300»	1981	круг. 825	1) $M = 4.8$ , $\Delta t = 15 \text{ мин}$ , 2) $M = 3.4\ldots5.2$ , за 3 ч и в момент ЗТ	МГД-волны на L-оболочке, пересекающей эпицентр ЗТ: 1) $\delta B = 3 \text{ нТл}$ , $f = 1 \text{ Гц}$ . 2) $\delta B = 0.2\ldots0.4 \text{ нТл}$ , $f = 8 \text{ Гц}$ . 3) Вариации потоков протонов с энергией $> 100 \text{ МэВ}$	[7]
«Ореол-3»	1981	400—2000	1) $M > 5$ , $\Delta t$ — часы-десятки мин. 2) $M = 3.4$ , $\Delta t = -8 \text{ ч}, 0,+40 \text{ мин}$	1) Электромагнитное шипение $E \approx 0.1 \text{ мВ/(м}\cdot\text{Гц}^{1/2}$ , $\delta B \approx 0.4 \text{ нТл}/\text{Гц}^{1/2}$ , $f = 0.15\ldots15 \text{ кГц}$ . Поясная структура излучения: по геомагнитной долготе $\delta\Lambda \approx 100^\circ$ , широте $\delta\Phi \approx 10^\circ$ . 2) Перекрестное с «Интеркосмос-Болгария-1300» наблюдение МГД-волны на L-оболочке ЗТ $f = 10\ldots1000 \text{ Гц}$ , $\delta\Lambda \approx 120^\circ$ , $\delta\Lambda \approx 3^\circ$ . 3) Вариации скорости счета протонов с энергией $> 100 \text{ МэВ}$	[7, 19, 30]
«Метеор-3»	1985	1200	$M > 4$ , $\Delta t = 2.5\ldots3 \text{ ч}$	Вариации потоков энергичных частиц: электронов $E_e > 5 \text{ МэВ}$ и $E_e > 20 \text{ МэВ}$ и протонов $E_p > 90 \text{ МэВ}$ и $E_p > 400 \text{ МэВ}$	[3]
Станции «Салют-7» и «Мир»	1985—1987	—	$M > 4$ , $\Delta t = 2.5\ldots3 \text{ ч}$	Увеличение скорости счета высокоэнергичных частиц	[3]
«Космос-1809»	1988	круг. 970	$M > 4$ , $\Delta t$ — часы	МГД-волны на L-оболочке ЗТ: $\delta\Lambda \approx 120^\circ$ , $\delta\Phi \approx 3^\circ$ , $\delta B \approx 0.1 \text{ нТл}$ , $f = 140 \text{ Гц}$	[30]
DE-2 (NASA)	1982	300—1300	63 ЗТ с $M \geq 5$ , $\Delta t = -12, +6 \text{ ч}$	Эмиссии: 1) КНЧ: $E \approx 100 \text{ мкВ/(м}\cdot\text{Гц}^{1/2}$ , $f = 4\ldots12.8 \text{ Гц}$ , 2) ОНЧ: $E \approx 100 \text{ мкВ/(м}\cdot\text{Гц}^{1/2}$ , $f = 1\ldots10 \text{ кГц}$ . Вывод об отсутствии корреляции излучений и ЗТ	[17]
«Интеркосмос-24» «Активный»	1989	500—2500	28 ЗТ с $5.2 < M < 6.1$ , $\Delta t = -2, +2 \text{ сут}$ , макс за 12...24 ч до ЗТ	1) Электромагнитные шипения $E \approx 0.1\ldots1 \text{ мкВ/(м}\cdot\text{Гц}^{1/2}$ , $f = 10\ldots15 \text{ кГц}$ , в «поясах» $\delta\Lambda \approx 300^\circ$ , $\delta\Phi \approx 10^\circ$ и в магнитосопряженной ионосфере. 2) МГД-волны: $E_{\max} \approx 20 \text{ мкВ/(м}\cdot\text{Гц}^{1/2}$ при $f = 10 \text{ Гц}$ в поясах $\delta\Lambda \approx 50^\circ$ , $\delta\Phi \approx 6^\circ$	[21]

Обозначения: NASA — космическое агентство США, CNSA — канадское космическое агентство, ESA — европейское космическое агентство; h — высота орбиты спутника, M — магнитуда землетрясения (ЗТ), Δt — время регистрации предвестника до начала ЗТ (знак «минус» и «плюс» обозначают наблюдения до и после ЗТ соответственно), ГСО — геостационарная орбита

ионосфера под спутником:  $N_e = \int_{-\infty}^{h_s} n_e dh$ , где  $h_s$  — высота спутника. В работе [24] проанализированы вариации  $N_e$  по данным двухчастотного радиовысотомера спутника «Торех-Poseidon» за период с октября 1992 г. по март 1994 г. Поскольку измерения высот над сушей не поддаются интерпретации, было выделено 706 шельфовых землетрясений, из которых 238 демонстрируют возмущения ТЕС, т. е. 34 % событий. Контрольные измерения для витков без землетрясений дают возмущения в 16 % случаев — 85 событий из выбранных 540 витков. Кроме того, имеются данные [22] об аномальном понижении ТЕС над эпицентром турецкого землетрясения 17 августа 1999 г. (с  $M = 7.4$ , глубина очага  $D = 17$  км). Эти последние измерения были выполнены с помощью наземного GPS-приемника.

(iv) Вариации потоков энергичных частиц. Регистрируются небольшие, но статистически достоверные, увеличения скорости счета энергичных частиц, высыпающихся из внутреннего радиационного пояса: электронов с энергиями порядка 100 КэВ и более и протонов с энергиями порядка 100 МэВ. Область локализации событий слабая и формой и размерами подобна области генерации УНЧ-ОНЧ-шипений (вистлерным поясам) [3]. Вероятно, что процессы генерации шипений и высыпания частиц из радиационных поясов физически взаимосвязаны, поскольку, как известно, именно рассеянием на вистлерах определяется питч-угловая диффузия захваченных в магнитосфере частиц и их выведение в конус потерь. Если это так, то предвестник (iv) не имеет самостоятельного значения и возникает как вторичный эффект предвестника (i).

Использованная при написании данного раздела фактическая информация просуммирована в табл. 1.

### 3. ПОПЫТКИ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА И ВЕРИФИКАЦИИ ДАННЫХ

Статистическому анализу связи между сейсмическими и ионосферными событиями посвящены около десятка работ ([6, 8, 14, 17, 19–21, 25] и др.), почти все они были проанализированы в обзоре [24]. В большинстве этих работ рассматривается только один тип ионосферного предвестника землетрясений — ОНЧ-шипения («вистлерные пояса»).

Вистлерные пояса были описаны выше как весьма крупномасштабные структуры, благодаря чему они и регистрировались спутниками чаще, чем

другие предвестники. Представим себе один такой пояс: при наблюдении со спутника — овальное пятно с размером порядка 1000 км×10 000 км, заполненное излучением. В течение времени жизни пояса (сутки) под ним и рядом с ним происходит много слабых землетрясений и зачастую несколько сильных. Возникает вопрос: предвестником какого из них является данный пояс?

На этот вопрос нельзя ответить обоснованно до тех пор, пока не известны причинно-следственные связи. Но во всяком случае можно констатировать, что далеко не каждое происходящее на Земле землетрясение сопровождается появлением в ионосфере вистлерного пояса. Соотнося вистлерные пояса и землетрясения, мы сталкиваемся с необходимостью отсеять «лишние» землетрясения. В этом пункте большинство авторов исходит на следующих, интуитивно правдоподобных, критериев: ионосферные шипения связываются с достаточно сильными землетрясениями (с магнитудой  $M \geq 5$ ), которые, кроме того, должны быть мелкофокусными (глубина очага менее 100 км) и происходить на суше или шельфе. Этого недостаточно, и дальнейшее рассмотрение показывает, что число вистлерных поясов вокруг Земли во многих случаях меньше, чем «подходящих» землетрясений. Рассмотрим, в качестве примера, информацию о землетрясениях (табл. 2), происходивших в течение времени жизни двух вистлерных поясов, зарегистрированных спутником «Интеркосмос-19» [28, 29]. Один случай относится к поясу, наблюдавшемуся 23.11.80. Как видно из нижней части табл. 2, в этот период времени произошло только одно, сильно выделяющееся среди других, землетрясение, которое, полагают авторы, и вызывало эффект в ионосфере. Другой случай относится к событию 29.03.79. В этом случае, кроме землетрясения, над которым наблюдался вистлерный пояс, произошло еще не-

Таблица 2. Землетрясения, могущие быть источниками ОНЧ-эмиссий. Курсивом выделены события, с которыми авторами отождествлялся ионосферный предвестник;  $\varphi, \lambda$  — географические координаты эпицентра

Дата	UT	$\varphi$ , град	$\lambda$ , град	D, км	M	Район
29.03.79	02.01.33	42.00	83.41	33	5.9	Тянь-Шань
29.03.79	07.07.22	32.15	96.96	33	5.8	Тибет
30.03.79	13.46.09	-7.83	131.04	33	5.2	Новая Гвинея
30.03.79	16.20.19	-5.39	151.68	69	5.4	Новая Гвинея
21.11.80	14.56.13	51.80	-176.14	53	6.0	Алеутские острова
22.11.80	18.02.33	-3.66	140.04	77	5.5	Новая Гвинея
23.11.80	18.34.53	40.91	15.37	10	7.2	Италия
24.11.80	04.22.14	-37.99	177.86	33	5.2	Новая Зеландия
24.11.80	09.33.05	-22.74	-113.48	10	5.4	Австралия

сколько примерно таких же землетрясений, ионосферные предвестники которых, однако, не наблюдались. Можно найти много случаев, подобных как первому, так и второму примеру.

По-видимому, эти данные свидетельствуют о том, что разные типы землетрясений могут иметь разные типы предвестников или могут не иметь предвестников вообще. Поэтому, не предполагая наличия причинно-следственной связи между вистлерными поясами в ионосфере и землетрясениями, необходимо проанализировать, как и при каких условиях эти события коррелируют между собой. Такой анализ проводился двумя авторскими коллективами — Т. Хендерсоном и др. [17] и О. Молчановым и др. [21], — выразившими соответственно «пессимистическую» и «оптимистическую» точки зрения.

**«Пессимистическая оценка.** В работе [17] производилась обработка данных спутника DE-2 на «сейсмоактивных» и контрольных орбитах. Сегменты орбит, ассоциированные с землетрясениями, выбирались по следующим признакам: 1) орбиты пересекали широту эпицентра землетрясения, по долготе были удалены от эпицентра не более чем на  $\pm 20^\circ$  и попадали во временной интервал  $\Delta t$  от  $-12$  до  $+6$  ч по отношению к моменту землетрясения; 2) выбирались землетрясения  $M \geq 5$  на суше; 3) широта эпицентра менее  $45^\circ$ , так как высокосиротные измерения зашумлены; 4) отбирались события, произошедшие при малой солнечной активности  $K_p \leq 3+$ ; 5) выбирался режим высокой чувствительности приемника. Сегменты контрольных орбит выбирались так. При выполнении условий 3)—5) требовалось также совпадение по широте  $\pm 10^\circ$  и по времени  $\pm 2$  ч с сегментами сейсмоактивных орбит. Но самое важное условие для контрольных орбит — это отсутствие эпицентров сильных землетрясений ( $M \geq 4.5$ ) в следующих пределах:  $\Delta t$  от  $-12$  до  $+6$  ч по времени,  $\pm 10^\circ$  по широте и  $\pm 20^\circ$  по долготе. В итоге было выбрано 58 сейсмоактивных орбит с 63 сегментами и 45 контрольных орбит с 61 сегментом, при этом длительность сегмента составляла около 4 мин ( $15^\circ$  по широте).

Сравнение сигналов, полученных по сейсмоактивным и контрольным орбитам, показало, что никакие из сейсмоактивных орбит не проявляют необычных эмиссий по сравнению с контрольными. В [17] приводятся примеры сейсмоактивных орбит с эмиссией и без эмиссии, а также контрольных орбит с эмиссией и без нее. Оказалось, что 63 % сейсмоактивных и 62 % контрольных орбит проявляют эмиссию. Те же статистические данные имели место и при замене географической широты на магнитную.

**«Оптимистическая оценка.** Представленные выше результаты не доказывают независимости ионосферных и сейсмических событий. Все дело в выборе окна, с помощью которого ионосферное возмущение «привязывается» к землетрясению во времени и по координатной сетке. Так, ионосферные эмиссии могут сопровождать землетрясения в течении промежутка времени, большего, чем  $\pm 12$  ч от главного толчка. Если так, то становится понятным полученное авторами [17] малое отличие сейсмоактивных и контрольных орбит — эти орбиты соответствовали одному явлению! Данные спутника «Интеркосмос-24» обрабатывались группой исследователей, оптимистически относящихся к статистической достоверности ионосферных предвестников [8, 9, 10, 21]. Их исходные предположения были следующие. Разность геомагнитных координат области наблюдения и эпицентра (окно) составляет по широте  $\Delta\Phi \geq \pm 10^\circ$ , по долготе  $\Delta\Lambda \geq \pm 120^\circ$ . Кроме того, спектр излучения, связанного с землетрясениями, отличается от природных эмиссий. Данные наблюдений выбирались для землетрясений  $M \geq 5.2$  во временном интервале  $\pm 48$  ч. Геомагнитная широта определялась в предположении, что излучение от эпицентра землетрясения до высоты 300 км идет вертикально вверх, а далее канализируется геомагнитным полем.

Измерения показали, что, кроме возможных предвестников, заведомо наблюдаются и эмиссии явно магнитосферного происхождения. Поэтому была осуществлена определенная селекция принимаемых сигналов, которая позволила отсечь вистлеры и сферики магнитосферного происхождения. В результате анализировались данные, привязанные к 28 сильным толчкам, из которых 15 сопровождались ионосферными эмиссиями в интервале широт  $\Delta\Phi = \pm 10^\circ$ . Вероятность появления эмиссии оценивалась как отношение числа интервалов, где эмиссия наблюдалась, к общему числу интервалов, попадающих в данный временной промежуток. Максимум вероятности (60 %) приходился на временной промежуток 6...24 ч до момента главного толчка, как раз на тот период (ранее 12 ч), который отбраковывался в работе [17].

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как видно из настоящего обзора и многих других публикаций, общее количество которых близко к полутысячи, проблема ионосферных предвестников землетрясений очень популярна. Актуальность этих исследований обусловлена несколькими причинами: первая, очень немаловажная и часто име-

ющая «политический» оттенок — поиск новых возможностей для предсказания землетрясений. Однако на данном этапе лучше было бы отказаться от обещаний практической пользы и сконцентрироваться на самом предмете исследований. Вторая причина — необходимость изучения механизмов литосферно-ионосферной связи. Несмотря на обилие гипотез о физических механизмах такой связи, отдать предпочтение какой-либо невозможна. Очевидно, что в этом повинны не авторы работ, а скучность информации об ионосферных событиях, связанных с землетрясениями, с одной стороны, и многообразие и сложность ионосферных и магнитосферных процессов безотносительно их связи с процессами в литосфере и нижней атмосфере, с другой стороны.

Большинство публикаций, в которых сообщается о единичных фактах регистрации со спутников возмущений ионосферы (чаще всего одного-единственного параметра), хотя и представляют ценность сами по себе, мало проясняют сложившуюся ситуацию. Как правило, в таких работах не сообщается о других землетрясениях, произошедших в тот же период, имевших примерно такую же магнитуду, но не вызвавших в ионосфере эффект, регистрируемый спутником. А ведь важно знать причину: то ли научная аппаратура не работала, то ли помехи замаскировали сигнал, то ли не было сигнала. Чаще всего слабо аргументируется и само сейсмогенное происхождение ионосферного события. Причинно-следственные связи неизвестны, и кто кроме самого исследователя, может оценить, насколько случайно или неслучайно совпали во времени и пространстве два события — землетрясение и возмущение ионосферы? Именно такие сообщения о единичных фактах наблюдений ионосферных предвестников и создают впечатление о том, что проблема ионосферных предвестников решена, и пора переходить к практическому использованию научных исследований [1, 5].

В действительности недостаток экспериментальных данных и слабая их систематизация не позволяют составить четкую характеристику происходящего в ионосфере явления. Мы полагаем, что на существующем экспериментальном материале решить эту проблему невозможно, однако для успеха будущих исследований, особенно для постановки новых спутниковых экспериментов, необходимо знать, что уже известно об ионосферных предвестниках и что нужно выяснить в первую очередь. Попытка составить «портреты» возникающих в ионосфере явлений и была предпринята в настоящей работе. Эти портреты — предполагаемые; их

следует рассматривать как рабочую гипотезу, вытекающую из имеющихся данных и подлежащую дальнейшей проверке.

В отличие от сообщений о единичных наблюдениях ионосферных предвестников землетрясений, намного спокойнее и скромнее звучат выводы авторов, использовавших статистический подход к анализу проблемы. Авторы этих работ использовали интуитивно установленные рамки для выделения ионосферных и сейсмических событий: минимальное значение магнитуды землетрясения, допустимый уровень геомагнитной активности, максимальное значение глубины очага, его широты, расположение на материке или шельфе вблизи берега и т. п. Весьма произвольным и поэтому спорным выглядит выбор «окна» для селекции ионосферных эффектов: максимальные разности широт, долгот (часто в геомагнитных координатах) и времени сопоставляемых событий. Но несмотря на заметные различия в подходе, в рамках одной работы критерии не меняются, что дает основания считать полученные результаты корректными в рамках указанного подхода. Как правило, результаты таких исследований обнаруживают небольшое превышение вероятности появления того или иного ионосферного возмущения над очагом землетрясения по сравнению с контрольными измерениями. Это превышение обычно составляет несколько процентов, и его достоверность близка к нулю. На таком фоне резко выделяются работы группы авторов из ИЗМИРАН по данным спутника «Интеркосмос-19». В некоторых публикациях [6] они утверждают о 90 %-м совпадении ионосферных возмущений (ОНЧ-эмиссий) с землетрясениями. Возможно, авторам удалось найти оптимальный подход к селекции событий или же ОНЧ-приемники «Интеркосмос-19» были существенно чувствительнее, чем приборы спутника DE-2. При сравнении чувствительности приборов необходимо учитывать и уровень электромагнитных помех самого аппарата для данного диапазона частот, что сделать постфактум очень трудно. Несомненно, полезным мог бы быть обмен данными «Интеркосмос-19» и DE-2 и их обработка в рамках разных подходов.

Последний вывод, который мы вынуждены повторить вслед за авторами предыдущих обзоров, — для верификации основных представлений об ионосферных предвестниках землетрясений необходим целенаправленный спутниковый проект. Такой проект был бы полезен и с точки зрения изучения возмущений среднеширотной ионосферы, возникающих под действием иных факторов, не только сейсмических.

## ПРИЛОЖЕНИЕ.

## МОДОВЫЙ СОСТАВ ИОНОСФЕРНЫХ ЭМИССИЙ

На «спутниковых» высотах  $h = 600\ldots1000$  км и выше характерный масштаб изменения плотности ионосферной плазмы составляет более сотни километров по вертикали, а масштаб неоднородности геомагнитного поля превышает тысячу километров. В интересующей нас области частот от десятков Гц до десятков КГц ионосферные эмиссии имеют гораздо меньшие длины волн, что позволяет рассматривать ионосферную плазму как локально однородную (оценка длины плазменной волны с минимальной частотой  $f \approx 10$  Гц дает  $\lambda = V_A/f \approx 30\ldots70$  км, где альвеновская скорость  $V_A = 300\ldots700$  км/с). Дисперсионная картинка волн однородной плазмы приведена на рис. 2 [13]. Численные значения плазменных частот верхней среднеширотной ионосферы указаны в табл. 3, 4 (по [12]). Высокочастотным типам ионосферных эмиссий на рис. 2 соответствуют моды 1, 2, 3, а также не показанные на этом рисунке электронные моды Бернстейна. Волнам КНЧ-ОНЧ-диапазонов соответствует вистлерная мода 4, охватывающая область частот  $0 < \omega < \omega_{wh}^\infty$ . Максимальная частота вистлеров  $\omega_{wh}^\infty$  лежит в промежутке между нижнегибридной  $\omega_{lh}$  и электронной циклотронной частотами:  $\omega_{wh}^\infty = \omega_{lh} \equiv$

$\equiv \omega_\pi / \sqrt{1 + (\omega_{pe}/\omega_{ce})^2}$  при  $\theta = \pi/2$  и  $\omega_{wh}^\infty = \omega_{ce}$  при  $\theta = 0$  (где  $\theta$  — направление распространения волны по отношению к геомагнитному полю,  $\omega_{pe, pi}$  — электронная и ионная ленгмюровская частота,  $\omega_{ce, ci}$  — электронная и ионная циклотронная частота). Отметим, что отдельным кусочкам ветви 4 соответствуют: магнитный звук —  $0 < \omega < \omega_{ci}$ , собственно вистлер (или свист) —  $\omega_{lh} \ll \omega \ll \omega_{wh}^\infty$ , электростатический вистлер —  $\omega \approx \omega_{wh}^\infty$ . Последний является квазипродольной плазменной модой  $\delta E \approx -\nabla\varphi$ ,  $\delta B \rightarrow 0$ , предыдущие две моды — поперечные (электромагнитные).

На правой части рис. 2 показаны ионные дисперсионные ветви: кривые 5 и 5' — две ветви ионно-звуковых волн  $0 < \omega < \omega_{ci} \cos \theta$  и  $\omega_{ci} < \omega < \omega_\pi$  (квазипродольные моды); кривая 6 — альвеновская волна  $0 < \omega < \omega_{ci}$  (имеющая поперечную поляризацию); линии 7 — квазипродольные ионные моды Бернстейна  $\omega \approx n\omega_{ci}$ , существующие при  $\theta \approx \pi/2$ .

Рассматриваемым в данной работе эмиссиям КНЧ-УНЧ-диапазонов ( $\omega < \omega_{ci}$ ) соответствуют, очевидно, магнитогидродинамические типы плазменных мод: магнитозвуковая и альвеновская. ОНЧ-шипения ( $\omega_{ci} < \omega < \omega_{ce}$ ) охватывают область сразу нескольких мод: ионных мод Бернстейна, ионного звука, вистлеров. Но исходя из характера поляризации наблюдавшихся на эксперименте шипений (в одних случаях почти электростатических  $\delta B \rightarrow 0$ , в других — содержащих также и вихревую составляющую электромагнитного поля), а также учитывая однородную структуру их частотных спектров (не имеющих особенностей в точках плазменных резонансов  $\omega_\pi$ ,  $n\omega_{ci}$ ) мы приходим к заключению, что ОНЧ шипения возникают в результате возбуждения широкого участка вистлерной моды 4.

Таблица 3. Характерные плазменные частоты слоя F<sub>2</sub> среднеширотной ионосферы (высоты 600—1000 км)

Ионно-цикло-тронная	Нижне-гибридная	Ионная ленгмюровская	Электронно-циклотронная	Ленгмюровская
$f_{ci} \approx$ $\approx 1$ КГц	$f_{lh} \approx$ $\approx 40$ КГц	$f_\pi \approx$ $\approx 200$ КГц	$f_{ce} \approx$ $\approx 1.6$ МГц	$f_{pe} \approx$ $\approx 10$ МГц

Таблица 4. Шкала частот радиоволн. Как вариант, УНЧ-диапазон может быть объединен с КНЧ-диапазоном. Расстановка плазменных мод дана для параметров верхней среднеширотной ионосферы: 1, 2, 3 — быстрые электромагнитные и медленная необыкновенная волны, 4 — вистлер, 5 — ионный звук, 6 — альвеновская волна, 7 — ионные моды Бернстейна

Обозначение	Диапазон	Мода
Крайне низкие частоты (КНЧ)	3—300 Гц	4, 6
Ультразвуковые частоты (УНЧ)	0.3—3 КГц	4, 5, 6, 7
Очень низкие частоты (ОНЧ)	3—30 КГц	4, 5
Низкие частоты (НЧ)	30—300 КГц	4
Средние частоты	0.3—3 МГц	4, 8
Высокие частоты	3—30 МГц	1, 2, 3, 8
Очень высокие частоты	30—300 МГц	

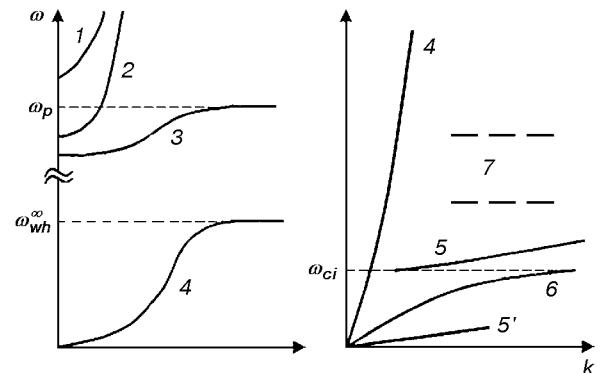


Рис. 2. Моды однородной замагниченной плазмы: 1 — быстрая необыкновенная, 2 — обыкновенная, 3 — медленная необыкновенная волны, 4 — вистлер, 5 — ионный звук, 6 — альвеновская волна, 7 — ионные моды Бернстейна

Работа была поддержанна грантом INTAS-CNES N 97-1769.

1. Бучаченко Ф. Л., Ораевский В. Н., Похотовов О. А. и др. Ионосферные предвестники землетрясений // Успехи физ. наук.—1996.—166, вып. 9.—С. 1023—1029.
2. Гайворонская Т. В. Некоторые ионосферные предвестники готовящихся землетрясений // Физика земли.—1996.—В. 9, № 9.—С. 38—42.
3. Гальпер А. М., Дмитренко В. В., Никитин Н. В. и др. Взаимосвязь потоков энергичных частиц в радиационном поясе с сейсмической активностью Земли // Космич. исследования.—1989.—27, вып. 5.—С. 709—712.
4. Гохберг М. Б., Пилипенко В. А., Похотовов О. А. Наблюдения со спутника электромагнитного излучения над эпицентralной областью готовящегося землетрясения // Докл. АН СССР.—1983.—268, № 1.—С. 56—58.
5. Ларкина В. Радионаблюдения с ИСЗ за предвестниками землетрясений // Радио.—1999.—№ 1.—С. 55—56.
6. Ларкина В. И., Наливайко А. В., Гершензон Н. И. и др. Наблюдения на спутнике «Интеркосмос-19» ОНЧ-излучений, связанных с сейсмической активностью // Геомагнетизм и аэрономия.—1983.—23, № 5.—С. 842—846.
7. Липеровский В. А., Похотовов О. А., Шалимов С. Л. Ионосферные предвестники землетрясений. — М.: Наука, 1992.—304 с.
8. Лихтер Я. И., Ларкина В. И., Гдалевич Г. Л. Вероятностные характеристики флуктуаций взаимно перпендикулярных электрических и магнитных компонент поля КНЧ-ОНЧ излучений // Геомагнетизм и аэрономия.—1991.—31, вып. 1.—С. 181—183.
9. Михайлова Г. А., Голявин А. М., Михайлов Ю. М. Динамические спектры ОНЧ-излучений во внешней ионосфере, связанные с Иранским землетрясением 21.06.1990 (ИСЗ «Интеркосмос-24») // Геомагнетизм и аэрономия.—1991.—31, вып. 5.—С. 801—807.
10. Михайлов Ю. М., Михайлова Г. А., Капустина О. В. Тонкая структура спектров сигналов ОНЧ-передатчиков над зоной Иранского землетрясения 1990 г. (ИСЗ «Интеркосмос-24») // Геомагнетизм и аэрономия.—1997.—37, вып. 5.—С. 1003—1007.
11. Сорокин В. М., Федорович Г. В. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. — М.: Энергоатомиздат, 1982.—136 с.
12. Фаткуллин М. Н., Зеленова Т. И. и др. Эмпирические модели среднеширотной ионосферы. — М.: Наука, 1981.—256 с.
13. Электродинамика плазмы / Под. ред. А. И. Ахиезера. — М.: Наука, 1974.—720 с.
14. Afonin V. V., Molchanov O. A., Kodama T., et al. Statistical study of ionospheric plasma response to seismic activity: search for reliable result from satellite observations. — Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes / Ed. M. Hayakawa, TERRAPUB, Tokyo, 1999.—P. 597—617.
15. Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes / Ed. M. Hayakawa, TERRAPUB, Tokyo, 1999.—996 p.
16. Electromagnetic Phenomena related to Earthquake Prediction / Ed. M. Hayakawa, Y. Fujinawa, TERRAPUB, Tokyo, 1994.—677 p.
17. Henderson T. R., Sonwalkar V. S., Helliwell R. A., et al. A search for ELF/VLF emissions induced by earthquakes as observed in the ionosphere by the DE-2 satellite // J. Geophys. Res.—1993.—98, N A6.—P. 9503—9514.
18. Holtet J. A., Maynard N. C., Heppner J. P. Variational electric fields at low altitudes and their relation to spread F and plasma irregularities // J. Atmos. and Terr. Phys.—1977.—39, N 3.—P. 247—262.
19. Larkina V. I., Migulin V. V., Molchanov O. A., et al. Some statistical results on very low frequency radiowave emissions in upper ionosphere over earthquake zones // Phys. Earth. Planet. Inter.—1989.—57, N 1/2.—P. 100—109.
20. Mattews J. P., Lebreton J. P. A search for Seismic Related Wave Activity in the Micropulsation and ULF Frequency Ranges Using GEOS Data // Ann. Geophys.—1985.—3, N 6.—P. 749—754.
21. Molchanov O. A., Mazhaeva O. A., Goliavin A. N., Hayakawa M. Observation by the Intercosmos-24 satellite of ELF-VLF electromagnetic emissions associated with earthquakes // Ann. Geophys.—1993.—11.—P. 431—440.
22. Oraevsky V. N., Ruzhin Yu. Ya., Shagimuratov I. I. Comparison of Ionosphere TEC above the Turkey during Solar Eclipse action and before two Strong Earthquakes at 1999 // Abstracts of the Tenth International Symposium on Equatorial Aeronomy, May 17—23, 2000, Antalya, Turkey, p. 34—38.
23. Parrot M. Electromagnetic noise due to earthquakes // Handbook of Atmospheric Electrodynamics, VII, CRS Press, 1995, Chapter 4.—P. 95—116.
24. Parrot M. Statistical Studies with Satellite Observations of Seismogenic Effects, in Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes, Ed. M. Hayakawa, TERRAPUB, Tokyo, 1999.—P. 685—695.
25. Parrot M., Lefevre F. Correlation between GEOS ULF emission and earthquakes // Ann. Geophys.—1985.—3, N 6.—P. 737—748.
26. Parrot M., Mogilevsky M. VLF-emission associated with earthquakes and observed in the ionosphere and magnetosphere // Phys. Earth and Planet. Inter.—1989.—57, N 1/2.—P. 86—99.
27. Ruzhin Yu. Ya., Depueva A. Kh. Seismoprecursors in space as plasma and wave anomalies // J. Atmospheric Electricity.—1996.—16, N 3.—P. 271—288.
28. Ruzhin Yu. Ya., Larkina V. I., Depueva A. Kh. Magnetic conjunction of appearance regions of the seismo-ionospheric precursors // Intern. Workshop on Seismo-Electromagnetics, 3—5 March 1997, Tokyo, Abstracts.—P. 198—201.
29. Ruzhin Yu. Ya., Larkina V. I. Magnetic conjunction and time coherency of seismo-ionosphere VLF bursts and energetic particles // Proc. 13th Wroclaw EMC Symposium (URSI), 1996.—P. 645—648.
30. Serebryakova O. N., Bilichenko S. V., Chmyrev V. M., et al. Electromagnetic ELF radiation from earthquake regions as observed by low-altitude satellites // Geophys. Res. Lett.—1992.—19, N 1.—P. 91—94.

## SATELLITE OBSERVATIONS OF IONOSPHERIC EARTHQUAKE PRECURSORS

V. V. Grimal'skij, V. N. Ivchenko, and G. V. Lizunov

We review satellite observations of seismogenic phenomena in the ionosphere. Based on literature data, hypothetical patterns of seismogenic phenomena were reconstructed. We discuss the reasons which allow the ionospheric «anomalies» to be correlated with earthquake precursors.

УДК. 551.46.+581.19

**Оценка влияния разломных структур  
на распределение радионуклидов  
в донных отложениях  
с использованием космических снимков**

**В. И. Лялько<sup>1</sup>, Л. А. Сиренко<sup>2</sup>, А. Д. Федоровский<sup>1</sup>,  
А. Я. Ходоровский<sup>1</sup>, В. М. Шестопалов<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

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

<sup>3</sup>Інститут геологічних наук НАН України, Київ

*Надійшла до редакції 17.02.00*

Викладені результати досліджень впливу розломно-блокових структур на розподіл радіонуклідів у донних відкладах Київського водосховища, які виконані на основі аналізу космічних знімків та топографічних карт рельєфу дна. Показано, що викладені методичні прийоми вивчення тектонічних структур можна використати для аналізу накопичення та перерозподілу радіонуклідів у донних відкладах водосховищ дніпровського каскаду та інших водних об'єктів.

Анализ имеющейся информации показал, что в донных отложениях Киевского водохранилища и его основных притоках накапливается значительное количество радионуклидов (РН), тяжелых металлов и органических веществ [2, 4—8, 10, 11]. Существенную гетерогенность распределения РН в донных отложениях водохранилищ днепровского каскада после аварии на ЧАЭС объясняли различными причинами: неравномерностью загрязнений радионуклидами в результате поверхностного стока с площади водосбора, попаданием вод притоков, пятнистостью распределения атмосферных осадков, различиями в сорбционных свойствах компонентов донных отложений — песка, глин, илов, гидродинамикой водных масс, интенсивностью зарастания участков литорали высшими водными растениями, различиями в коэффициентах накопления РН гидробионтами и другими факторами. Не отрицая значимости каждого из названных выше факторов

в формировании качественных и количественных различий в распределении РН, мы обращаем внимание на роль в этих процессах геологических особенностей территорий затопления, и прежде всего разломно-блочных структур, которые выявляются на этой территории в процессе дешифрирования космических снимков.

С рельефом дна водных объектов тесно связано передвижение водных масс, что играет важную роль в накоплении и перераспределении осадков. Изучение проявившихся в современном рельефе разломов, а также ограниченных ими блоков земной коры, несомненно, поможет понять особенности латеральной миграции донных отложений. Известно также, что разломы часто являются зонами повышенной вертикальной проницаемости горных пород для поверхностных и подземных вод. Как было установлено [3], в Чернобыльской зоне проницаемость пород в зонах разломов на порядок и

более превосходит проницаемость ненарушенных пород. Естественно, что в пределах участков зон разломов, расположенных на дне водоемов, миграция происходит еще интенсивнее, чем по аналогичным структурам на суше, так как здесь циркуляция вод постоянна.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании на основе анализа космических снимков и топокарт рельефа дна влияния разломно-блочных структур на латеральную и вертикальную миграцию РН загрязнений в пределах территории Киевского водохранилища.

Анализ известной нам литературы свидетельствует, что разломные структуры дна водохранилищ с этой целью ранее не рассматривались, поскольку находящаяся под водой земная поверхность не может быть изучена только традиционными геологическими и геофизическими методами. Здесь целесообразно использовать комплексные методы исследований. Многолетний опыт изучения различных природных явлений на основе дистанционного зондирования Земли с искусственных спутников с заверкой результатов наземными измерениями показал высокую эффективность таких подходов для решения различных природоведческих задач, в том числе и для геологических исследований [9].

В основу наших исследований были положены материалы структурного дешифрирования разновременных космических снимков высокого пространственного разрешения, результаты анализа морфологии рельефа по топокартам разных лет, материалы наземных геофизических исследований прилегающих участков суши, а также данные гидробиологических, гидроэкологических, радиоэкологических исследований Киевского водохранилища и р. Припять [2, 4–8, 10, 11].

При анализе закономерностей латеральной миграции РН в донных отложениях по космическим снимкам были уточнены разрывные структуры района Киевского водохранилища и р. Припять и выделены тектонические блоки, проявившиеся в современном рельефе, которые могли оказать влияние на размещение осадков.

Выделение разрывных структур проведено путем структурного дешифрирования космических снимков с использованием аналогового и индикационного приемов в пределах прилегающей к водохранилищу суши и контрастно-аналогового в пределах акватории водохранилища. Учитывая сравнительно небольшую ширину последнего, выделенные по берегам тектонические структуры достаточно уверенно можно было экстраполировать в пределы акватории.

Для выделения блоков прежде всего проводился

анализ гипсометрических отметок и особенностей морфологии рельефа как суши, так и дна водоемов с использованием детальных топокарт различных лет. Кроме разломов и блоков, выделялись еще кольцевые структуры и узлы пересечения разломов, т. е. все структуры, которые влияют на вертикальную проницаемость горных пород и фильтрацию подземных вод. Основное внимание уделялось выделению блоков и определению их роли в распределении загрязнений, которое основывалось на сравнительном анализе представленных в литературе данных о распределении РН в осадках в пределах различных участков дна Киевского водохранилища [2, 9, 10, 11].

Анализ результатов дешифрирования интегральных и многозональных космических снимков высокого пространственного разрешения, сделанных в разные годы со спутников «Космос», «Ресурс», SPOT и Landsat в комплексе с материалами геолого-геофизических исследований, показал, что на современном этапе геологического развития определяющую роль в геологической структуре района размещения Киевского водохранилища играют разноориентированные разрывные нарушения, которые обусловили разломно-блочное строение территории. На рисунке показано взаимное пространст-

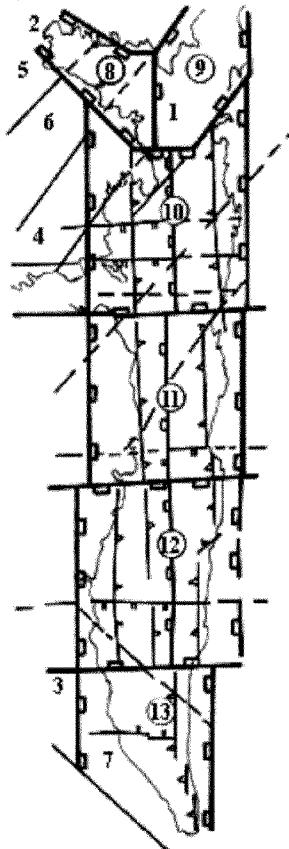


Схема тектонических структур Киевского водохранилища, построенная на основе дешифрирования космических снимков

венное расположение блоков разных порядков и соотношение между отметками поверхности дна в их пределах. Знаки на границах блоков всегда направлены в сторону уменьшения отметок рельефа. Кроме разломов, в этом районе установлены кольцевые структуры и узлы пересечения разломов. Выделенные разломы по характеру пространственной ориентировки могут быть сгруппированы в четыре основные системы: субмеридиональные, субширотные, северо-западные и северо-восточные.

Наиболее крупной структурой в районе Киевского водохранилища является субмеридиональная зона нарушений. Она лежит непосредственно на продолжении известной Одесско-Тальновской зоны разломов (рисунок — 1), которая оказала влияние на строение Украинского щита, начиная с архея. По зоне были развиты метасамотические процессы и встречаются тела даек разного состава. Судя по мелкомасштабным космическим снимкам, это нарушение прослеживается от Белого до Черного моря [1]. В пределах исследуемого района и далее на север к 30 км зоне ЧАЭС приурочен субмеридиональный отрезок долины р. Днепр, занятый сейчас Киевским водохранилищем. На мелкомасштабных космических снимках зона отчетливо дешифрируется как достаточно широкая, с нечеткими границами. Параллельно нарушению, совпадающему с долиной р. Днепр, в пределах суши прослеживается еще несколько нарушений, наиболее крупное из которых — Брусиловский разлом, проходящий через район Чернобыльской АЭС. Отдельные разломы, слагающие Одеско-Тальновскую зону нарушений и другие субмеридиональные структуры, относительно равномерно распределены в пределах более крупных структур и обычно имеют небольшую протяженность. В современном рельефе им чаще всего отвечают долины рек, балки, понижения рельефа. В пределах дна Киевского водохранилища, особенно в его северной половине, к субмеридиональным нарушениям приурочены линейные уступы и узкие понижения, участки аномальных глубин дна, что можно отчетливо видеть на лоцманской карте водохранилища. Судя по морфологии, выраженности в рельефе, а также характеру общих закономерностей ориентировки современных тектонических напряжений, субмеридиональные структуры могут быть отнесены к структурам растяжения, которые отличаются максимальными значениями трещинной проницаемости пород.

Субширотные нарушения широко развиты на всей описываемой площади. По данным анализа обзорных космических материалов, север территории расположен в пределах крупного субширотного глубинного разлома, доходящего до Атлантического

побережья на западе и простирающегося далеко на восток. В состав этой структуры входит известная Северо-Украинская горсто-грабеновая зона, захватывающая северную часть Киевского водохранилища. Эта зона прошла длительный путь развития и имеет сложное строение. В ее пределах выделяется серия блоков с разной высотой залегания поверхности фундамента (от +320 до -70 м) и дневной поверхности (от 150 до 320 м). Зафиксированы вертикальные перемещения пород, начиная с рифея, когда сформировались грабены, выполненные полесскими песчаниками. Вероятно, в палеозое грабены превратились в горсты. Интенсивные перемещения пород по зоне происходили на протяжении всего фанерозоя, включая неотектонический и современный этапы развития [3]. Параллельно региональной горстовой зоне прослеживается еще несколько более мелких нарушений, расположенных у северной границы водохранилища, в районе Тетеревского залива, поселков Толокунь и Лебедевка.

Судя по космическим изображениям, отдельные нарушения, слагающие горстовую зону и другие субширотные структуры, отличаются значительной протяженностью, относительно равномерным характером распределения по площади, что существенно затрудняет выделение границ отдельных структур. В современном рельефе зоны Киевского водохранилища большинство субширотных структур представлено положительными формами рельефа — холмами, грядами, песчаными буграми, а также сопряженными с ними отрицательными формами рельефа — болотами, заболоченными понижениями, микрозападинами. Анализ морфологических характеристик, выраженности в рельефе и в геологическом строении показывает, что субширотные нарушения являются типичными структурами сжатия, трещинная проницаемость которых значительно ниже, чем проницаемость структур растяжения.

Среди структур северо-западного простирания наиболее крупное нарушение — Припятский разлом, совпадающий с долиной р. Припять (2). Он проявился в гравитационном поле, пересчитанном на высоту 1.5 и 10 км [13], что дает основание относить его к структурам глубокого заложения. Разлом играет важную роль в геологической истории района, определяя границу между структурами Украинского щита и Днепрово-Донецкой впадины, и относится к Южной прибрежной зоне разломов. Перемещения пород по разлому происходили на новейшем и современном этапах развития. Еще один крупный разлом этой системы — Днепродзержинский (3) — расположен на юге водохранилища, в районе г. Вышгород. Он проявился в полях

**Таблица 1. Оценка запасов РН (Бк/кг) в донных отложениях Киевского водохранилища (по данным съемки 20—22 мая 1986 г. [10])**

Часть водохранилища	$^{137}\text{Cs}$	$^{144}\text{Ce}$	$^{95}\text{Nb} + ^{95}\text{Zr}$	$^{103}\text{Ru} + ^{103}\text{Rh}$
Правобережная	$7.8 \cdot 10^{13}$	$2.5 \cdot 10^{14}$	$4.4 \cdot 10^{14}$	$4.1 \cdot 10^{14}$
Левобережная	$4.4 \cdot 10^{12}$	$8.7 \cdot 10^{12}$	$2.2 \cdot 10^{13}$	$1.9 \cdot 10^{13}$

**Таблица 2. Содержание и характер распределения суммы радионуклидов в донных отложениях на различных участках Киевского водохранилища (Бк/кг) [10]**

Время съемки, 1986 г.	Верхний участок водохранилища	Средний участок водохранилища	Нижний участок водохранилища
20—22 мая	6700—157000	45960	6700—93000
5—7 июня	5700—253000	1300—19400	1600—81000
21—23 июня	9000—123000	4700—40300	1400—107400
8—10 июля	19000—80000	800—32700	1900—120000

разностных аномалий силы тяжести на высоте 5 и 10 км, а также в вертикальных градиентах силы тяжести [13].

В современном рельфе структуры северо-западного простириания проявились в самых разных элементах, но наиболее часто они совпадают с участками со спрямленным, односторонним простирианием горизонталей, местами их коленообразных изгибов, сгущений. Менее характерны для них отрицательные формы рельефа.

Структуры северо-восточного простириания более многочисленные в пределах описываемого района, чем северо-западные. Среди них наиболее крупным является Тетеревский II разлом (4) — краевое нарушение Тетеревской глубинной зоны разломов раннедокембрийского заложения, с многократной тектонической активизацией, в том числе на неотектоническом и современном этапах развития. В магнитном и гравитационном полях разлом фиксируется цепочками локальных аномалий. В верхнем структурном этаже разлом проявляется фрагментарно, в виде локальных нарушений сбросо-сдвигового характера [12]. Кроме Тетеревского II разлома, в районе Киевского водохранилища установлено еще несколько нарушений аналогичного простириания, но все они не являются глубинными структурами. На карте современного рельефа описываемые структуры чаще всего проявляются аналогично структурам северо-западного простириания. Это участки со спрямленным простирианием горизонталей или их коленообразного изгиба, но, кроме того, нередко индицируются отрицательными эрозионными формами.

Структуры северо-западного и северо-восточного простирианий, в отличие от нарушений ортогональных систем, пользуются относительно ограниченным развитием в районе. Они образуют разрывы, в пределах которых слагающие их локальные разрывы располагаются чаще всего линейно. Четко выделяются краевые нарушения, ограничивающие разломы и зоны разломов. Благодаря этому достаточно уверенно устанавливаются границы нарушений, и они значительно уже, чем субмеридиональные и субширотные структуры. Судя по морфологии, особенностям строения и выраженности в современном рельфе, разломы северо-западного и северо-восточного простирианий могут быть отнесены к структурам скола, по которым, помимо вертикальных движений, могли происходить и горизонтальные перемещения. По проницаемости эти структуры занимают промежуточное положение между субмеридиональными и субширотными нарушениями, но в пределах отдельных локальных участков значения проницаемости могут резко изменяться.

Кроме разломов, в пределах описываемого района установлены кольцевые структуры. Генезис этих образований до настоящего времени вызывает споры. Однако бесспорно, что кольцевые структуры — это активные на современном тектоническом этапе развития образования, которые оказывают влияние на трещинную проницаемость пород. Так, в районе Чернобыльской АЭС на космических снимках четко выделяется сравнительно крупная, диаметром около 30 км, кольцевая структура, известная под названием Чистоголовская (5). Она только краем захватывает описываемый район. Другая кольцевая структура расположена в районе поселков Опачичи-Страхолесье (6). Ее северо-восточная часть расположена в пределах Припятского отрога Киевского водохранилища и заметно меньших размеров, чем Чистоголовская. Еще одна небольшая кольцевая структура расположена к югу от устья р. Ирпень, часть которой расположена в пределах дна Киевского водохранилища (7).

Все перечисленные выше кольцевые структуры характеризуются закономерным понижением отметок рельефа от центра структур к периферии, что связано с активными тектоническими поднятиями на современном этапе развития. Можно предположить, что кольцевые структуры сформировались под действием сил, направленных вертикально к поверхности Земли, то есть аналогично формированию складок поперечного изгиба. Это приводит к повышению проницаемости трещин, связанных с региональными разломами, в пределах этих структур.

Выделенные разломные нарушения разных сис-

тем пересекаются между собой, образуя узлы пересечения. Нередко в одном месте пересекаются по 3—4 разнонаправленных нарушения. Естественно, что узлы пересечения нарушений характеризуются повышенным количеством трещин, сложным распределением тектонических напряжений и, в целом, высокой трещинной проницаемостью. Это говорит о том, что узлы пересечения разломов являются путями быстрого поступления поверхностных вод в подземные горизонты и наоборот. В пределах Киевского водохранилища нами выделяются несколько таких структур. В северной части водохранилища, где сходятся Припятский и Днепровский отроги, расположен узел пересечения нарушения четырех систем: Одесско-Тальновский, Припятский, Тетеревский II разломы и одно из субширотных нарушений Северо-Украинской горстовой зоны. Кроме того, в этом районе расположена кольцевая структура, активно проявляющаяся на современном этапе развития. Нам представляется, что этот узел является наиболее опасной структурой с точки зрения загрязнения подземных вод радионуклидами.

На юге водохранилища, в районе Киевской ГЭС, установлено пересечение Одесско-Тальновской зоны разломов (1) с Днепродзержинским разломом (3) и с более мелкими нарушениями северо-восточного и субширотного простираний. Кроме того, как было отмечено выше, в этом районе расположена кольцевая структура (7), способствующая повышению проницаемости горных пород. Повышенная трещинная проницаемость пород в этом районе особенно опасна, потому что вблизи плотины ГЭС скапливаются приносимые реками Припять и Днепр разнообразные вещества, включая радионуклиды. Еще три узла пересечения Одесско-Тальновской зоны разломов с более мелкими структурами установлены в пределах Киевского водохранилища. Один из них расположен напротив Тетеревского залива, другой — напротив поселка Толокунь, а третий — против поселка Лютеж. Наиболее опасным, с точки зрения загрязнения подземных вод, следует считать узел в районе Тетеревского залива. Здесь на дне водохранилища накапливается значительное количество различных тяжелых металлов и РН. Еще один узел разломов расположен в районе Чернобыльской АЭС. Здесь пересекаются Южная Прибортовая и Брусиловская зоны разломов с одним из нарушений, относящимся к Северо-Украинской горстовой зоне. Повышению проницаемости пород в пределах описываемого узла способствует и расположенная здесь Чистоголовская кольцевая структура. Высокое содержание радионуклидов и тяжелых металлов в поверхностных отложениях на

этой территории в сочетании с повышенной проницаемостью горных пород делает этот район весьма опасным с точки зрения загрязнения подземных вод.

Результаты структурного дешифрирования космических снимков Киевского водохранилища и анализ характера распределения отметок рельефа его дна позволили выделить в пределах исследуемой территории шесть обособленных блоков первого порядка. Блоки первого порядка состоят из более мелких блоков (более высоких порядков). Развитие блоков во многом происходило автономно и проявилось на этапе рельефообразования в их различном гипсометрическом положении и в разной морфологии рельефа. Блок 8 (рисунок) совпадает с Припятским отрогом водохранилища и ограничен локальными разломами, относящимися к Припятскому разлому глубокого заложения. Рельеф дна характеризуется заметным перепадом высот и очень широким развитием мелких островов сложной формы и мелей. Блок 9 отвечает Днепровскому отрогу водохранилища. Он ограничен локальными разломами, относящимися к Тетеревскому II разлому. Рельеф дна отличается меньшим перепадом высот и менее широким развитием мелких островов, чем для блока 8. Границей между блоками 8 и 9 служит субмеридиональный разлом, относящийся к Одесско-Тальновской зоне разломов. Блоки 10—13 расположены в пределах Киевского водохранилища. Разломы Одесско-Тальновской зоны ограничивают блоки с запада и востока, а субширотные нарушения — с севера и юга. Разломы северо-западного и северо-восточного простираний играли подчиненную роль в определении границ блоков. Аналогичные зависимости присущи ограничениям блоков более высоких порядков. Блок 10 расположен на севере водохранилища, до Тетеревского залива включительно. Рельеф дна выровненный, с минимальными значениями отметок рельефа. Блок 11 ограничен с юга и севера широтными разломами, проходящими через Тетеревский залив и поселок Толокунь, и характеризуется максимальными значениями отметок дна. Поверхность последнего сильно расчленена, выделяются небольшие линейные поднятия, разделенные более крупными по площади понижениями. Северная граница блока достаточно резкая, тогда как южная — более пологая. Блок 12 расположен между широтными разломами, проходящими через поселки Толокунь и Лебедевка. Рельеф дна характеризуется сравнительно широким развитием узких вытянутых поднятий и впадин преимущественно субмеридионального и субширотного простираний. Блок 13ложен на юге водохранилища. Рельеф дна подобен

рельефу блока 12, но более спокойный. Преобладают поднятия, узкие и вытянутые впадины. Среди последних доминируют образования субмеридионального и северо-западного простираций. По особенностям распределения отметок дна и морфологии рельефа блоки 10—13 были разделены на более мелкие блоки трех порядков.

Анализ построенной схемы (рисунок) показывает, что блоки 10—13 делятся на западную и восточную части по характеру рельефа. Восточные части блоков отличаются от западных более спокойным, выровненным, слабо расчлененным рельефом дна и преобладанием понижений. Граница между западной и восточной частями блоков проходит по узким линейным блокам высоких порядков, которые характеризуются обычно минимальными отметками рельефа дна.

Рассмотренные особенности рельефа дна не могли не сказаться на характере распределения донных осадков и связанных с ними РН. Анализ имеющихся материалов по распределению РН в воде, взвесях и донных отложениях Киевского водохранилища в 1986 г. [10] показывает, что в правобережной части водохранилища, дно которой отличается более приподнятым и расчлененным рельефом, содержание радионуклидов на 1—2 порядка выше (табл. 1). Вероятно, неровности дна являлись «ловушками» на путях перемещения осадков, содержащих РН.

Сопоставление блокового строения дна с характером распределения суммы радионуклидов ( $^{103}\text{Ru}$  +  $^{103}\text{Rh}$ ,  $^{103}\text{Cs}$ ,  $^{144}\text{Ce}$ ) в донных отложениях на отдельных участках водохранилища в разное время (табл. 2) показало, что содержание РН не остается постоянным во времени и изменяется на разных участках водохранилища по-разному. Если в верхней части водохранилища, отвечающей блоку 10, максимальное содержание РН было 5—7 июня 1986 г., то в средней части водохранилища, отвечающей блоку 11, максимальные концентрации обнаружены на 21—23 июня 1986 г., а в нижней части, отвечающей блокам 12 и 13, максимальные величины зарегистрированы 8—10 июля 1986 г.

По-разному происходило и изменение содержания РН в пределах отдельных блоков. Если в блоке 10 оно достигло максимума 5—7 июня 1986 г., и потом снижалось, т.е. происходил постепенный вынос РН, то в блоках 12 и 13 происходило постоянное увеличение содержания РН, т.е. шел процесс накопления. Совсем иной, колебательный, характер изменения содержания РН отмечен в блоке 11. Их концентрация то увеличивалась, то уменьшалась. Это может быть вызвано значительной латеральной миграцией в пределах блока.

Относительно стабильная картина загрязнения осадков водохранилища нашла отражение на схеме размещения содержаний  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях Киевского водохранилища по состоянию на 1995 г. [2]. Распределение радионуклидов определялось интегральным воздействием гидродинамических и седиментационных процессов. Повышенные уровни загрязнения донных отложений установлены в зонах постоянного осадконакопления. Сопоставление данных о пространственном распределении  $^{137}\text{Cs}$  в донных осадках со структурной схемой показало, что экстремальные (пониженные и повышенные) содержания радионуклидов в блоках 8 и 9, отвечающих соответственно долинам рек Припять и Днепр, и в остальных блоках, расположенных в пределах водохранилища, подчиняются разным закономерностям. Если в блоках 8 и 9 повышенные концентрации  $^{137}\text{Cs}$  связаны с мелководными участками, где широко развиты острова и мели, а пониженные концентрации размещаются в пределах русел рек, то в остальных блоках наиболее высокие содержания радионуклидов приурочены к наиболее пониженным участкам дна водохранилища, включая и старое русло р. Днепр. Пониженное содержание радионуклидов характерно для относительно приподнятых, равнинных участков дна. Эти различия, вероятно, связаны с особенностями гидрологических режимов в разных блоках.

Как известно, в руслах рек наиболее высокие скорости течения, что приводит к выносу осадков. Среди островов и мелей скорость течения минимальная, благодаря чему выпавшие осадки остаются на месте. Волновые процессы также не могут привести к выносу значительного количества осадков. Благодаря большому количеству островов и мелей, их перемещение носит не направленный, упорядоченный, а хаотический характер. В результате осадки смещаются незначительно, оставаясь практически на месте.

В пределах водохранилища, где сравнительно низкие скорости течения, перераспределение осадков связано с волновыми процессами. В этих условиях наиболее глубоководные участки дна будут именно теми местами, где и накапливаются осадки. Действительно, в восточной части блоков 10—13 концентрации РН повсеместно понижены ( $4 \cdot 10^{10} \text{ Бк}/\text{км}^2$ ). Только в пределах отдельных локальных пониженных участков рельефа отмечается относительно повышение их содержания ( $2 \cdot 10^{11} \text{ Бк}/\text{км}^2$ ). В западной части водохранилища содержание  $^{137}\text{Cs}$  заметно более высокое ( $6 \cdot 10^{11} \text{ Бк}/\text{км}^2$ ). Наибольшие концентрации установлены в блоке 10, а именно в его западной части ( $9 \cdot 10^{11} \text{ Бк}/\text{км}^2$ ). Вызвано это, вероятно, резким

увеличением отметок рельефа дна к югу от Тетеревского залива, в пределах блока 11, сыгравшем роль своеобразной плотины.

Минимальное среднее содержание  $^{137}\text{Cs}$  установлено в пределах западной части блока 11 (менее  $4 \cdot 10^{10}$  Бк/км $^2$ ). Вместе с тем этот район характеризуется значительными различиями в содержании РН в осадках. Вероятно, это связано с интенсивным выносом отсюда осадков, поступавших с расположенных севернее блоков. Перемещение осадков обусловлено сравнительной мелководностью водохранилища в этом районе и интенсивным ветровым перемешиванием водных масс. Высокие концентрации  $^{137}\text{Cs}$  (более  $6 \cdot 10^{11}$  Бк/км $^2$ ) обнаружены в осадках, которые размещаются в пределах узких опущенных участков дна преимущественно субмеридионального простирания. Более высокое содержание РН известно только в пределах блока 8. В блоке 12 относительно повышенные (до  $5 \cdot 10^{11}$  Бк/км $^2$ ) концентрации  $^{137}\text{Cs}$  также приурочены к узким пониженным участкам дна субмеридионального простирания. Слабое (до  $7 \cdot 10^{10}$  Бк/км $^2$ ) повышение содержания РН отмечается и вдоль субширотных нарушений, которые связаны, вероятно, с локальными поднятиями рельефа. Блок 13 отличается от остальной территории водохранилища тем, что в его пределах резко доминируют осадки с содержанием  $^{137}\text{Cs}$  в  $6 \cdot 10^{10}$  Бк/км $^2$ , тогда как на остальной территории фоновое содержание менее  $5 \cdot 10^{10}$  Бк/км $^2$  [2]. Локальные участки относительно повышенного содержания РН связаны с узкими вытянутыми впадинами субмеридионального и северо-западного простираций, что согласуется с особенностями строения блока. Несомненно, что на распределение осадков и связанных с ними РН в пределах блока значительное влияние оказала плотина Киевской ГЭС.

В целом для всего водохранилища характерно, что с севера на юг происходит понижение величин максимального содержания  $^{137}\text{Cs}$  в донных осадках, уменьшаются различия в содержании РН между западной и восточной частями блоков. Определяющее влияние на распределение локальных повышений содержания  $^{137}\text{Cs}$  в осадках оказывают узкие понижения рельефа дна субмеридионального простирания, приуроченные к разломам.

Таким образом, в результате проведенных исследований показана возможность использования космических снимков совместно с детальными топокартами для изучения различных тектонических структур, развитых в пределах дна Киевского водохранилища. Установлено, что выделяемые по космическим снимкам тектонические блоки, проявляющиеся в современном рельефе, оказали влияние

на распределение и перераспределение концентраций  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях. Их влияние на распределение РН проявилось как на протяжении первого года после аварии, так и почти через 10 лет, в 1995 г., когда картину распределения  $^{137}\text{Cs}$  в донных осадках можно считать уже относительно стабильной. Не вызывает сомнений, что локальные повышенные и максимальные концентрации РН в осадках правобережной и левобережной частей водохранилища в большинстве случаев приурочены к узким линейным понижениям в рельефе, контролируемым субмеридиональными разломами, которые являются структурами растяжения. В пределах участков рек Припять и Днепр, непосредственно примыкающих к водохранилищу (блоки 8 и 9) закономерности накопления  $^{137}\text{Cs}$  совершенно отличные от водохранилища. Здесь повышенные концентрации РН приурочены к мелководным участкам, где много мелей и островов, а минимальные — отмечены в пределах русел рек.

На примере дна Киевского водохранилища практически впервые обращено серьезное внимание на роль разломов, узлов их пересечений и кольцевых структур в распределении загрязнений в донных отложениях водных объектов. Необходимо отметить, что процессы фильтрации по этим структурам, благодаря постоянному наличию воды, идут непрерывно и более интенсивно, чем по аналогичным структурам на суше. Это тем более важно, что все водохранилища являются объектами аккумуляции, на дне которых накопились и продолжают накапливаться разнообразные химические вещества. Наиболее опасными участками, с точки зрения загрязнения подземных вод, являются узлы пересечения субмеридиональной Одесско-Тальновской зоны разломов с разломами других простираций в сочетании с кольцевыми структурами. К таким участкам в первую очередь нужно отнести север водохранилища, район сочленения блоков 8, 9 и 10, где пересекаются Припятский, Тетеревский II разломы, один из разломов Северо-Украинской горстовой зоны с Одесско-Тальновской зоной разломов и с выделенной кольцевой структурой. В указанном районе установлены высокие концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в донных осадках.

Другой такой же неблагоприятный участок расположен на юге водохранилища, где с Одесско-Тальновской зоной разломов пересекается Днепродзержинский и безымянный субширотный разлом и выделена кольцевая структура. Он менее опасен с точки зрения загрязнения подземных вод, так как здесь более низкое содержание  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях. Еще два узла пересечения разломов выделены в районе устья р. Тетерев и поселка

Толокунь, но здесь кольцевые структуры отсутствуют.

Таким образом, изучение разломно-блочных структур, влияющих на перераспределение придонных водных потоков и седиментов, позволяет более точно прогнозировать возникновение экстремальных ситуаций вследствие загрязнений из-за аккумуляции тех или иных химических соединений. Следовательно, особенности геологического строения дна водохранилища и его выраженность в рельефе необходимо учитывать при выборе сети контрольных станций для проведения мониторинга качества не только поверхностных, но и подземных вод, а также уровня загрязнений донных отложений. Не исключено, что разломы, кроме функции перераспределения РН в донных отложениях, могут оказывать и прямое влияние на уровень радиоактивности за счет выброса  $^{208}\text{Po}$ , однако этот вопрос требует отдельных исследований.

Методические приемы, использованные для изучения тектонических структур (разломов, узлов пересечения разломов, кольцевых структур и блоков) по космическим снимкам и топокартам рельефа дна Киевского водохранилища, могут быть использованы для анализа закономерностей влияния тектонических структур, активных на современном этапе развития, на накопление и перераспределение донных осадков и токсикантов различного происхождения во всех водохранилищах днепровского каскада.

1. Белевцев Я. Н., Быстревская С. С., Семенюк Н. П. и др. Космотектоническая карта Украинского щита // Исследования Земли из космоса.—1982.—№ 4.—С. 5—14.
2. Войцехович О. В., Шестopalов В. М. До дискусії щодо ідеї спуску Київського водосховища // Biol. екологічного стану зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення.—1999.—№ 14.—С. 45.
3. Гойжевский А. А. Северо-Украинская горстовая зона // Геотектоника.—1975.—№ 3.—С. 27—35.
4. Гудзенко В. В., Онищенко И. П., Шестopalов В. М. Вертикальная миграция осколочных радионуклидов. Итоги десятилетних наблюдений // Чернобыль-96: Сб. тез. — 1996.—С. 53—55.

5. Давидчук В. С., Зарудная Р. Ф., Михели С. В. и др. Ландшафты Чернобыльской зоны и их оценка по условиям миграции радионуклидов. — Киев: Наук. думка, 1994.—112 с.
6. Денисова А. И. Формирование гидрохимического режима водохранилищ Днепра и методы его прогнозирования. — Киев: Наук. думка, 1979.—290 с.
7. Киевское Приднепровье / Под ред. А. М. Маринича, М. М. Паламарчука. — Киев: Наук. думка, 1988.—176 с.
8. Кухарь В. П. Украина. Чернобыль. 10 лет спустя // Родная природа.—1996.—№ 2-3.—С. 20—26.
9. Лялько В. І., Федоровський О. Д., Сіренко Л. Я. та ін. Використання космічної інформації у вирішенні водогосподарських і водоохоронних завдань // Космічна наука і технологія.—1997.—3, № 3/4.—С. 40—49.
10. Радиогеоэкология водных объектов зоны влияния аварии на Чернобыльской АЭС / Под общей ред. О. В. Войцеховича. — Киев: Чернобыльцентринформ, 1997.—Т. 1: Мониторинг радиоактивного загрязнения природных вод Украины (обзор исследований, выполненных за период 1986—1996 гг.).—308 с.
11. Радиоактивное и химическое загрязнение Днепра и его водохранилищ после аварии на Чернобыльской АЭС. — Киев: Наук. думка, 1992.—194 с.
12. Тектоника нефтегазоносных областей юго-запада СССР (Объяснительная записка к тектонической карте нефтегазоносных областей юго-запада СССР с использованием материалов космических съемок) // Р. Г. Гарецкий, В. В. Глушко, Н. А. Крылов и др. — М.: Наука, 1988.—85 с.
13. Хоменко В. И. Глубинная структура юго-западного края Восточно-Европейской платформы. — Киев: Наук. думка, 1987.—140 с.

#### ESTIMATING THE INFLUENCE OF FRACTURE-BLOCK STRUCTURES ON THE DISTRIBUTION OF RADIONUCLIDES IN BOTTOM SEDIMENTS WITH THE USE OF SPACE IMAGES

V. I. Lyal'ko, L. A. Sirenko, A. D. Fedorovsky,  
A. Ya. Khodorovsky, and V. M. Shestopalov

We discuss the influence of fracture-block structures on the distribution of radionuclides in the bottom sediments in the Kiev water storage reservoir studied from the analysis of space images and topographic maps of the reservoir bottom. It is shown that the methods for the investigation of tectonic structures described here may be used to analyses the storage and redistribution of radio-nuclides in the bottom sediments of other water storage reservoirs of the Dnipro cascade and other water bodies.

УДК 528.8.04:551.4

Дешифрирование космических снимков:  
распознавание ландшафтных зон  
на основе структурного анализа

А. Д. Федоровский, В. Г. Якимчук, Р. И. Новиков,  
И. П. Пахомов, К. Ю. Суханов, А. А. Теременко

Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

*Надійшла до редакції 23.05.00*

Розглянуті засоби дешифрування космічних знімків за структурно-текстурними ознаками ландшафтних зон. При комп'ютерній обробці зображень використовувався математичний апарат просторово-частотного і кореляційного аналізу. Показана можливість класифікації ландшафтних зон за типами на основі матриць суміжних імовірностей контрастів.

Распознавание ландшафтных зон (ЛЗ) по космическим снимкам необходимо для обоснования различных мероприятий в сельском, лесном и водном хозяйствах, для задач городского и промышленного строительства и др.

Возросшие возможности компьютерных средств обработки информации позволяют при дешифрировании космических снимков наряду с оптическими спектральными признаками использовать пространственные структурные (форма, размер, относительное положение и ориентация элементов ЛЗ) и текстурные (тонкое строение элементов ЛЗ, проявляющееся в изменении яркости) характеристики изображений, что дает возможность с большей вероятностью дешифрировать космические снимки ЛЗ.

Известно, что одним из информативных структурно-текстурных признаков изображений ЛЗ является их пространственно-частотный спектр (ПЧС) [3]. Изменению яркости и координат точек в плоскости предмета или его изображения в терминах спектрального анализа соответствует изменение амплитуды и фазы по пространственным частотам. Таким образом, изображению ЛЗ, имею-

щему определенную структуру, соответствует ПЧС, характеризующийся суммой пространственных составляющих (гармоник) с соответствующими амплитудами и фазовыми сдвигами этих составляющих. Значения амплитуд определяют вклад соответствующих пространственных частот в формирование изображения, а значения фазовых сдвигов определяют изменение координат отдельных точек в изображении относительно их положения в объекте. Неискаженному изображению соответствует область пространственных частот, в пределах которой характеристика фазового ПЧС аппаратуры равна нулю, т. е. в изображении сохраняются первоначальные координаты различных точек объекта. В качестве ПЧС наиболее часто используются двухмерные спектры Фурье. Их  $C(n, m)$  вычисляются по методу дискретного двухмерного преобразования Фурье в соответствии с выражением [1]

$$C(n, m) = \frac{1}{AB} \sum_{x=0}^{A-1} \sum_{y=0}^{B-1} L(x, y) \exp\left[-i[(nx/A) + (my/B)]\right], \quad (1)$$

где  $n, m$  — номера пространственных гармоник по

оси  $X$ ,  $Y$ ;  $x$ ,  $y$  — номера пикселов в пределах выделенного фрагмента по осям  $X$ ,  $Y$ ;  $L(x, y)$  — распределение яркости в изображении;  $A$ ,  $B$  — количество отсчетов по осям  $X$ ,  $Y$ .

Разработанная в Центре аэрокосмических исследований Земли (ЦАКИЗ) ИГН НАН Украины программа позволяет на основе вычисления ПЧС изображений ЛЗ определять преимущественное направление развития протяженных структур. Необходимость последнего возникает при исследовании по космическим снимкам рельефа местности, выделении линеаментов геологических структур, определении преимущественного направления водных потоков, расположения лесопосадок и др. Так, если в исходном изображении имеются протяженные структуры разного направления, то будет наблюдаться расширение ПЧС в направлении, перпендикулярном к направлению наибольшей их протяженности. Измеряя распределение интенсивности спектра по угловой координате, можно определить доминирующие направления и соотношение их суммарной протяженности. В этом случае для амплитудного спектра, преобразованного в полярные координаты, определяется функция распределения амплитудной составляющей по направлениям. Угол, соответствующий направлению с максимальным значением амплитудной составляющей, указывает доминирующее направление протяженной структуры. Предлагаемый подход был апробирован при анализе доминирующих направлений рукавов устьев рек, геологических разломных структур и лесопосадок. На рис. 1, *а* изображен космический снимок участка устья Днепра, а на рис. 1, *б* график азимутального распределения ПЧС изображения. При сопоставлении графика с изображением можно отметить, что направлению основного русла соответствует пик ПЧС под углом примерно  $30^\circ$ , причем энергетически достаточно насыщенный, что указывает на преобладание более низких частот. Множеству мелких рукавов и протоков, направление которых совпадает с осью абсцисс, соответствуют участки спектра в области углов  $10^\circ$  и  $180^\circ$ . Пики ПЧС, расположенные под углом  $90^\circ$  и  $160^\circ$ , соответствуют локальным линейным объектам, не совпадающим с направлением русла реки. График углового распределения ПЧС фрагмента изображения (рис. 1, *б*) построен в условных координатах, однако пересчет их в географические координаты для привязки к местности трудностей не представляет.

На рис. 2, *а* приведены результаты дешифрирования космического снимка участка земной поверхности в зоне разломных образований. Известно, что определение путем непосредственных измере-

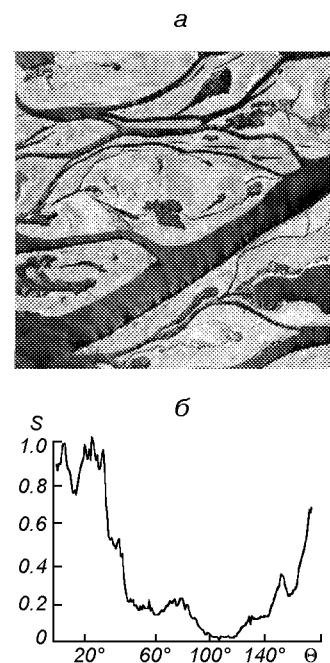


Рис. 1. Определение преимущественного направления водных потоков: *а* — фрагмент космического снимка участка устья реки Днепр, *б* — график азимутального распределения ПЧС изображения

ний направлений линеаментов и соотношений их интенсивностей является довольно трудоемким процессом. Эта задача значительно упрощается в при использовании компьютерной обработки ПЧС линеаментов на основе метода пространственно ориентированной фильтрации. На рис. 2, *б* изображено распределение амплитуд ПЧС в функции угловой ориентации фильтра. Кроме непосредственного определения направления линеаментов, возможно измерение соотношений линеаментов по различным направлениям путем подсчета числа ординат, взятых с определенным шагом в локальных зонах.

Эффективность пространственного спектрального анализа возрастает при наличии в анализируемом изображении периодически расположенных структур (лесопосадок, сельхозкультур и др.), а также с повышением разрешающей способности космических снимков.

Фазовые ПЧС нами использовались для автоматического определения величины смещения объекта. Задача решается путем сравнения фазовых ПЧС, полученных при начальном и конечном положениях объекта. На рис. 3 приведен пример использования фазовых ПЧС для вычисления по

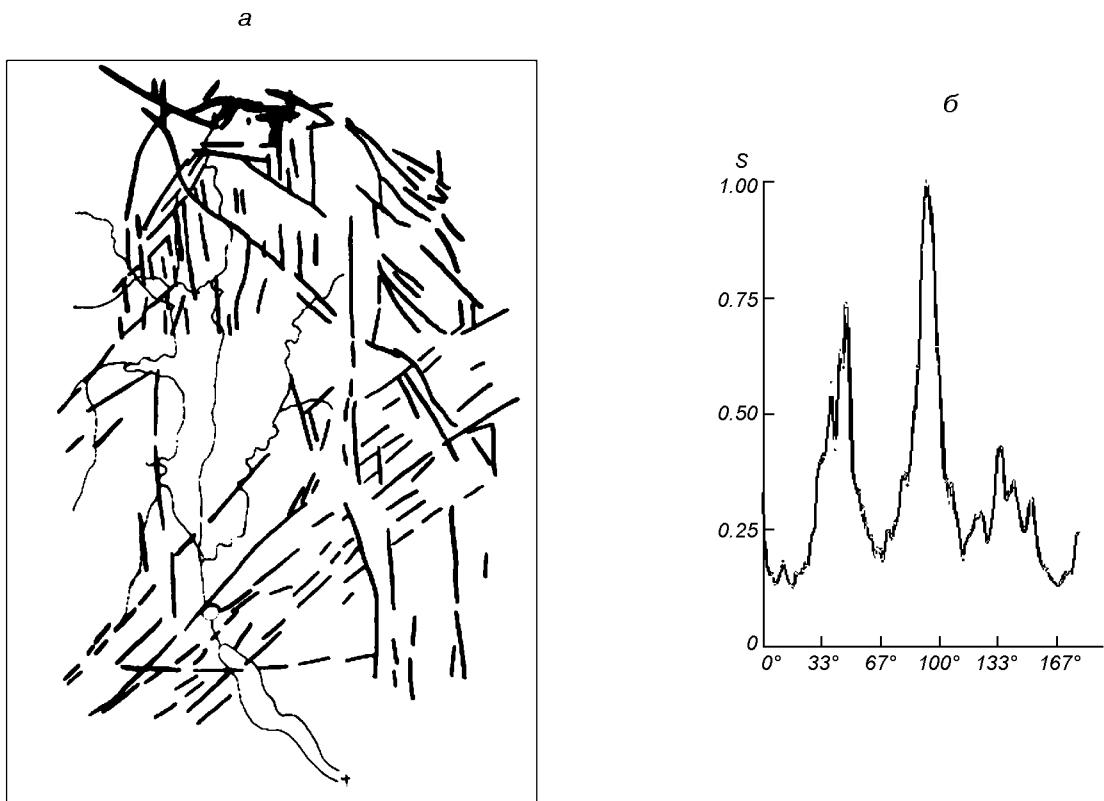


Рис. 2. Определение направлений в изображении линейных структур геологических разломов: *а* — схема распределения линеаментов, *б* — график азимутального распределения ПЧС изображения

снимку расстояния, на которое переместился объект. Смещению изображения объекта (рис. 3, *a*) на определенное число пикселов соответствует такое же число периодов разности фазовых составляющих спектра, а точность измерения координат соответствует одному пикселу изображения. Приведенный на рис. 3, *б* график разности фазовых составляющих ПЧС двух изображений содержит шесть периодов изменения фазы. Метод измерения смещений с помощью фазового ПЧС может быть применен при автоматическом анализе разновременных космических снимков, например для оценки изменений береговой линии, возникновения мелководий и островов в руслах рек, контроле лесопосадок и посевов сельскохозкультур и др. Возможен еще один подход к дешифрированию изображений ЛЗ по структурно-текстурным признакам. Известно, что для изображений, к которым можно отнести элементы ЛЗ (водная поверхность, городская застройка, лес, поле, кустарник и др.), коэффициенты автокорреляции яркости изображения достаточно точно аппроксимируются экспоненциальными функциями [1]. Это позволяет в качестве

стохастической модели изображений ЛЗ использовать случайный двухмерный марковский процесс первого порядка. Математической формой описания марковской модели изображения является матрица смежных вероятностей (МСВ) значений яркости космического снимка. Учитывая, что яркость изображения обычно передается 8-разрядным кодом, для 256 градаций яркости МСВ такого процесса принимает вид

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} P_{0,0} & P_{0,1} & P_{0,2} & \dots & P_{0,j} & \dots & P_{0,255} \\ P_{1,0} & P_{1,1} & P_{1,2} & \dots & P_{1,j} & \dots & P_{1,255} \\ P_{2,0} & P_{2,1} & P_{2,2} & \dots & P_{2,j} & \dots & P_{2,255} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{i,0} & P_{i,1} & P_{i,2} & \dots & P_{i,j} & \dots & P_{i,255} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{255,0} & P_{255,1} & P_{255,2} & \dots & P_{255,j} & \dots & P_{255,255} \end{pmatrix}.$$

Элемент  $P_{ij}$  матрицы  $\mathbf{P}$  является оценкой вероятности наличия в изображении смежных пикселов,

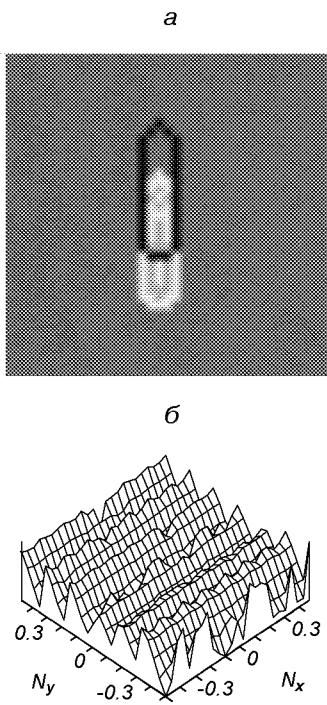


Рис. 3. К определению расстояния между двумя положениями изображений объекта: *а* — изображение двух положений объекта, *б* — график разности фазовых составляющих ПЧС двух изображений объекта

имеющих значения оптической яркости  $i$  и  $j$ . Величина  $P_{ij}$  определяется как отношение количества пар соседних пикселов, имеющих яркости  $i$  и  $j$ , к общему числу различных сочетаний значений яркости в изображении ЛЗ. Полученная МСВ служит основой для вычисления структурных признаков ЛЗ, например приведенных в работах [4, 5], по которым ЛЗ дешифрируются автоматически.

Следует отметить, что МСВ, имея размер  $256 \times 256$  элементов, громоздка для вычислений. Нами для составления МСВ были использованы значения разности яркостей  $\Delta$  смежных пикселов (яркостных контрастов). Такой подход позволяет исключить из анализа значения яркости пикселов, заменив их значениями  $\Delta$ . Для яркостных контрастов МСВ превращается в матрицу-столбец смежных вероятностей контрастов (МСВК), что является преимуществом по сравнению с выше описанным подходом, так как позволяет получить структурные признаки, менее чувствительные к изменению освещенности, и при этом значительно сократить объем вычислений.

Исходя из того, что МСВК симметрична, для сокращения вычислений рассчитывались абсолют-

ные значения  $\Delta$  в окрестностях каждого пикселя по формуле

$$\Delta = \left| L(x, y) - \frac{1}{4} [L(x + 1, y) + L(x - 1, y) + L(x, y + 1) + L(x, y - 1)] \right|, \quad (2)$$

где  $L(x, y)$  — яркость пикселя,  $x$  и  $y$  — координаты пикселов в изображении.

В дальнейшем производился подсчет количества одинаковых значений  $\Delta$  для всего диапазона от 0 до 255 и осуществлялось определение оценок вероятностей  $P_\Delta$  их наличия в изображении.

На основе МСВК был предложен метод классификации изображений различных ЛЗ по их типам. Техника этого метода основана на последовательности следующих операций: построение базиса в виде  $P_\Delta^*$  для эталонных тестовых участков различных типов ЛЗ; определение усредненных значений  $P_\Delta^*$  и их доверительных интервалов по однотипным тестовым участкам; оценка распознаваемости  $P_\Delta^*$  для эталонных участков ЛЗ в пространстве МСВК; отсев минимальных значений  $P_\Delta^*$ ; определение расстояний  $F_i$  по формуле (3) в пространстве МСВК между значениями  $P_\Delta$  для исследуемого участка ЛЗ и  $P_\Delta^*$  для эталонных участков; вычисление функции принадлежности  $F_{pi}$  по формуле (4); классификация исследуемого участка ЛЗ по максимальному значению  $F_{pi}$ .

$$F_i = \sum_{\Delta=1}^S (P_\Delta - P_\Delta^*), \quad (3)$$

$$F_{pi} = 1 - \frac{F_i - F_{min}}{F_{max}}. \quad (4)$$

С помощью рассмотренного метода были определены эталонные значения  $P_\Delta^*$  по тестовым участкам пяти различных ЛЗ (водная поверхность, городская застройка, лес, поле, кустарник). Для этого были использованы космические снимки Киевской области, полученные французским спутником «Спот», и результаты соответствующих наземных наблюдений. По каждому из пяти видов ЛЗ было обработано 16 тестовых участков с последующим усреднением результатов измерений. В дальнейшем полученные структурно-текстурные характеристики тестовых участков использовались в качестве эталонов при анализе космических снимков ЛЗ. Результаты эксперимента по отбору эталонных участков ЛЗ и расчета нормированных значений  $P_\Delta^*$  и их доверительных интервалов приведены в табл. 1. Яркостные контрасты от 15 до 255 единиц, ввиду

Таблица 1. Нормированные значения  $P_{\Delta}^*$  и их доверительные интервалы

$\delta$	$P_{\Delta}^*$									
	типы ЛЗ									
	Водная поверхность	Городская застройка	Лес		Поле		Кустарник			
0	49.4	$\pm 2.4$	2.6	$\pm 0.3$	18.2	$\pm 1.6$	8.5	$\pm 0.8$	7.8	$\pm 0.7$
1	44.5	1.2	5.4	0.4	30.2	1.3	15.8	1.3	15.7	1.5
2	5.5	1.1	5.5	0.4	20.4	0.7	15.1	0.7	14.4	1.1
3	0.5	0.3	5.3	0.3	12.6	0.9	12.9	0.4	11.8	0.9
4	0.1	0.1	5.2	0.4	7.5	0.8	11.4	0.7	10.1	0.6
5	0	0	5.1	0.3	4.1	0.6	9.2	0.5	8.2	0.5
6	0	0	4.8	0.3	2.2	0.4	7.2	0.5	6.7	0.5
7	0	0	4.5	0.3	1.6	0.3	5.8	0.6	5.1	0.4
8	0	0	4.6	0.4	0.9	0.2	4	0.4	4.2	0.6
9	0	0	4.1	0.2	0.6	0.2	3	0.4	3.3	0.3
10	0	0	4	0.3	0.5	0.2	2.1	0.3	2.5	0.4
11	0	0	3.7	0.2	0.3	0.1	1.6	0.2	2	0.4
12	0	0	3.5	0.3	0.2	0.1	1.1	0.1	1.6	0.3
13	0	0	3.4	0.2	0.2	0.1	0.5	0.1	1.3	0.3
14	0	0	3.2	0.1	0.1	0.1	0.5	0.1	1	0.4
15	0	0	2.8	0.3	0.1	0	0.3	0.1	0.9	0.3
15—255	0		32.3		0.3		1		3.4	

Таблица 2. Результаты определения расстояний  $F_i$  и функций принадлежности  $F_{pi}$  по трем каналам космического снимка «Спот»

Канал	$F_i / F_{pi}$				
	типы ЛЗ				
	Водная поверхность	Городская застройка	Лес	Поле	Кустарник
IR	0.1 / 0	0.03 / 0.71	0.04 / 0.66	0.01 / 1	0.025 / 0.8
R	0 / 0.86	0.05 / 0.38	0 / 0	0.004 / 1	0.021 / 0.76
G	0 / 0.95	0.04 / 0.54	0 / 0	0.005 / 1	0.022 / 0.75
$\Sigma$	0.1 / 0	0.07 / 0.33	0.04 / 0.68	0.01 / 1	0.039 / 0.66

их небольшого количества, объединены в одну строку.

Как видно из табл. 1, каждый вид ЛЗ характеризуется своим распределением значений коэффициентов матрицы  $P_{\Delta}^*$ , что является информативным признаком при автоматическом дешифрировании ЛЗ и их классификации по структурно-текстурным характеристикам.

Дешифрирование космических снимков ЛЗ на основе МСВК может быть выполнено с использованием нескольких спектральных слоев. Для этого производится классификация участков ЛЗ для каждого из каналов в соответствии с выражениями (3), (4), а затем по формуле (5) определяется расстояние  $F_{\Sigma}$  в пространстве всех спектральных слоев и вновь рассчитывается функция принадлежности  $F_{p\Sigma}$  по формуле (4).

$$F_{\Sigma} = \sum_{i=1}^L F_i. \quad (5)$$

Экспериментальная проверка метода дешифрирования ЛЗ на основе МСВК заключалась в выборе на космическом снимке нескольких различных участков ЛЗ для дальнейшей классификации на основе сформированной по всем спектральным слоям базы  $P_{\Delta}^*$ . Для каждого исследуемого участка были определены  $P_{\Delta}$  в трех спектральных каналах, составлена МСВК и определена функция принадлежности  $F_{pi}$  в многомерном пространстве значений  $P_{\Delta}^*$  и  $P_{\Delta}$ . Результаты определения расстояний  $F_i$  и значений функций принадлежности  $F_{pi}$  по трем каналам и их суммы ( $\Sigma$ ) космического снимка «Спот» для одного из участков ЛЗ представлены в табл. 2: ( $F_i / F_{pi}$ ).

Из табл. 2 видно, что по максимальному значению  $F_{pi} = 1$ , исследованный участок ЛЗ относится к типу ЛЗ «Поле».

Проверка методики классификации ЛЗ на основе МСВК при обработке 15 различных участков космических изображений дала значение вероятности правильной классификации 0,8, что для большинства задач, связанных с районированием территорий, является приемлемым результатом.

Рассмотренные некоторые компьютерные методы демонстрируют возможность использования структурно-текстурных признаков для автоматического дешифрирования космических снимков ЛЗ с помощью простых алгоритмов цифровой обработки изображений. Наибольший эффект может быть получен при комплексном использовании последних в сочетании со спектрозональным анализом изображений в условиях контролируемой классификации.

1. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. — М.: Наука, 1978.—848 с.

2. Красильников Н. Н. Теория передачи и восприятия изображений. — М.: Радио и связь, 1986.—248 с.
3. Янущ Д. А. Дешифрирование аэрокосмических снимков. М.: Недра, 1991.—240 с.
4. Haralick R. M. Statistical and structural approaches to texture // Proc. IEEE.—1979.—67, N 5.—P. 786.
5. Kourgli A., Belhadj-Aissa A. Textural classification using textural signatures // Remote sensing in the 21st century: economic and environmental applications / Ed. Casanova. — Balkema, Rotterdam, 2000.—P. 557—561.

---

#### INTERPRETATION OF SPACE SNAPSHOTS OF LANDSCAPE ZONES ON THE BASIS OF THE STRUCTURAL ANALYSIS

A. D. Fedorovsky, V. G. Yakimchuk, R. I. Novikov,  
I. P. Pakhomov, K. Yu. Sukhanov, and A. A. Teremenko

The methods of an interpretation of space snapshots of landscape zones till them structural to attributes are considered. With computer processing of the images the mathematical device spatial-frequency and correlation analysis was used. The opportunity of classification of landscape zones for types is shown on the basis of matrixes of adjacent probabilities of contrasts.

УДК 528.8(15).629.78

## Міжнародні принципи щодо дистанційного зондування Землі

В. П. Зубко

Національне космічне агентство України, Київ

*Надійшла до редакції 31.07.00*

Приведені загальні принципи щодо дистанційного зондування Землі з космосу, отримання та використання даних, які прийняті на міжнародному рівні Організацією Об'єднаних Націй, Комітетом супутникового спостереження Землі, партнерами міжнародної системи спостереження Землі.

### ВСТУП

З перших днів космічної ери ведуться інтенсивні дебати про законодавчі принципи, державну політику та комерційну діяльність стосовно інформації про Землю, що отримана з супутників. Основними сферами дискусій були і залишаються:

- дотримання принципу справедливості між країнами, особливо стосовно доступу до інформації про ресурси;
- питання державної таємниці;
- комерційна діяльність, а саме — цінова політика.

Ці та інші питання, пов'язані з космічними системами для дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), особливо питання використання даних, активно обговорюються і вирішуються на різних рівнях — від ООН до окремих компаній, що займаються цією діяльністю на комерційній основі. Так, наприклад, в США прийнято відповідний закон («Land Remote Sensing Policy Act of 1992», Public Law 102—555—Oct. 28, 1992), яким визначені нормативно-правові принципи щодо програми «Ландсат» та ДЗЗ в цілому, а під егідою ЄС виконується цільовий проект EOPOLE (Earth Observation Data Policy and Europe), метою якого є вироблення узгоджених принципів діючих і перспективних європейських програм з дистанційного зондування.

Дистанційне зондування Землі є одним з головних напрямків космічної діяльності в Україні. В

рамках програми створення національної космічної системи спостереження Землі («Січ») запущено супутники «Січ-1» (1995 р.) та «Океан-О» (1999 р.). Тому важливо знати і дотримуватися таких принципів, що вже прийняті і діють як міжнародні норми. Звичайно, базовим повинен бути документ ООН [1], який автор порахував за доцільне привести в цій статті також, щоб була можливість комплексного представлення та аналізу цього питання, і уточнив деякі технічні терміни, які, на його думку, більше відповідають українському варіанту.

### ПРИНЦИПИ ОРГАНІЗАЦІЇ ОБ'ЄДНАНИХ НАЦІЙ щодо дистанційного зондування Землі

Прийнята 3 грудня 1986 р. Генеральною Асамблеєю ООН Резолюція 41/65 містить головні принципи відносно дистанційного зондування Землі з супутників. Вони були сформовані протягом значного періоду роботи Комітетом з мирного використання космічного простору (COPUOS — Committee on Peaceful Uses of Outer Space) і базуються на більш загальних принципах, а саме договорі про головні принципи діяльності держав в дослідженнях та мирному використанні відкритого космосу, включаючи Місяць та інші тіла Сонячної системи (схвалені Генеральною Асамблеєю 13 грудня 1966 р., резолюція 2222 (XXI)), та декларації про керівні зако-

нодавчі принципи діяльності держав в дослідженнях та мирному використанні відкритого космосу. Тексти обох цих документів, а також інші угоди ООН наводяться повністю в публікації «Космічна діяльність Об'єднаних Націй та міжнародних організацій» (ООН, 1986 р.)

### **Резолюція Генеральної Асамблеї ООН 41/65 від 03.12.86 р.**

Генеральна Асамблея,

посилаючись на свою резолюцію 3234 (XXIX) від 12 листопада 1974 року, в якій вона просила Комітет з дослідження космічного простору в мирних цілях і його Юридичний підкомітет розглянути питання про правові наслідки дистанційного зондування Землі з космосу, а також на свої резолюції 3388 (XXX) від 18 листопада 1975 р., 31/8 від 8 листопада 1976 р., 32/196 А від 20 грудня 1977 р., 33/16 від 10 листопада 1978 р., 34/66 від 5 грудня 1979 р., 35/14 від 3 листопада 1980 р., 36/35 від 18 листопада 1981 р., 37/89 від 10 грудня 1982 р., 38/80 від 1983 р., 39/96 від 14 грудня 1984 р. і 40/162 від 16 грудня 1985 р., в яких вона закликала до детального розгляду правових наслідків дистанційного зондування Землі з космосу з метою розроблення проектів принципів, що спосуваються дистанційного зондування,

розглянувши доповідь Комітету з використання космічного простору в мирних цілях про роботу його двадцять дев'ятої сесії і доданий до нього текст проекту принципів, що стосуються дистанційного зондування Землі з космосу,

з задоволенням відзначаючи, що Комітет з використання космічного простору в мирних цілях на основі роботи його Юридичного підкомітету схвалив текст проекту принципів, які стосуються дистанційного зондування Землі з космосу,

вважаючи, що прийняття принципів, які стосуються дистанційного зондування Землі з космосу, сприятиме зміцненню міжнародного співробітництва в цій галузі,

приймає викладені в додатку до цієї резолюції принципи, які стосуються дистанційного зондування Землі з космосу.

Додаток

### **ПРИНЦИПИ, що стосуються дистанційного зондування Землі з космічного простору**

#### **Принцип I**

Для цілей цих принципів стосовно діяльності з дистанційного зондування:

а) термін «дистанційне зондування» означає зон-

дування поверхні Землі з космосу з використанням властивостей електромагнітних хвиль, які випромінюються, відбиваються або розсіюються зондованими об'єктами, з метою кращого управління природними ресурсами, вдосконалення землекористування та охорони навколошнього середовища;

б) термін «первинні дані» означає необроблені дані, які одержують за допомогою апаратури дистанційного зондування, встановленої на борту космічного об'єкта, які передаються або доставляються на Землю з космосу через телеметрію у вигляді електромагнітних сигналів, на фотоплівках, магнітних стрічках або будь-яким іншим способом;

в) термін «оброблені дані» означає матеріали, одержані в результаті такої обробки первинних даних, яка необхідна для забезпечення можливості користуватися цими даними;

г) термін «проаналізована інформація» означає інформація, що одержана в результаті інтерпретації оброблених даних, додаткових даних і відомостей з інших джерел;

д) термін «діяльність з дистанційного зондування» означає експлуатацію космічних систем дистанційного зондування, наземних станцій для приймання та накопичення первинних даних і діяльність щодо обробки, інтерпретації та розповсюдження оброблених даних.

#### **Принцип II**

Діяльність з дистанційного зондування здійснюється заради добробуту і в інтересах усіх країн, незалежно від рівня їх економічного, соціального чи науково-технічного розвитку та з особливим врахуванням потреб країн, що розвиваються.

#### **Принцип III**

Діяльність з дистанційного зондування здійснюється згідно з міжнародним правом, включаючи Статут Організації Об'єднаних Націй, Договір про принципи діяльності держав з дослідження і використання космічного простору, включаючи Місяць та інші небесні тіла, і відповідні документи Міжнародного союзу електroz'язку.

#### **Принцип IV**

Діяльність з дистанційного зондування здійснюється згідно з принципами, які містяться в статті I Договору про принципи діяльності держав з дослідження і використання космічного простору, включаючи Місяць та інші небесні тіла, яка, зокрема, передбачає, що дослідження і використання космічного простору здійснюється заради добробуту і в інтересах усіх країн, незалежно від рівня їхнього економічного чи технічного розвитку, і встановлює

принцип, згідно з яким космічний простір є відкритим для дослідження і використання на основі рівності. Ця діяльність здійснюється на основі поваги принципу повного і постійного суверенітету всіх держав і народів над своїми багатствами і природними ресурсами з належним урахуванням прав та інтересів інших держав і організацій, що знаходяться під їхньою юрисдикцією і визнаються міжнародним правом. Подібна діяльність повинна здійснюватися таким чином, щоб не завдавати шкоди законним правам та інтересам держави, що зондується.

#### Принцип V

Держави, які здійснюють діяльність з дистанційного зондування, сприяють міжнародному співробітництву в цій діяльності. З цією метою вони надають іншим державам можливості для участі в ній. Така участь ґрунтуються у кожному випадку на справедливих і взаємоприйнятних умовах.

#### Принцип VI

Для одержання максимальної користі від діяльності з дистанційного зондування держави заохочуються до того, щоб в угодах або інших домовленостях передбачалися створення та експлуатація станцій для приймання та накопичення даних і засобів для обробки та інтерпретації даних, зокрема в межах регіональних угод і домовленостей, коли це можливо.

#### Принцип VII

Держави, які беруть участь в діяльності з дистанційного зондування, надають технічну допомогу іншим зацікавленим державам на взаємно погоджених умовах.

#### Принцип VIII

Організація Об'єднаних Націй і відповідні установи системи Організації Об'єднаних Націй сприяють міжнародному співробітництву, включаючи технічну допомогу і координацію в галузі дистанційного зондування.

#### Принцип IX

Відновідно до статті IV Конвенції про реєстрацію об'єктів, які запускаються в космічний простір, і статті XI Договору про принципи діяльності держав в дослідження та використанні космічного простору, включаючи Місяць та інші небесні тіла, держава, яка здійснює програму дистанційного зондування, інформує Генерального секретаря Організації Об'єднаних Націй. Крім того, вона забезпечує максимально можливий і практичний доступ до будь-якої

іншої відповідної інформації будь-якій іншій державі, зокрема країнам, що розвиваються, до яких причетна ця програма, на їхнє прохання.

#### Принцип X

Дистанційне зондування має сприяти охороні навколошнього природного середовища Землі. З цією метою держави, які беруть участь в діяльності з дистанційного зондування і які встановили, що в їх розпорядженні є інформація, що здатна запобігти будь-якій шкоді для навколошнього природного середовища Землі, сповіщають про цю інформацію відповідним державам.

#### Принцип XI

Дистанційне зондування має сприяти захисту людства від стихійного лиха. З цією метою держави, які беруть участь в діяльності з дистанційного зондування і які встановили, що у їх розпорядженні є опрацьовані дані та проаналізована інформація, що можуть бути корисними для держав, які постраждали від стихійного лиха, що насувається, передають такі дані та інформацію відповідним державам за можливістю в найкоротші строки.

#### Принцип XII

Після отримання первинних даних і оброблених даних по території, яка знаходитьсь під юрисдикцією держави, що зондується, її негайно надається доступ до них на недискримінаторній основі і на помірних умовах оплати. Держави, що зондується, надається також доступ до проаналізованої інформації на території, що знаходитьсь під її юрисдикцією, якою володіє будь-яка держава, що бере участь в діяльності з дистанційного зондування на тій же основі і на тих же умовах, особливо беручи до уваги потреби та інтереси країн, що розвиваються.

#### Принцип XIII

Для заохочення і активізації міжнародного співробітництва, особливо з врахуванням потреб країн, що розвиваються, держава, яка здійснює дистанційне зондування Землі з космічного простору, вдається, за проханням, до консультацій з державою, територія якої зондується, з метою надання можливостей участі і збільшення одержаних від цього взаємних вигод.

#### Принцип XIV

Відповідно до статті VI Договору про принципи діяльності держав по дослідження і використанню космічного простору, включаючи Місяць та інші

небесні тіла, держави, які експлуатують супутники дистанційного зондування, несуть міжнародну відповідальність за свою діяльність і забезпечують, щоб така діяльність провадилась згідно з цими принципами і нормами міжнародного права, незалежно від того, чи здійснюється вона урядовими органами чи неурядовими юридичними особами або в межах міжнародних організацій, членами яких є такі держави. Цей принцип не обмежує застосування норм міжнародного права про відповідальність держав у тому, що стосується діяльності з дистанційного зондування.

#### Принцип XV

Будь-який спір, який виникає з застосування цих принципів, вирішується за допомогою встановлених процедур мирного врегулювання спорів.

#### **ПРИНЦИП ОБМІNU ДАНИМИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ГЛОБАЛЬНИХ ЗМІН, ЩО СХВАЛЕНІ КОМІТЕТОМ СУПУТНИКОВОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗЕМЛІ**

На шостому пленарному засіданні (Лондон, 1992 р.) Комітету супутникового спостереження Землі (CEOS — Committee on Earth Observation Satellites) було прийнято резолюцію про принципи обміну супутниковими даними для підтримки досліджень глобальних змін, в якій зазначено наступне:

визначаючи, що члени CEOS активно підтримують зусилля міжнародної наукової спільноти щодо моніторингу та досліджень з глобальних змін клімату і оточуючого середовища, а також сприяють локальним та регіональним дослідженням у використанні даних спостереження Землі, оперативному моніторингу навколошнього середовища і комерційній діяльності;

схвалюючи інвестиції, що роблять уряди та міжнародні агентства для підтримки досліджень і моніторингу глобальних змін (клімату), значимість не супутниковых даних для цих програм;

приймаючи до уваги, що приймання, обробка та використання даних, особливо супутниковых, є значими інвестиціями, а дані мають вартість;

признаючи, що замовники та користувачі даних повинні схвалювати ці інвестиції та затрати;

признаючи існування різних політичних цілей, таких як максимальне використання даних з усіх джерел і непостійність фінансової відповідальності перед користувачами для деяких систем дистанційного зондування чи інших джерел;

усвідомлюючи, що успіх в дослідженнях глобальних змін (клімату), навколошнього середовища та

моніторингу потребують подального створення та експлуатації комплексів для отримання, завірки, описання, доступу і розповсюдження високоякісних та довготермінових даних для більшості супутниковых спостережень;

очікуючи потенційну вигоду від сумісності політик та механізмів для обміну інформацією щодо отримання доступу до глобальних даних;

знову підтверджуючи зобов'язання членів CEOS відносно головних принципів не дискримінаційного доступу до даних;

визнаючи важливість відповідного законодавчого забезпечення для обміну даними дистанційного зондування;

визнаючи, що загальна мета усіх місій у забезпечені на стабільній основі даними для досліджень глобальних змін, відображається першочергово у найповнішому врахуванні вимог користувачів;

визнаючи також, що обмеженість діючих місій та доступних ресурсів може потребувати різних механізмів для обміну (забезпечені) даними у відповідних програмах,

члени CEOS підтверджують наступні принципи відносно обміну супутниковими даними для підтримки досліджень та моніторингу глобальних змін (клімату) і оточуючого середовища та погоджуються працювати у напрямку їх найповнішого застосування і розширення. Принципи щодо обміну іншими даними і тими, що використовуються не для досліджень та моніторингу глобальних змін (клімату) і оточуючого середовища, будуть розроблені за підтримки CEOS в подальшому.

1) Необхідний захист всіх потреб у даних для довготермінових досліджень та моніторингу глобальних змін (клімату) і оточуючого середовища.

2) Архіви даних повинні включати легко доступну інформацію про їхні атрибути, в тому числі оцінку якості, підтримуючи допоміжну інформацію, довідку і допомогу відносно розміщення та отримання даних.

3) Міжнародні стандарти, включаючи ті, що запропоновані робочою групою CEOS з даних, повинні бути використані для більш значного розширення можливостей засобів запису (накопичення), обробки та передачі даних.

4) Фундаментальною ціллю є максимальне використання супутниковых даних. Суттєвим кроком до цього є механізм обміну (розповсюдження) їх серед членів CEOS.

5) Суттєве значення має недискримінаційний доступ не членів CEOS до супутниковых даних для досліджень та моніторингу глобальних змін (клімату) і оточуючого середовища. Це повинно бути досягнуто в рамках механізмів обміну та розпов-

сюдження, установлених членами CEOS.

6) Програми не повинні мати виключний період використання даних. В разі необхідності забезпечення завірки даних початковий період їх виключного використання повинен бути обмеженим і детально визначеним. Метою повинно бути забезпечення даними, хоча б в попередніх формах, протягом 3 місяців з початку організації їх приймання.

7) Критерії та пріоритети для приймання, архівації та коригування даних повинні бути гармонізованими.

#### **ПРИНЦИПИ CEOS СТОСОВНО ОПЕРАТИВНИХ ДАНИХ ПРО НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ**

На восьмому пленарному засіданні CEOS, що проходило у вересні 1994 року в Берліні (делегація від НКАУ брала участь), була схвалена (за виключенням представників, що утримались від Європейської організації з експлуатації метеорологічних супутників — EUMETSAT) резолюція з принципів забезпечення оперативними супутниковими даними про навколошнє середовище для підтримки їх використання в інтересах суспільства:

визнаючи, що як супутникові, так і інші дані потенційно мають економічне та соціальне значення, що вони є важливими для оперативної діяльності з навколошнього середовища, а постійне приймання, обробка та надання даних потребують інвестицій і затрат;

визнаючи, що в багатьох національних та міжнародних контекстах підтримка систем спостереження і наскрізного обслуговування користувачів є першочерговою вимогою щодо повноти та оперативності їхнього використання в інтересах суспільства;

визнаючи, що при забезпеченні даними повинні прийматися до уваги користь від розширення сфер використання даних, а також інвестиції та ціни;

визнаючи, що дані спостереження Землі, особливо супутникові, є необхідними для державних та громадських адміністрацій, а також відповідних міжнародних організацій для виконання ними своїх основних функцій, таких як захист і збереження людського життя, планети Земля та майна від впливу природних катастроф, неприятливих погодних умов, небезпечного навколошнього середовища і підтримки управління покращанням довкілля;

визнаючи більш ніж 100-річну кооперацію міжнародного метеорологічного співтовариства на принципах безкоштовного і не обмеженого обміну базовими метеорологічними даними;

передбачаючи формування оперативних вимог від систем глобального спостереження, таких як система глобального спостереження клімату (GCOS), система глобального спостереження океанів (GOOS), система глобального спостереження територій (GTOS);

визнаючи значення зворотного зв'язку від користувачів для покращання відповідального забезпечення даними;

визнаючи існування різних законодавчих процедур для забезпечення даними і різних політик на ціні та права власності щодо даних;

передбачаючи потенційну вигоду від конкуренції політик і механізмів у забезпеченні та доступу до даних з метою оперативного використання для поліпшення навколошнього середовища;

підтверджуючи зобов'язання членів CEOS відносно головного принципу щодо недискримінаторичного доступу до даних;

визнаючи загальну мету всіх відповідних місій у забезпеченні даними для оперативного використання в інтересах суспільства;

визнаючи також, що вимоги операторів космічних систем і доступні ресурси можуть потребувати різних механізмів у забезпеченні даними для різних програм,

члени CEOS підтвердили наступні принципи щодо забезпечення даними для оперативного використання в інтересах суспільства і погодилися працювати у напрямку їхнього повного запровадження всіма доступними можливостями.

1) Критерій та пріоритети для приймання даних, обробки, розповсюдження, захисту, архівації і упорядкування повинні бути узгоджені з вимогами користувачів до оперативного використання даних про навколошнє середовище в інтересах суспільства.

2) Оперативне використання даних про навколошнє середовище в інтересах суспільства як в реальному часі, так і з архівів, повинно виконуватися у часових масштабах, що сумісні з вимогами користувачів та можливостями агентств.

3) Забезпечення даними в рамках CEOS, наприклад через міжнародну довідкову мережу (CEOS International Directory Network), повинно супроводжуватися легким доступом до інформації про параметри даних і відповідних місій, включенням якісних оцінок, підтримкою службової інформації, додатковою допоміжною інформацією про місце знаходження та умови отримання даних.

4) Визнаючи стандарти, що спільно прийняті та розроблені, в тому числі і робочими групами CEOS, які повинні якомога ширше запроваджуватися для запису чи зберігання, обробки та передачі даних.

5) Для оптимального використання оперативних даних про навколошне середовище в інтересах суспільства, члени CEOS повинні засновувати відповідний механізм забезпечення даними.

6) Програми не повинні мати періоду виключного використання даних, крім випадків, коли необхідно забезпечити їх завірку (валідацію). Початковий період виключного використання даних повинен бути обмежений і детально визначений. Метою повинно бути надання даних в деякій попередній формі протягом трьох місяців після початку їхнього приймання в установленому порядку.

## ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМІНІВ

**«Забезпечення даними»** — розповсюдження даних серед членів (агентств) CEOS та останніми для всієї спільноти користувачів.

**«В інтересах суспільства»** — прагнення урядових чи громадських суб'єктів до соціальних і їм подібних цілей.

**«Недискримінаційний доступ до даних»** — всі користувачі згідно із чітко визначеною категорією отримують дані на однакових умовах і в ті ж самі терміни, а всі потенційні користувачі будуть включатися в категорії доступу до даних, що визначені таким же чином.

**«Використання оперативних даних про навколошне середовище в інтересах суспільства».** Під цим визначенням розуміється наступне:

- використання даних для забезпечення регулярного спостереження за навколошнім середовищем в інтересах суспільства;
- проведення державними, національними чи міжнародними агентствами спостереження Землі на підтримку інтересів суспільства, або іншими організаціями, що уповноважені державними чи громадськими органами влади;
- приклади, що включають використання даних для спостереження і прогнозування навколошнього середовища, або дій, що пов'язані з управлінням чи регулюванням навколошнього середовища.

**«Реальний час»** — доступ до даних шляхом безпосереднього приймання, або ж одразу після приймання і (або) попередньої обробки.

**«Підтримка»** — довготермінове забезпечення (що підтримується відповідною стратегією заміни), доступність і здібність до адаптації щодо потреб користувачів, які розвиваються.

## ПРИНЦИПИ ОБМІNU ДАНИМИ ПАРТНЕРІВ З МІЖНАРОДНОЇ СИСТЕМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗЕМЛІ

Дані партнерів (США, Японія, Канада, Європа) з міжнародної системи спостереження Землі (IEOS — International Earth Observing System), доступні для:

- мирних цілей;
- використання кожним членом IEOS;
- некомерційного використання;
- прикладного, оперативного використання та для досліджень;
- за якомога нижчими цінами.

Принципи з обміну даними згідно цього документу є одинаковими як для членів IEOS (узагальнені поняттям «агентства»), так і для інших користувачів. Ці чотири агентства є відповідальними за програми спостереження Землі для міжнародної космічної станції, і вони ж уповноважені за впровадження принципів серед організацій-операторів, тісно взаємодіючи з ними.

Агентства — це:

- Європейське космічне агентство (ESA) разом з Європейською організацією з експлуатації метеорологічних супутників (EUMETSAT);
- Національна адміністрація з космічних досліджень США (NASA) разом з Національною адміністрацією з океанологічних і атмосферних досліджень США (NOAA);
- Японське агентство з науки і технологій (STA) разом з Національним космічним агентством Японії (NASDA), Міністерством зовнішньої торгівлі і промисловості Японії (MITI), Японським агентством навколошнього середовища (JEA), Японським метеорологічним агентством (JMA);
- Канадське космічне агентство (CSA).

На поточний час до складу IEOS віднесені платформи, оснащені приладами для спостереження Землі, згідно із відповідним планом:

- система спостереження Землі (EOS) NASA, починаючи з супутника EOS AMI;
- супутник ENVISAT-1, що є елементом програми ESA під назвою POEM (Polar Orbit Earth Observation Mission);
- оперативні полярно-орбітальні супутники NOAA (POES — Polar orbiting Operational Environmental Satellites), починаючи з NOAA-N;
- японська система спостереження Землі (JEOS), починаючи з супутника ADEOS (Advanced Earth Observing Satellite);
- спільний NASA і Японії супутник TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission).

Цих принципів агентства будуть дотримуватись також щодо майбутніх місій для спостереження Землі в рамках IEOS, а будь-які інші агентства можуть приєднатися до цієї системи. За одностайною згодою всіх агентств, той, хто увійшов зі своїм елементом до IEOS, повинен дотримуватися цих принципів обміну даними. Нижче наведені принципи є критерієм доступу і використання даних з вище зазначених платформ. Приклади використання будуть схвалені сторонами у відповідному плані IEOS, де будуть також приведені узгоджені агентствами детальні визначення і умови для практичного використання цих принципів. Наведені визначення принципів обміну даними вважаються складовою частиною зазначеного плану і будуть потрібні для коректного використання в усіх угодах та співробітництві стосовно IEOS.

1. Всі дані IEOS будуть доступні для мирних цілей всім користувачам на недискримінаційній основі і своєчасно.

2. Не буде періоду виключного (ексклюзивного) використання даних. Коли потрібно забезпечити завірку (валідацію) даних, всякий початковий період виключного використання даних повинен бути обмеженим і детально визначеним. Метою повинно бути надання даних від приладів в деякій попередній формі протягом трьох місяців після початку їх штатного приймання.

3. Всі дані IEOS будуть доступні для використання кожним агентством і вони надаються користувачам за якомога нижчою ціною для некомерційного використання в наступних категоріях: дослідження, прикладне і оперативне використання в інтересах суспільства.

4. Агентства, які визначають користувачів для науково-прикладного використання, будуть діяти через угоду про взаємодопомогу чи подібний процес. У визначені повинні вказуватися дані, які будуть надаватися. Користувачі-дослідники повинні надавати свої результати для опублікування в науковій літературі, а користувачі-практики повинні публікувати свої результати в технічному звіті, а ті і другі повинні надавати свої результати уповноваженому агентству і тому, яке надає дані.

5. Будь-яке із агентств має право уповноважити національніх користувачів відповідних країн чи членів агентств мати доступ до всіх даних IEOS за якомога нижчими цінами для некомерційного оперативного використання в інтересах суспільства, забезпечивши при цьому уповноваженим агентства прийняття на себе гарантій щодо цих визначень та умов використання даних. Звіт про це використання буде надаватися агентству, яке постачає дані, на основі простого узгодженого критерію, що включає

тип, галузь і остаточне призначення даних. Уповноваження користувачів, що знаходяться за межами національної території агентства чи їхніх членів (наприклад, міжнародні організації і агентства в країнах, що не є членами), для некомерційного оперативного використання в інтересах суспільства, буде здійснюватися тільки зі згоди агентства, що постачає дані.

6. Для інших цілей, ніж зазначені в п. 3, відповідні дані будуть забезпечуватися у відповідності з визначеннями і умовами, що обумовлюються агентством, яке їх надає.

7. Кожне агентство, яке надає дані, буде максимально виконувати вимоги щодо даних інших агентств і їхніх уповноважених користувачів. У тих випадках, коли вимоги щодо даних виходитимуть за межі можливостей агентства, яке їх надає, останнє та агентство-користувач будуть намагатися досягти альтернативних можливостей у виконанні таких вимог.

8. Всі дані, що замовляються агентствами та їхніми уповноваженими користувачами, будуть надаватися на умовах, що той, хто їх отримує, погоджується дотримуватися визначень і умов щодо прав на інтелектуальну власність та (або) пріоритету прав згідно з цими принципами обміну даними, а також гарантій, що без письмової згоди агентства, яке надає дані, вони не будуть розповсюджуватися неуповноваженим сторонам і не будуть використовуватися іншими шляхами, ніж ті, що були визначені для даних.

9. Будь-яке агентство може делегувати деякі свої функції іншим організаціям, але в цьому випадку воно буде залишатися відповідальним за дотримання цих принципів обміну даними.

10. Агентства будуть гармонізувати критерій та пріоритети для отримання даних, архівації і очищення, консультуючись з іншими відповідними організаціями.

В контексті цих принципів використовуються наступні визначення.

• **Прикладні використання даних** обмежуються загальними дослідженнями у відношенні:

1) виконанням прикладної програми, що демонструє використання даних, або

2) демонстрацією оперативного використання даних.

• **Дані**, що отримуються безпосередньо з датчика (сенсора) для спостереження Землі та продукція вищого рівня, створена з них агентством, яке надає дані, стають зразками продукції.

• **Агентство**, яке надає дані, — це агентство, що першочергово відповідає за розповсюдження даних з відповідного інструмента чи є власником

- таких даних. Агентство, яке надає дані забезпечує даними, буде визначатися угодами між оператором платформи, на якій встановлено інструмент, і тим, хто його надає, якщо це дві різні організації.
- **Якомога нижчі ціни для уповноважених користувачів** — це ціни на дані, які не вище тих, що заплановані для режиму нормальної експлуатації, з урахуванням доданої вартості згідно специфічних вимог користувачів. Ці ціни можуть включати вартість носіїв інформації, заробітну плату, витрати на експлуатацію і підтримку обладнання, а також оплату поштового та електронного зв'язку. В зазначені ціни не повинні включатися затрати на дослідження, розробки і собівартість космічного сегменту. Але вони можуть включати прийнятну додаткову ціну, що компенсує запезпечення даними.
  - **Некомерційне використання даних** означає забезпечення ними державні служби, що пов'язані з економічним розвитком окремих чи груп користувачів.
  - **Некомерційне оперативне використання в інтересах суспільства** — це використання даних для забезпечення регулярного обслуговування в інтересах суспільства з метою економічного розвитку окремих користувачів чи груп. Наприклад, це використання даних для спостереження і прогнозування стану навколошнього середовища. Ця діяльність може виконуватися національними чи міжнародними агентствами, або іншими установами, що ними уповноважені для підтримки гро-

мадських інтересів. Агентство, яке забезпечує даними, та (або) уповноважене агентство можуть вимагати від такого користувача надання періодичних звітів, що підтверджують його статус.

- **Недискримінаційна основа** означає, що всі користувачі, які відносяться до чітко визначеної категорії щодо використання даних, можуть їх отримувати на однакових умовах і в ті ж самі терміни, а потенційні користувачі щодо доступу до даних будуть відноситися до відповідних категорій.
- **Використання даних для досліджень** означає їхнє застосування в наукових дослідженнях з метою встановлення фактів чи принципів.

1. Космічне право України: Збірник нормативно-правових актів та міжнародних угод. — 2-е вид., перероб. та доп. / Під ред. О. О. Негоди, Ю. С. Шемшученка. — Київ: Ін Юре, 1999.—264 с.
2. Resources in Earth Observation. — 1998.—CEOS CD-Rom.
3. Towards an Integrated Global Observing Strategy // CEOS Yearbook.—1997.
4. ADEOS Newsletter. — NASDA, 1996.—N 3.
5. Coordination for the next decade // CEOS Yearbook.—1995.

---

#### INTERNATIONAL PRINCIPLES RELATING TO THE REMOTE SONDING OF THE EARTH

V. P. Zubko

We discuss the general international principles which serve as the basis for the acquisition and use of the data from the remote sounding of the Earth from the outer space.

УДК 523.3-852

**Концепція моніторингу газового аерозольного забруднення земної атмосфери (для висот більше 30 км) з борту Міжнародної космічної станції**

**О. В. Мороженко, А. В. Шавріна, О. А. Велесь**

Головна астрономічна обсерваторія ГАО НАН України, Київ

*Надійшла до редакції 01.03.99*

Наближеними модельними розрахунками обґрунтовано ідею, що головну роль в ослабленні потужності озонового шару може відігравати аерозольне забруднення верхніх шарів земної атмосфери, а фреони відіграють другорядну роль. Для задач точного моделювання процесу утворення та знищення озону, а також моніторингу тепличносприятливих газів та екології атмосфери запропоновано концепцію експериментів з борту українського модуля Міжнародної космічної станції. Вони забезпечать можливість отримання інформації про глобальні зміни хімічного складу земної атмосфери, спектральні значення комплексного показника заломлення та розміри стратосферного аерозолю, а також вертикальну структуру газової та аерозольної складових атмосфери та температури. Пропонується встановити два апаратурні комплекси. Один з них (два фур'є-спектрометри на діапазон довжин хвиль  $\lambda = 1.5\ldots 11$  мкм та спектрополяриметр на  $\lambda = 200\ldots 400$  нм) буде націлено в надір. Другий комплекс (також два фур'є-спектрометри на спектральний інтервал  $\lambda = 1.5\ldots 11$  мкм) буде націлено на отримання ослабленого земною атмосферою спектру випромінювання Сонця на різних висотах (з кроком 1—2 км) над земною поверхнею.

В останні роки світову громадськість, і в першу чергу наукову, все відчутніше турбують проблеми екології. Їхні наслідки проявляються не лише у безпосередньому впливі на життєдіяльність живих організмів, але й у змінах клімату та потужності озоносфери. Оскільки шкідливість першого прояву забруднення земної атмосфери майже ні у кого не викликає сумніву, то останні два наслідки відомі лише в досить вузьких наукових колах.

**ПРОБЛЕМА ЗМІНИ КЛІМАТУ**

Як відомо, тепловий режим приповерхневого шару формується балансом теплових енергій

$$\Delta B = B_1 - B_2. \quad (1)$$

Енергія  $B_1$  є результатом взаємодії падаючого на Землю сонячного випромінювання з підстилаючою поверхнею:

$$B = \sigma n^2 T_e^4 = \frac{1}{4R^2} \int_0^\infty E_0(\nu) [1 - A_s(\nu)] d\nu. \quad (2)$$

Енергія  $B_2$  дорівнює кількості випромінюваної теплової енергії Землі у відкритий космос:

$$B_2 = \int_0^\infty B_1(\nu) f(\nu) d\nu, \quad (3)$$

де  $T_e$  — ефективна температура,  $\sigma$  — стала Стефана — Больцмана,  $n$  — показник заломлення середовища,  $E_0$  — сонячна стала,  $R$  — відстань від Сонця до Землі. Величина  $A_s(\nu)$  — це так зване

спектральне значення сферичного альбедо, під яким розуміють відносну долю сонячної енергії, яку розсіяла планета в усі напрямки на частоті  $\nu$ :

$$A_s(\nu) = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha-\pi/2}^{\pi/2} \cos(\alpha - \Omega) \cos \Omega d\Omega \times \\ \times \int_0^{\pi/2} r(\mu_0, \mu, \varphi, \nu) \cos \psi d\psi. \quad (4)$$

Тут  $\mu_0, \mu, \varphi$  — відповідно косинуси кутів падіння та відбивання світла та азимутальний кут між площинами, в яких знаходяться падаючий та відбитий промені. Коефіцієнт відбивання світла системою «підстилаюча поверхня + атмосфера» визначається формулою

$$r(\mu_0, \mu, \varphi, \nu) = \\ = r_s(\Omega, L, \nu) T(\mu_0, \mu, \varphi, \tau_0(\nu), \omega(\nu), \chi(\alpha, \nu)) + \\ + r_a(r_s(\Omega, L, \nu), \mu_0, \mu, \varphi, \tau_0(\nu), \omega(\nu), \chi(\alpha, \nu)), \quad (5)$$

де  $(r_s(\Omega, L, \nu)$  — коефіцієнт відбивання підстилаючої поверхні,  $\Omega, L$  — планетоцентричні довгота та широта;  $\tau_0(\nu) = \tau_g(\nu) + \tau_a(\nu)$ ,  $\omega(\nu)$ ,  $\chi(\alpha, \nu)$  — спектральні значення оптичної товщини, альбедо однократного розсіяння та індикаториса розсіяння атмосфери відповідно, (індексами «g» та «a» позначені газова та аерозольна складові);  $T(\mu_0, \mu, \varphi, \tau_0(\nu), \omega(\nu), \chi(\alpha, \nu))$  — функція ослаблення сонячного випромінювання атмосфорою,  $r_a(r_s(\Omega, L, \nu), \mu_0, \mu, \varphi, \tau_0(\nu), \omega(\nu), \chi(\alpha, \nu))$  — коефіцієнт відбивання світла атмосферним стовпом,  $f(\nu)$  — спектральний коефіцієнт ослаблення теплового випромінювання земної поверхні її атмосфорою. У випромінюванні Землі до  $\lambda = 3$  мкм домінуючим є дифузно відбите системою «підстилаюча поверхня + атмосфера» сонячне випромінювання, в діапазоні  $\lambda\lambda = 3...5$  мкм поряд з ще відчутним внеском сонячного випромінювання дас про себе знати й теплове випромінювання земної поверхні, а для  $\lambda > 5$  мкм домінуючим є теплове випромінювання.

Очевидно, що земна поверхня найбільше буде нагріватись тоді, коли: 1) поверхневий шар планети сильно поглинає світло  $\lambda < 3$  мкм; 2) атмосфера планети є чисто газовою та складається з газів, які вільно пропускають короткохвильове випромінювання, але сильно погливають теплове випромінювання, тобто коли  $\tau_g(\lambda) \ll 1$  для  $\lambda < 3$  мкм та  $\tau_g(\lambda) \gg 1$  для  $\lambda > 3$  мкм. Гази, характерною властивістю яких є наявність потужних смуг поглинання у тепловій ділянці спектру, прийнято називати тепличносприятливими.

При досягненні рівноваги між випромінюваною у відкритий космос та отримуваною від Сонця енергіями планета буде характеризуватись так званою

рівноважною температурою  $T_p$ . При відсутності атмосфери ( $f(\nu) \equiv 1$ ) планета буде випромінювати у відкритий космос рівно стільки енергії, скільки вона отримує в процесі поглинання сонячного випромінювання. У цьому випадку рівноважна та ефективна температура будуть мати однакові значення. При наявності атмосфери, гази якої мають потужні смуги поглинання в тепловій ділянці спектру ( $f(\nu) < 1$ ), кількість випромінюваної у відкритий космос теплової енергії буде меншою від тієї, яку планета отримує від Сонця. У цьому випадку рівноважна температура планети буде більшою від ефективної. Саме ефект  $T_p > T_e$  отримав назву тепличного. Так, для Землі завдяки цьому ефекту  $T_p$  приблизно на  $33^\circ$  більша, ніж ефективна. Вра жаючим прикладом дії тепличного ефекту є Венера, температура поверхні якої сягає  $450^\circ\text{C}$ .

Навпаки, аерозольна складова атмосфери ослабляє потужність сонячної енергії, яка досягає поверхні. Внаслідок цього зменшується ефективна температура планети, тобто створюється антитеческий ефект, а у випадку поглинаючого аерозолю — буде нагріватись атмосфера. Яскравим прикладом дії цього ефекту може слугувати Марс в періоди так званих глобальних пилових бур, коли на порядки збільшується аерозольне забруднення атмосфери, протягом кількох днів температура по всій планеті знижується на  $65-70^\circ$  та приблизно на стільки ж підвищується температура атмосфери.

Виробнича діяльність людства, особливо в останні десятиріччя, призвела до збільшення забрудненості земної атмосфери газовими та аерозольними домішками, що позначилось на тепловому режимі атмосфери. З однієї сторони, зареєстровано помітне збільшення концентрації вуглекислого газу, яке корелює зі збільшенням глобальної температури Землі (див., наприклад, [7]). Це означає, що на Землі посилюється тепличний ефект. В той же час збільшення аерозольного забруднення має антитеческий ефект, а тому повинні дещо послаблюватись темпи збільшення температури. Парадоксально, але від катастрофічних наслідків посилення тепличного ефекту Землі до деякої міри рятує збільшення аерозольного забруднення. Проте не виключено, що у відповідний момент може порушитись хитка рівновага тепличного та антитеческого ефектів і може наступити або нестримне потепління, або навпаки, похолодання.

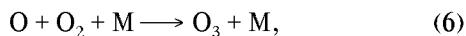
Різні складові атмосфери (газові та аерозольна) мають різну стратифікацію по висоті, що формує не лише вертикальний профіль температури, але й динамічні процеси в атмосфері, у тому числі й з катастрофічними наслідками, що є ще однією з граней проблеми зміни клімату.

## озон

Відносно тонкий озоновий шар (еквівалентний приблизно 2.5 см-атм) практично повністю поглинає сонячне випромінювання в діапазоні довжин хвиль  $\lambda = 200\ldots300$  нм, а тому він, з однієї сторони, відповідальний за нагрівання стратосфери, а з другої — захищає багато форм життя, в тому числі й молекул ДНК, від вбивчої дії УФ-випромінювання. Через це проблема озону посідає особливе місце не лише у вивчені фізики та динаміки земної атмосфери, але й у біології.

Наявність озону в земній атмосфері завдячує специфічним хімічним властивостям земної атмосфери. Подібно до життя, в значних кількостях він наявний лише на Землі. Озон утворюється у досить простих хімічних та фотохімічних реакціях в атмосфері, найважливіші з яких приведено нижче [3].

Оскільки озон утворюється у процесі реакції потрійних зіткнень атомарного та молекулярного кисню



де  $\text{M}$  — довільна третя молекула, то основним джерелом поповнення атмосфери необхідним для реакції атомарним киснем є фотодисоціація молекулярного кисню в процесі поглинання сонячного випромінювання:



(порогова енергія дисоціації  $h\nu_0 = 5.117$  еВ). Коефіцієнт, а вірніше швидкість потрійного зіткнення (6) становить

$$k_{12} = 1.1 \cdot 10^{-34} \exp[510/T] \text{ см}^6/\text{с}.$$

Реакція (7) означає, що при поглинанні фотона, в залежності від його енергії, молекула А переходить у збуджений стан  $\text{A}^*$ , який може бути обертовим, коливальним чи електронним, або буде відповідати умовам, при яких відбуваються процеси дисоціації чи іонізації молекули. Швидкість утворення збуджених молекул визначається рівнянням

$$d[\text{A}^*]/dt = A \int_{\nu_0}^{\infty} E_\nu \exp[-(\tau_0^g(\nu) + \tau_0^a(\nu))/\mu] \alpha d\nu \equiv [A]J, \quad (8)$$

де  $[\text{A}^*]$  та  $[A]$  — об'ємні концентрації збуджених та незбуджених молекул відповідно,  $E_\nu$  — інтенсивність сонячного випромінювання на верхній межі атмосфери,  $\nu_0$  — частота, яка відповідає пороговій енергії для реакції фотодисоціації,  $\tau_0^g(\nu) = \tau_p^g(\nu) + \tau_n^g(\nu)$  та  $\tau_0^a(\nu) = \tau_p^a(\nu) + \tau_n^a(\nu)$  — оптичні товщини газової та аерозольної складових атмосфери як

суми розсіюючих та поглинаючих складових оптичної товщини,  $\alpha$  — монохроматичний коефіцієнт поглинання даного газу;  $J$  — швидкість фотодисоціації, при розрахунках якої до цього часу враховувалась лише газова складова атмосфери.

Крім реакції фотодисоціації, в збуджений стан молекула може перейти за рахунок двокомпонентних та трикомпонентних зіткнень:



Швидкість реакції (9)  $d[\text{C}]/dt$  визначається як

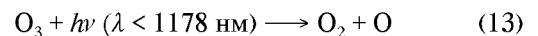
$$d[\text{C}]/dt = [\text{A}] [\text{B}] \int \int Q_{AB}(g) f_A(v_A) f_B(v_B) g d^3 v_A d^3 v_B \equiv [A] [B] k_{AB}, \quad (11)$$

де  $Q_{AB}(g) \approx 5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$  — ефективний переріз зіткнення двох молекул,  $f_A(v_A)$  та  $f_B(v_B)$  — нормовані функції розподілу швидкостей молекул  $v_A$  та  $v_B$ , а  $g$  — відносна скалярна швидкість зіткнення. Для трикомпонентних

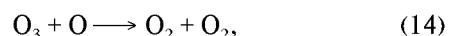
$$d[\text{C}]/dt = [\text{A}] [\text{B}] [\text{M}] k_{ABM}. \quad (12)$$

Очевидно, що через низьку концентрацію всіх інших молекул, у склад яких входить кисень, у тому числі й вуглекислого газу, фотодисоціаційні реакції, у процесі яких утворюється атомний кисень, відіграють другорядну роль.

Основними реакціями знищення молекул озону є також реакції фотодисоціації:



( $h\nu_0 = 1.052$  еВ) та



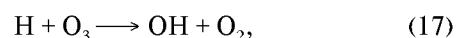
для якої  $k_{13} = 1.1 \cdot 10^{-11} \exp[-2150/T] \text{ см}^3/\text{с}$ . Протягом відповідного часу між озоном та молекулярним киснем встановлюється рівновага, яка визначається відношеннями

$$[\text{O}_3]/[\text{O}_2] \approx (k_{12} J_2 [\text{M}]/k_{13} J_3)^{1/2} \quad (15)$$

вде  $J_2$  та  $J_3$

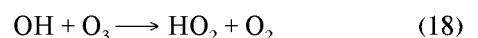
$$[\text{O}_3]/[\text{O}_2] \longrightarrow (k_{12} [\text{M}]/k_{13}) \quad (16)$$

вночі. До знищення озону призводять реакції

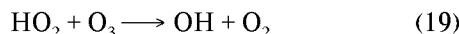


для якої коефіцієнт зіткнення

$$\alpha_{10} = 1.2 \cdot 10^{-10} \exp[-560/T] \text{ см}^3/\text{с};$$

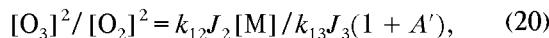


при  $\alpha_{11} = 1.6 \cdot 10^{-12} \exp[-1000/T] \text{ см}^3/\text{с}$



при  $\alpha_{12} = 1 \cdot 10^{-13} \exp[-1250/T] \text{ см}^3/\text{с}$ .

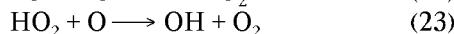
Рівняння рівноваги має вигляд



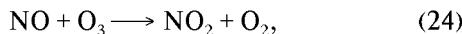
де

$$A' = (\alpha_{13} [\text{OH}] + \alpha_{14} [\text{HO}_2]) / 2k_{13} [\text{O}_3], \quad (21)$$

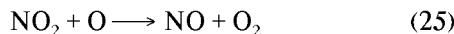
а відповідні коефіцієнти  $\alpha_{13} = (5 \mp 2) \cdot 10^{-11} \text{ см}^3/\text{с}$ ,  $\alpha_{14} = (4 \mp 3) \cdot 10^{-11} \text{ см}^3/\text{с}$  для реакцій



При урахуванні реакцій з окислами азоту



$\beta_{27} = 1.2 \cdot 10^{-12} \exp[-1250/T] \text{ см}^3/\text{с}$ ;



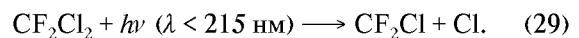
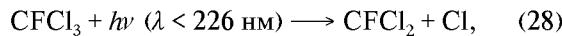
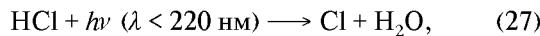
$\beta_{28} = 9.3 \cdot 10^{-12} \text{ см}^3/\text{с}$ .

та іншими газами поправочний член в рівнянні рівноваги (20) записується у вигляді

$$A' = (\alpha_{13} [\text{OH}] + \alpha_{14} [\text{HO}_2] + 2\beta_{28} [\text{NO}_2]) / 2k_{13} [\text{O}_3]. \quad (26)$$

Перша інформація про зменшення потужності озоносфери з'явилась у 1985 р. [7], згідно з якою в 1980 р. над Антарктикою спостерігалась так звана озонова дірка. Переобробка попередніх спостережень показала, що явище зменшення потужності озоносфери прослідковується щонайменше до 1970 р. [16, 18]. Виявилось, що в дійсності концентрація озону зменшується (до 10 %) для висот більше 10 км, тоді як у нижній тропосфері має місце приблизно таке ж саме збільшення. Дещо пізніше зменшення потужності озонового шару було зареєстроване над Європейським та Американським континентами. Ці зміни було приписано головним чином збільшенню газового забруднення атмосфери, у першу чергу — фреонами. Не піддаючи сумніву руйнівного впливу цих складових, ми все ж відводимо їм другорядну роль, а на перше місце ставимо аерозольне забруднення верхніх шарів земної атмосфери [14].

Як відомо, самі по собі фреони не взаємодіють з озоном, а руйнівну роль відіграє атом хлору, який у реакції фотодисоціації відривається від молекул:



Як видно, для цих реакцій необхідна взаємодія з більш енергетичними квантами, ніж для реакцій фотодисоціації кисню, а тому лише через значну спектральну залежність оптичної товщини атмосфери значення коефіцієнтів  $J$  для цих реакцій будуть меншими, ніж для молекул кисню. Якщо при цьому врахувати, що поки що концентрація молекул фреонів на багато порядків нижча, ніж молекул кисню, то слід очікувати, що продуктивність утворення атомарного хлору на багато порядків буде нижчою, ніж продуктивність створення молекул озону, а тому поки що вряд чи слід очікувати зумовлених фреонами суттєвих змін потужності озонового шару.

Оскільки швидкість утворення збуджених молекул визначається розподілом енергії в спектрі Сонця та спектральними значеннями коефіцієнта екстинкції земної атмосфери, то їхні варіації відповідно відгукнуться на стані озоносфери. Так, зараз можна вважати встановленим наявність періодичних варіацій потужності сонячного випромінювання в далекій УФ-ділянці спектру [3], які можуть привести до періодичних змін потужності озоносфери у межах 3 % [10]. Очевидно, що ці зміни за величиною не відповідають зареєстрованим та не можуть забезпечити неперервність ефекту зменшення потужності озонового шару в часі. Це й наштовхнуло нас на думку, що основним чинником зміни потужності озоносфери є стратосферний аерозоль. Повторюючи попередню нашу роботу [14], зупинимось на якісному обґрунтуванні цієї проблеми.

Зараз вже не викликає сумніву наявність стратосферного аерозолю, а також не виключена тенденція збільшення його оптичної товщини з часом (див. [8]). Очевидно, що врахування аерозольної складової призведе до зменшення значень коефіцієнтів  $J_i$ .

Як відомо, для дрібного аерозолю (а саме такі частинки тривалий час можуть утримуватись у верхніх шарах атмосфери), значення оптичної товщини досить сильно збільшується зі зменшенням довжини хвилі. Так, при середньому радіусі частинок 0.1 мкм лише розсіююча складова оптичної товщини при переході від довжини хвилі  $\lambda = 1178 \text{ нм}$  до  $\lambda = 242 \text{ нм}$  збільшиться приблизно в 50 разів. А якщо врахувати, що практично для всіх мінералів, а також значного класу конденсатів (наприклад сірчаної кислоти) показник заломлення є комплексним, а уявна його частина сильно збільшується зі зменшенням довжини хвилі (прнаймні, для довжин хвиль  $\lambda < 400 \text{ нм}$ ), то значення повної

оптичної товщини буде показувати ще сильнішу спектральну залежність.

Внаслідок сильної спектральної залежності оптичної товщини стратосферного аерозолю (особливо в УФ-променях) зменшення значення коефіцієнта швидкості фотодисоціації молекули буде сильнішим для тих газів, збудження яких відбувається при взаємодії з більш короткохвильовим фотоном. Це означає, що збільшення оптичної товщини атмосфери, з однієї сторони, зменшить темпи дисоціації як кисню, так і озону. Але для кисню це зменшення буде значно більшим, а тому темп утворення молекул озону уповільниться значно більше, ніж згадане зменшення темпу дисоціації останнього. Через це в кінцевому результаті концентрація стратосферного озону зменшиться, а згадана вище рівновага між озоном та молекулярним киснем вдень (вираз (15)), буде досягнута при менших концентраціях  $[O_3]$ . Тобто, зменшення потужності озоносфери буде відбуватися не за рахунок руйнації останнього, а за рахунок зменшення продуктивності його утворення.

Тепер кілька слів про широтну залежність зміни потужності озоносфери. Як неважко переконатись, зміна сонячної активності практично однаково відбувається на зміні коефіцієнта  $J$  на всіх значеннях косинуса кута падіння світла, тобто, не буде змінюватися з широтою. Інша ситуація буде при збільшенні оптичної товщини. Як випливає з (8), величина зміни цього коефіцієнта буде залежати від широти. Можливо, що саме через це ефект зменшення потужності озоносфери вперше проявився в екологічно чистому районі — Антарктиці.

Збільшення аерозольного забруднення верхніх шарів атмосфери також послаблює руйнівну силу (відносно озону) фреонів. Це зумовлено тим, що основні реакції зі створення в атмосфері атомарних хлору та фтору проходять при взаємодії з фотонами  $\lambda < 226$  нм, тобто швидкості цих реакцій зменшаться навіть більше, ніж для молекулярного кисню.

Доцільно відзначити ще один повністю не вивчений аспект впливу аерозолю на процеси утворення та руйнування озону. Він пов'язаний зі зміною теплового режиму в озоносфері та взаємодії атомів та молекул, в першу чергу кисню та озону, з аерозольними частинками. Зараз навіть якісно ми не можемо визначити ефекти такого впливу.

Імовірними джерелами аерозольного забруднення можуть бути як природні, так і антропогенні чинники. До перших відноситься забруднення верхніх шарів атмосфери метеоритними частинками та продуктами виверження вулканів (дрібні частинки та газові складові, які сприяють утворенню краплинок сірчаної кислоти). Підтвердженням цього слугує

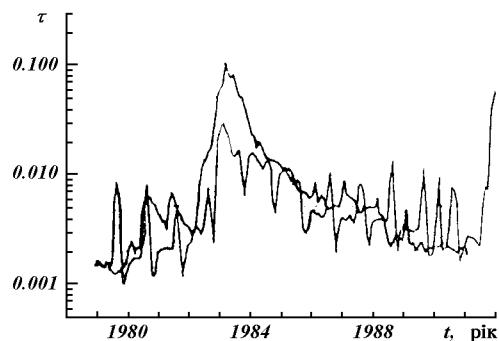


Рис. 1. Зміна в часі оптичної товщини стратосферного аерозолю над Антарктикою на довжині хвилі 1 мкм [5]

рис. 1 [8], на якому приведені результати визначення оптичної товщини аерозолю над Антарктикою на довжині хвилі  $\lambda = 1$  мкм, отримані зі спостережень покриття Сонця верхніми шарами атмосфери з борту КА «Німбус-7» з 1979 по 1991 рр. Мінімальне значення  $\tau_0$  збільшилось приблизно в 1.5 рази. Крім того, після виверження вулканів Ель-Хіхон в 1982 р. та Маунт Хадсон і Маунт Пінатубо в 1991 р.  $\tau_0$  збільшилось майже на два порядки. До других відносяться продукти та похідні продуктів згоряння топлива на різних підприємствах, у двигунах висотних літаків та ракет, пожежі на нафтосховищах, сміття, яке утворюється при руйнуванні ШСЗ, ударам метеорних тіл з цими тілами та інше. Неважко переконатись, що на висотах більше 30 км дрібний аерозоль (з радіусами менше 0.1 мкм) може утримуватись десятки років, що сприяє його накопиченню.

На сучасному етапі наших знань про аерозольне забруднення верхніх шарів атмосфери не існує реальної можливості строго промоделювати зміну коефіцієнтів  $J$  під впливом аерозольного ослаблення. Строго кажучи, використання експоненти у виразі (8) навіть при чисто газовій атмосфері не зовсім коректне. Для коректнішого моделювання необхідно використовувати функцію пропускання земної атмосфери з урахуванням багатократного розсіяння. Це означає, що у випадку газово-аерозольної атмосфери необхідні (крім даних про газову складову) ще дані про спектральні залежності оптичної товщини, альбедо однократного розсіяння та індикатори розсіяння аерозольної складової, значення яких можна розрахувати лише при наявності даних про спектральні значення комплексного показника заломлення частинок та параметри функції розподілу їх за розмірами. Наскільки нам відомо, такої інформації зараз немає. Через це обґрунтованість нашої ідеї ми вирішили перевірити

Зміна концентрації озону при збільшенні аерозольного забруднення

$\mu$	$[O_3]_a/[O_3]_0, \%$		
	$\tau_a(1 \text{ мкм})$		
	0.001	0.010	0.100
$r_0 = 0.05 \text{ мкм}$			
1.00	96	68	—
0.94	96	66	—
0.64	95	55	—
$r_0 = 0.10 \text{ мкм}$			
1.00	99.6	95.4	60
0.94	99.5	95.1	57
0.64	99.3	93.2	44

досить грубими модельними розрахунками, які виконувались у рамках наступних припущення.

1. Атмосферний шар для висот більше 30 км є оптично однорідним та ізотермічним.

2. Аерозольні частинки є чисто розсіюючими однорідними сферами, а їхня дійсна частина показника заломлення не залежить від довжини хвилі та рівна 1.33.

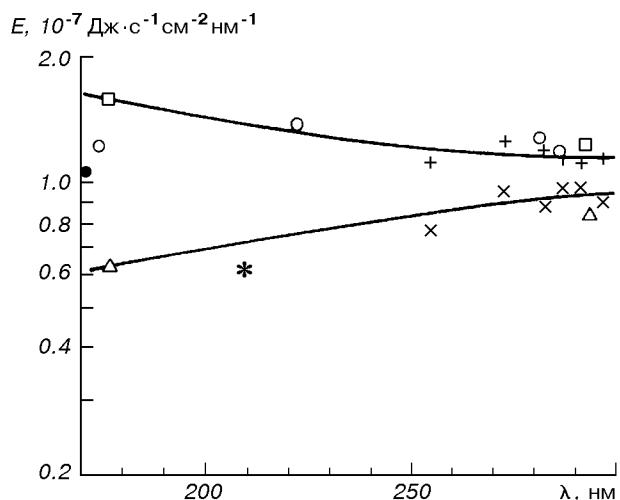
3. Функція розподілу частинок за розмірами описується нормальним-логарифмічним законом

$$N(r)dr = (2\pi\sigma^2)^{-1/2} \exp[-(\ln^2 r/r_0)/2\sigma^2] d\ln r, \quad (30)$$

де  $N(r)$  — кількість частинок радіусом  $r$  в інтервалі  $dr$ ,  $r_0$  — середнє геометричне значення радіуса частинок, а  $\sigma^2$  — дисперсія логарифма радіуса рівна 0.1.

Виходячи з того, що нам не вдалося знайти інформацію про розмір стратосферного аерозолю, то розрахунки велись для двох значень  $r_0$ : 0.05 та 0.10 мкм. Для  $\tau_p^a(1 \text{ мкм})$  приймались значення 0.000, 0.001 та 0.100, а перерахунок на інші довжини хвиль здійснювався на основі спектральної залежності фактора ефективності розсіяння [5]. Для молекул кисню та озону використані значення  $\alpha(\nu)$ , які отримані в роботах [20] та [15] в лабораторних умовах при температурі 230 К зі спектральною роздільною здатністю біля 0.1 нм. Приведені в таблиці результати лабораторного моделювання показують відносну (по відношенню до концентрації озону при чисто газовій атмосфері  $[O_3]_0$ ) зміну концентрації озону при збільшенні аерозольного забруднення.

Як бачимо, збільшення аерозольного забруднення дійсно призводить до зменшення продуктивності утворення молекул озону, а величина зменшення дуже залежить від розміру аерозольних частинок, тобто від спектрального ходу оптичної товщини



на  $\lambda\lambda = 400\ldots2250$  нм (12 фільтрів) з роздільною здатністю в надірі 8 км;

3) фур'є-спектрометр (MINT) на  $\lambda\lambda = 6\ldots40$  мкм зі спектральною роздільною здатністю  $2\text{ см}^{-1}$  та пристовою 8 км в надірі.

У нашому баченні на МКС має бути встановлено два спостережних комплекси. Один з них має включати два фур'є-спектрометри, які перекривали б інтервали довжин хвиль  $\lambda\lambda = 1.0\ldots6.0$  та  $7\ldots11$  мкм (зі спектральною роздільною здатністю  $2\text{ см}^{-1}$  та світлосилою 1:1) та спектрополяриметр оригінальної конструкції Кучерова—Іванова [11] на діапазон довжин хвиль  $\lambda\lambda = 200\ldots400$  нм зі спектральною роздільною здатністю 1 нм. Його призначеннем є моніторинг газового та аерозольного забруднення атмосфери на всьому промені зору, а тому він буде зорієнтований в надір. Другий комплекс також являє собою фур'є-спектрометр з такими ж саме характеристиками, але світлосилою (1/10)—(1/20). Він призначений для реєстрації ослабленого земною атмосферою спектру Сонця на різних відстанях від поверхні планети (з кроком 1—2 км) з метою отримання даних про вертикальну структуру атмосфери (рис. 3).

Оскільки переваги вибраних типів спектрометра та спектрального інтервалу спостережень досить

детально обговорювались в роботі [1], то тут лише відмітимо, що в цій ділянці розташовані смуги поглинання різної потужності практично всіх газів, що стосуються згаданої вище тематики (див. рис. 4). Для цього інтервалу довжин хвиль існує електронна версія банку даних HITRAN [17], в якому є вся необхідна для модельних розрахунків інформація про 37 складових земної атмосфери.

Робочий діапазон спектрополяриметра вибрано у УФ-ділянці спектру, бо основним завданням експерименту є вивчення аерозолю, розташованого вище озонасфери, тобто вище 30 км. Тому спостереження саме при  $\lambda < 310$  нм завдяки озонасфері звільнені від впливу підстилаючої поверхні та тропосферного аерозолю (в тому числі й хмарових шарів). У цьому випадку спостережні спектрополя-

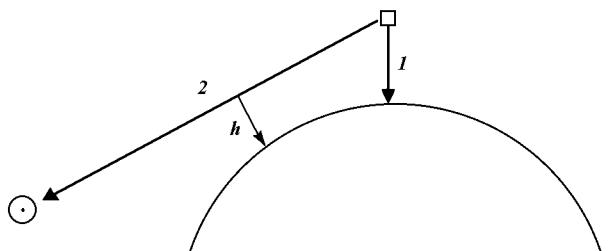


Рис. 3. Схема зондування вертикальної структури атмосфери Землі

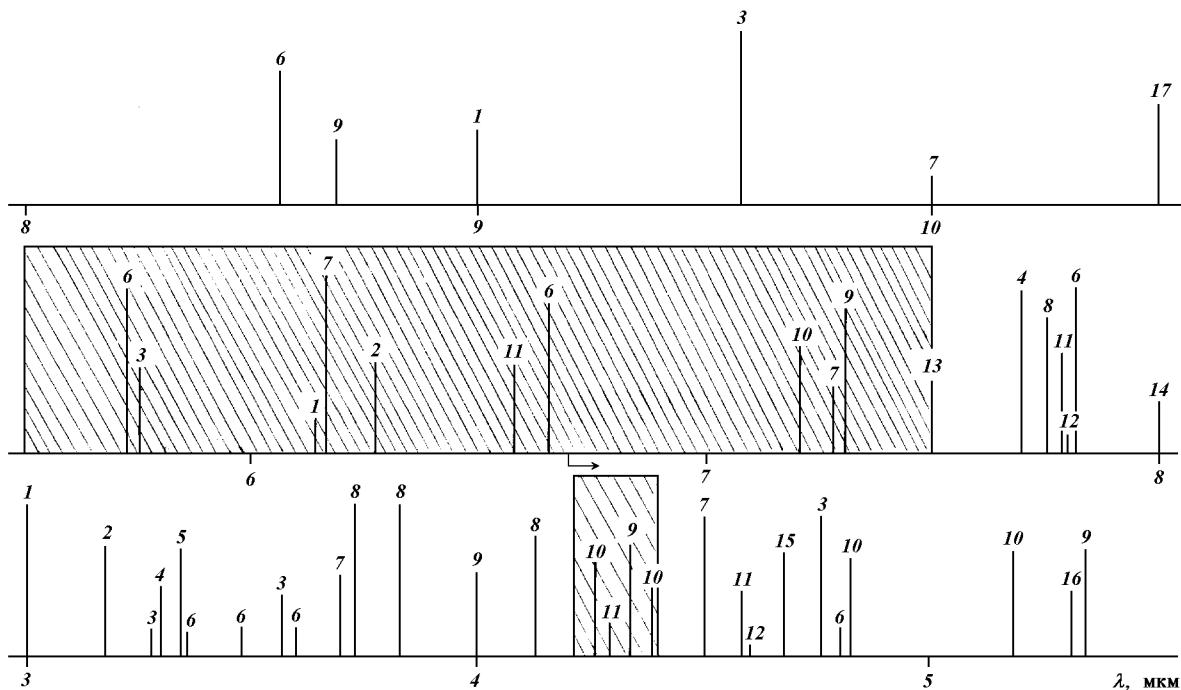


Рис. 4. Положення смуг поглинання різних газів: 1 —  $\text{NH}_3$ , 2 —  $\text{H}_2\text{O}$ , 3 —  $\text{O}_3$ , 4 —  $\text{CH}_4$ , 5 —  $\text{HCl}$ , 6 —  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 7 —  $\text{NO}_2$ , 8 —  $\text{H}_2\text{S}$ , 9 —  $\text{SO}_2$ , 10 —  $\text{CO}_2$ , 11 —  $\text{CS}_2$ , 12 —  $\text{N}_2\text{O}$ , 13 —  $\text{HNO}_3$ , 14 —  $\text{H}_2\text{O}_2$ , 15 —  $\text{CO}$ , 16 —  $\text{NO}$ , 17 —  $\text{C}_2\text{H}_2$ . У спектральному діапазоні (стрілка)  $\lambda\lambda = 6.42\ldots15.4$  мкм розміщені смуги поглинання 10 різних фреонів [4]. Висоти вертикальних ліній пропорціональні до сили ліній. Заштриховано вікна повної непрозорості, зумовлені поглинанням вуглекислого газу ( $\lambda\lambda = 4.2\ldots4.4$  мкм) та водяної пари і вуглекислого газу ( $\lambda\lambda = 5.5\ldots7.5$  мкм)

риметричні властивості відбитого сонячного випромінювання повністю будуть визначатись газовою та аерозольною складовими верхніх шарів атмосфери. В той же час значну деполяризуючу роль тут будуть відігравати емісійні деталі спектру. Спостереження в режимі спектрополяриметра дозволять використовувати ділянки спектру, які менше всього спотворені газовими емісіями.

Дистанційний моніторинг газової складової атмосфери Землі має ту специфіку, що отримана потужність молекулярних смуг поглинання суттєво залежить від рельєфу поверхні, а також похибки орієнтації МКС, яка становить  $1.5^\circ$  [2]. Для коректності експерименту необхідна або точна прив'язка до місцевості, або оцінювання не абсолютної кількості газу на промені зору, а відносної концентрації (по відношенню до газу, концентрація якого мало змінюється в часі). Дещо спрошує ситуацію також використання світlosильного спектрометра, завдяки чому ефект рельєфу буде згладжуватись на великих ділянках поверхні (біля 400 км).

Ми широко вдячні С. Г. Кравчуку, який звернув нашу увагу на можливість існування ефектів з безпосередньої взаємодії атомів та молекул газу з аерозолем.

1. Мороженко О. В., Сосонкін М. Г., Шавріна А. В., Іванов Ю. С. Проблеми дистанційного моніторингу глобальних змін газової складової земної атмосфери // Космічна наука і технологія.—1995.—1, № 2-6.—С. 3—17.
2. Український дослідницький модуль міжнародної космічної станції.—1998.—41 с.
3. Хит Д. Ф., Текаекара М. П. Солнечный спектр в области 1200—3000  $\text{\AA}$  // Поток энергии Солнца и его изменения / Под ред. О. Уайт. — М.: Мир, 1980.—С. 212—232.
4. Чемберлен Дж. Теория планетных атмосфер. — М.: Мир, 1981.—352 с.
5. Яновицький Э. Г., Думанський З. О. Таблицы по рассеянию света полидисперсной системой сферических частиц, Киев: Наук. думка, 1972.—121 с.
6. Clerbaux C., Colin R., Simon P. C., Graner C. Infrared cross sections and global warming potentials of 10 alternative hydro-halocarbons // J. Geoph. Res.—1993.—98D, N 6.—P. 10491—10497.
7. Farman J. C., Gardiner B. G., Shanklin J. D. Large losses of ozone in Antarctica reveal seasonal  $\text{ClO}_x/\text{NO}_x$  interaction // Nature.—1985.—315, N 1.—P. 207—210.
8. Hansen J. Climat forings and feedbacks // Long-Term Monitoring of Global Climate Forings and Feedbacks: NASA Conf. Publ. 3234. — New York, 1992.—P. 6—12.
9. Hansen J. Climat Rationale // Long-Term Monitoring of Global Climate Forings and Feedbacks: NASA Conf. Publ. 3234. — New York, 1992.—P. 26—35.
10. Keating G. M. The response of ozone to solar activity variations: A review // Solar Phys.—1981.—74, N 2.—P. 321..
11. Kucherov V. A., Ivanov Yu. S., Efimov Yu. S., et al. Ultraviolet low-resolution spectropolarimeter for the space mission SPECTRUM-UV (UVSPEPOL project) // Космічна наука і технологія. Додаток.—1997.—3, N 5/6.—С. 3—27.
12. Lacis A., Carlson B., Michelson Interferometer (MINT) //

Long-Term Monitoring of Global Climate Forings and Feedbacks: NASA Conf. Publ. 3234. — New York, 1992.—P. 47.

13. McCormic M. P. Stratospheric Aerosol and Gas Experiment (SAGE III) // Long-Term Monitoring of Global Climate Forings and Feedbacks: NASA Conf. Publ. 3234. — New York, 1992.—P. 36—39.
14. Morozhenko A. V., Shavrina A. V. The concentration of gas and aerosol pollution monitoring (for altitudes more than 30 km) on board the International Space Station // Sixteenth Colloquium on high resolution molecular spectroscopy. Dijon. 6-10 September 1999, Programm and Abstracts. Post-Deadline Posters.—P. 8.
15. Orphal J., et al. Absorption cross-sections of  $\text{O}_3$  at atmospheric temperatures (203—293 K) and pressures (100—1000 mbar) in the 12500—40000  $\text{cm}^{-1}$  spectral range measured using FTS // Chem. Phys. Lett.—2000. (<http://www-iup.physik.uni-bremen.de/gruppen/molspec.html>).
16. Reinsel G. C., Tiao G. C., DeLisi J. J., et al. Analysis of upper stratospheric umkehr ozone profile data for trends and the effect of stratospheric aerosols // J. Geophys. Res.—1984.—89.—P. 4833—4840.
17. Rothman L. S., Risland C. P., Goldman A., et al. The HITRAN Molecular Spectroscopic Database and HAWKS (HITRAN Atmospheric Workstation): 1996 Edition // I. Quant. Spectrosc. Radiat. Transpher.—1998.—60, N 5.—P. 665—710.
18. Tiao G. C., Reinsel G. C., Pedrick J. H., et al. A statistical trend analysis of ozoneonde data // J. Geophys. Res.—1986.—91.—P. 13121—13136.
19. Travis L. Earth observing scanning polarimeter // Long-Term Monitoring of Global Climate Forings and Feedbacks: NASA Conf. Publ. 3234. — New York, 1992.—P. 40—46.
20. Yoshino K., Esmond J. R., Cheung A. S.-C., et al. High resolution absorption cross sections in the transmission window region of the Schumann-Runge bands and Herzberg continuum of  $\text{O}_2$  // Planet. and Space Sci.—1992.—40, N 2/3.—P. 185—192.

#### CONCEPTION OF GAS AND AEROSOL POLLUTION MONITORING OF THE EARTH'S ATMOSPHERE (FOR ALTITUDES MORE THAN 30 KM) ON BOARD THE INTERNATIONAL SPACE STATION

O. V. Morozhenko, A. V. Shavrina, and O. A. Veles'

Approximate model calculations support the idea, according to which the main role in the weakening of the ozone layer power is played by the aerosol pollution of the upper layers in the Earth's atmosphere and freons play a secondary role. For the tasks of exact modelling of the processes which create and destroy ozone and for monitoring of greenhouse gases and ecology of the atmosphere, a conception of experiments on board the Ukrainian module of the International Space Station was proposed. They will provide the possibility to receive information about global changes in the chemical composition of the atmosphere, spectral values of complex refractive index and sizes of the stratospheric aerosol, as well as about the vertical structure of gas and aerosol components of the atmosphere and the vertical temperature profile. Two device complexes are proposed to be mounted, one of them (two Fourier spectrometers for the spectral range 1.5—11  $\mu\text{m}$  and a spectropolarimeter for 200—400 nm) will be targeted to nadir, and the second (two Fourier spectrometers for the spectral range 1.5—11  $\mu\text{m}$ ) will observe the spectrum of solar radiation weakened by the Earth's atmosphere at various (with a step of 1—2 km) over the Earth's surface.

УДК 613.15:612.014.464-616.71-007.234

## Влияние дозированной гипоксии на метаболизм костной ткани в условиях осевой разгрузки задних конечностей

В. А. Березовский<sup>1</sup>, И. Г. Литовка<sup>1</sup>, Е. Г. Чака<sup>1</sup>,  
С. Магомедов<sup>2</sup>, Н. В. Мехед<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут фізіології ім. О. О. Богомольця НАН України, Київ

<sup>2</sup>Український науково-дослідний інститут травматології та ортопедії МЗ України, Київ

*Надійшла до редакції 06.12.99*

Вивчався вплив зниженого  $P_{O_2}$  в умовах нормобарії на кальцій-фосфорний метаболізм, біохімічні показники ремоделювання і біомеханічні властивості стегнових кісток щурів, задні кінцівки яких знаходились в безопорному положенні. Газова суміш подавалась у переривчастому режимі А і Б по 8 год щоденно на протязі 28 діб. Показано, що в режимі А відбувалась гальмування розвитку деструктивних процесів в кістковій тканині, що може бути використано разом з іншими коригуючими засобами для профілактики розвитку ситуаційної остеопенії.

Изучение нарушений физиологического состояния костной ткани в условиях микрогравитации имеет как общебиологический, так и практический интерес для здоровья человека, пребывающего в условиях космического полета. Тенденция к широкому распространению остеопороза возникает также при типичной для населения больших городов гипокинезии или после длительного пребывания пациента на постельном режиме.

Сопоставление характеристик костных изменений, полученных в результате обследования российских и американских космонавтов [19, 37], пациентов в условиях постельного режима [32, 33] и модельных экспериментах с безусловным выключением опорной функции конечности [7, 8, 35] позволила выявить общие закономерности развития остеодистрофических процессов, возникающих в этих случаях. Выраженность остеодистрофии значительно варьирует в костных тканях с различным анатомо-функциональным назначением. Так, после космического полета самая высокая скорость потери минералов у космонавтов регистрировалась в

зоне большого вертела (до 14 %), а самая низкая — в проксимальном эпифизе большеберцовой кости (до 3 %) [19, 37]. Промежуточное положение занимают поясничные позвонки и кости таза. Аналогичные результаты были получены в опытах на животных с осевой разгрузкой костей бедра [6, 10, 34].

Изменения костной ткани в условиях космического полета или постельного режима носят адекватный характер, и следовательно, методы комплексного воздействия (фармакопрофилактика, физические тренировки), замедляющие ее перестройку, могут быть полезны для сокращения сроков реадаптации при возвращении на Землю. Однако, как показывает практика, ни физические упражнения, ни фармакопрофилактика не способны в полной мере защитить организм от потери кальция костной тканью. Возможно, это обусловлено тем, что такие воздействия не могут обеспечить должный уровень возбуждения остеонов костей скелета, адекватный тому, который создается постоянной земной гравитацией.

С позиций патогенеза остеодистрофии бездействия особый интерес представляет характеристика изменений костной ткани на их ранней стадии, когда обнаруживается замедление прироста массы тела, а убыль костной массы еще не регистрируется. Тем более, что возможны и другие механизмы возникновения остеодистрофии, не связанные с обменом кальция, которые определяются функциональным состоянием клеточного аппарата и внеклеточной фазы кости [28].

Одним из возможных путей профилактики остеодистрофии бездействия может быть искусственная газовая среда (ИГС) в месте обитания [2, 3, 8, 31]. Однако данные о влиянии ИГС на состояние костной ткани неоднозначны [30, 39, 41]. Это связано в первую очередь с условиями проведения экспериментов: гипо- или гипербарийей, парциальным давлением  $P_{O_2}$  в газовой смеси, режимом воздействия ИГС [7, 37], видовыми различиями реакций на гипоксию [1].

Целью настоящей работы является изучение особенностей воздействия двух различных прерывистых режимов вдыхания ИГС с пониженным парциальным давлением кислорода ( $P_{O_2}$ ) в условиях нормального атмосферного давления на состояние бедренных костей по биомеханическим и биохимическим показателям.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования выполнены на 70 крысах-самцах линии Вистар массой 130–150 г. Животные были разделены на группы: I, IV — виварный контроль, II, V — крысы с безопорным положением задних конечностей в среде атмосферного воздуха и III, VI — крысы с безопорным положением задних конечностей в нормобарической ИГС с пониженным  $P_{O_2}$  (90–110 мм. рт. ст), что по содержанию кислорода соответствует высоте 2.8–4.5 км над уровнем моря. Подачу ИГС осуществляли в прерывистых режимах А и Б ежедневно на протяжении 8 ч в течение 28 сут с помощью мембранных генераторов горного воздуха «Борей». Безопорное положение задних конечностей у крыс II, V и III, VI групп создавалось вывешиванием по методу Морей—Холтона [35]. Стандартный корм и воду все группы животных получали без ограничений.

За день до окончания эксперимента у всех животных собирали суточную мочу и фекалии. На следующий день животных декапитировали под рауш-наркозом, выделяли бедренные кости. Объем кости определяли объемно-весовым методом. Био-

механические испытания бедренных костей на трехточечный изгиб проводили на установке МР-200. По полученным данным оценивали несущую способность, жесткость, энергию упругой деформации, модуль упругости, предел прочности. Фрагменты скелетированных бедренных костей обезвоживали и обезжиривали в спирт-эфире (3:1) и сжигали в муфельной печи при  $t = 700$  °C. Рассчитывали плотность кости, минеральную насыщенность и зольность.

В крови, моче и фекалиях определяли концентрацию кальция и фосфора. В золе дистального и проксимального эпифизов и диафизов бедренных костей определяли концентрацию кальция, фосфора и магния. Рассчитывали количество выведенного кальция и фосфора за сутки и соотношение Ca/P во всех исследуемых тканях. Определение концентрации кальция и фосфора проводили фотометрически с помощью наборов фирмы «Sentinel CH» (Италия). Для определения ранних изменений состояния остеобластов и остеокластов в костной ткани определяли активность щелочной фосфатазы в сыворотке крови (ЩФ, К.Ф. З.И.З.И.), общую катализическую активность кислой фосфатазы (КФ, К.Ф.З.И.З.2) и тартрат-резистентной кислой фосфатазы с помощью стандартных наборов «Лахема» (Брюно, Чехия). О метаболизме коллагена судили по изменению концентрации гликозаминонгликанов (ГАГ) в сыворотке крови по методу Кляцкина [13]. Фракции гидроксипролина в сыворотке крови разделяли по методу Frey [29], оксипролин в них определяли по методу Stegemann [38], общий оксипролин в моче — по методу Крель и др. [16], креатинин в моче — по методу Поппера [15], концентрацию глюкуроновых кислот в костной ткани — по методу Bitter, Menir (1962) в модификации Леонтьева и др. [17]. Статистическую обработку данных проводили с использованием t-критерия Стьюдента.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На протяжении 28 сут экспериментов наблюдалось неравномерное изменение массы тела у животных всех групп (рис. 1). У крыс контрольных групп (I и IV) прирост массы тела за первые две недели составлял 35–53 %. У животных с безопорным положением задних конечностей (II, V) темп прироста массы тела был значительно ниже — всего около 8–19 %. У животных с сочетанным действием безопорного положения задних конечностей с вдыханием ИГС с пониженным  $P_{O_2}$  (III, VI) наблюдалось увеличение массы тела после 28 сут экспе-

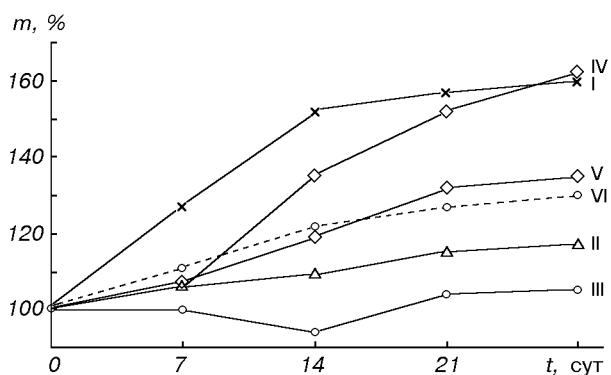


Рис. 1. Изменения массы тела контрольных (I, IV) и подопытных (II, III, V, VI) животных (см. текст)

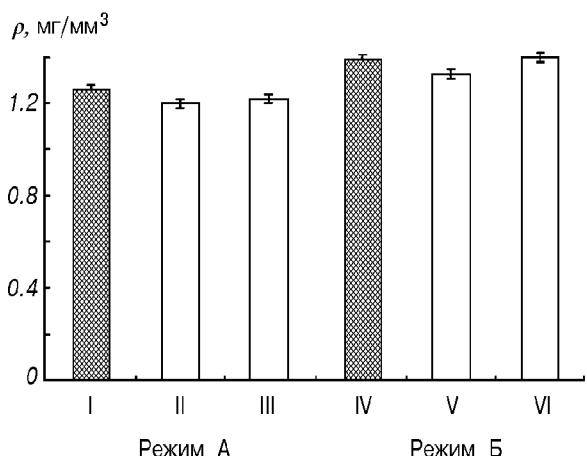


Рис. 2. Плотность ткани бедренных костей у контрольных (I, IV) и подопытных (II, III, V, VI) животных

римента на 5 и 30 % соответственно. У подопытных животных II, V и III, VI групп прирост массы бедренных костей замедлялся на 12.5, 16.8 и 21 % соответственно и объема бедренных костей на 8, 11, 3.5 и 21 % соответственно. Задержка роста бедренных костей у этих групп животных была значительно меньшей, чем отставание в массе тела.

У крыс с разгрузкой задних конечностей плотность ткани бедренных костей достоверно снижалась. У животных III, VI групп, получавших газовую смесь с пониженным  $P_{O_2}$  в режиме А и Б, этот показатель снижался в меньшей степени (рис. 2). Изменения плотности кости такой же направленности наблюдали и в проксимальном эпифизе. В то же время отмечали разнонаправленное влияние сочетанного действия разгрузки задних конечностей и подачи ИГС в режиме Б на минеральную

насыщенность и зольность костной ткани у крыс VI группы. Минеральная насыщенность дистального эпифиза снижалась на 18.8 %, а проксимального — повышалась на 8.7 % по сравнению с животными V группы. Зольность практически не изменялась в проксимальном эпифизе и снижалась на 22.6 % в дистальном эпифизе. Минеральная насыщенность в дистальном эпифизе и проксимальном снижалась по сравнению с контролем на 23 и 18 % соответственно, а зольность — на 20 и 16 %.

Снижение плотности, минеральной насыщенности и зольности подтверждает развитие деструктивных процессов в изученных участках костной ткани. Это согласуется с данными других авторов [9] о большей скорости протекания обменных процессов в губчатой ткани по сравнению с компактной. Такие различия были объяснены этими авторами не только неодинаковой скоростью метаболизма в указанных структурах и фазностью изменений скорости синтеза и резорбции. Выдвинуто предположение [23], что при воздействии на организм такого стрессора, как невесомость, наиболее ранней и универсальной реакцией костной ткани (1 фаза) является торможение как развития, так и разрушения в губчатой и в компактной структурах кости. В последующем развивается вторая фаза — активация процесса резорбции, что отражает биологическую нецелесообразность сохранения исходной костной массы в условиях отсутствия весовой нагрузки. Однако в силу неодинаковой интенсивности метаболизма в разных участках ткани при невесомости продолжительностью около 20 сут в губчатых структурах проявлялась преимущественно 2-я, а в компактных — 1-я фаза реакции.

Анализ данных, полученных нами при исследовании целой бедренной кости на трехточечный изгиб, показал достоверное снижение (на 35 %) несущей способности (НС) кости у крыс с разгрузкой задних конечностей (таблица). Для этой группы животных НС равна  $6.7 \pm 0.56$  кгс, тогда как для контрольной группы животных  $10.4 \pm 0.63$  кгс. В то же время у подопытных животных III группы, получавших как разгрузку, так и гипоксическую смесь в режиме А происходила нормализация этого показателя. Несущая способность кости повышалась в 1.2 раза по сравнению с животными II группы и составила  $8.15 \pm 0.76$  кгс. У животных VI группы, получавших ИГС в режиме Б, наблюдалось снижение НС кости как по отношению к контролю, так и по отношению к группе с разгрузкой задних конечностей.

Жесткость и энергия упругого деформирования кости крыс при сочетанном влиянии разгрузки и ИГС в режиме А практически не отличались от величин у животных контрольной группы и увели-

Механические свойства бедренных костей крыс после 28-суточной разгрузки задних конечностей в атмосфере воздуха и ИГС ( $M + m$ )

Номер группы животных	Несущая способность $P$ , кгс	Жесткость $f$ , кгс/мм	Энергия упругой деформации $a$ , кгс·мм	Предел прочности $\sigma$ , кгс/мм <sup>2</sup>	Модуль упругости $E$ , кгс/мм <sup>2</sup>	Удельная энергия упругого деформирования $A$ , кгс/мм <sup>2</sup>
I ( $n = 18$ )	$10.40 \pm 0.63$	$18.56 \pm 1.16$	$3.00 \pm 0.27$	$16.51 \pm 0.98$	$37.86 \pm 5.47$	$4.39 \pm 0.62$
II ( $n = 13$ )	$6.70 \pm 0.56^*$	$16.49 \pm 0.88$	$1.59 \pm 0.23^*$	$12.58 \pm 1.12^*$	$11.84 \pm 2.35^*$	$7.72 \pm 0.91^*$
III ( $n = 13$ )	$8.15 \pm 0.76^*$	$17.90 \pm 1.26$	$2.03 \pm 0.41^*$	$13.55 \pm 1.79$	$23.68 \pm 7.15$	$5.25 \pm 1.53$
IV ( $n = 11$ )	$8.08 \pm 0.58$	$16.33 \pm 1.12$	$2.11 \pm 0.24$	$12.97 \pm 1.04$	$27.62 \pm 5.20$	$3.94 \pm 0.57$
V ( $n = 8$ )	$5.25 \pm 0.89^*$	$14.47 \pm 1.39$	$1.23 \pm 0.38$	$9.51 \pm 1.93$	$11.68 \pm 4.48^*$	$10.01 \pm 4.35$
VI ( $n = 8$ )	$4.47 \pm 0.64^*$	$11.16 \pm 1.88^*$	$1.22 \pm 0.33^*$	$8.37 \pm 1.27^*$	$19.07 \pm 9.10$	$7.26 \pm 3.43$

\* — достоверные изменения по сравнению с контролем ( $p < 0.05$ )

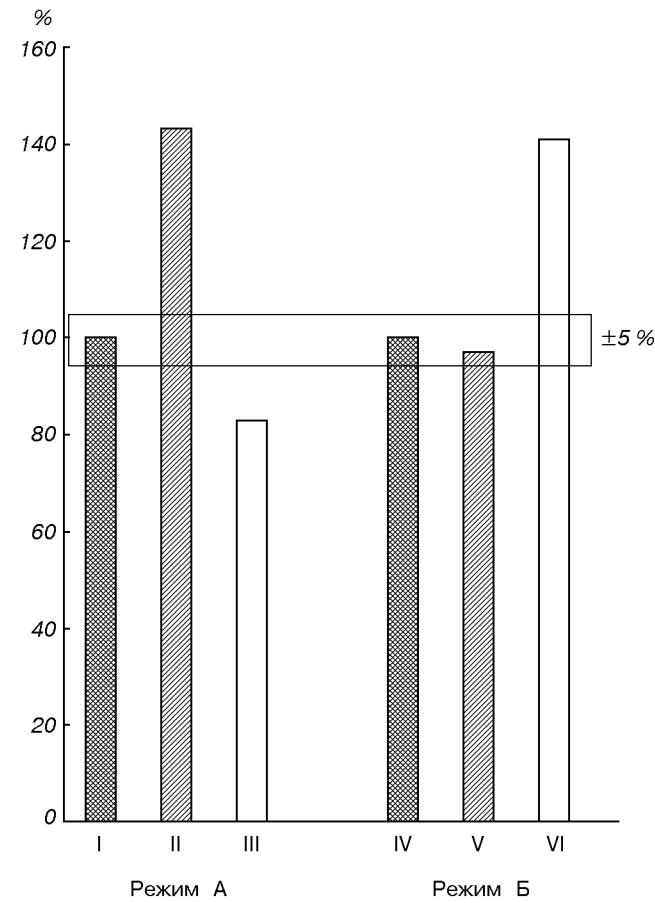


Рис. 3. Экскреция фосфора у контрольных (I, IV) и подопытных (II, III, V, VI) животных

чивались по отношению к величинам в группе с разгрузкой задних конечностей. Вдыхание ИГС в режиме Б и разгрузка задних конечностей снижали жесткость в 1.5 раза по сравнению с контролем и в 1.3 раза по сравнению с животными с разгрузкой

задних конечностей. При этом энергия упругой деформации кости снижалась на 42 % ( $p < 0.05$ ) по сравнению с контролем и не изменялась по сравнению с величинами у животных с разгрузкой задних конечностей. Модуль упругости достоверно снижался (в среднем в три раза) у крыс с разгрузкой задних конечностей по сравнению с контролем. ИГС, подаваемая в режиме А и Б, способствовала нормализации модуля упругости.

Предел прочности кости в группе крыс, вдыхавших ИГС в режиме А, сохранялся близким к контролю, несмотря на 28-суточное вывешивание. В то же время у крыс, вдыхавших ИГС в режиме Б, этот показатель достоверно снижался в 1.5 раза по сравнению с контролем и в 1.1 раза по сравнению с группой животных с безопорным положением задних конечностей, вдыхавших атмосферный воздух. Таким образом, газовая смесь с пониженным  $P_{O_2}$ , подаваемая в прерывистом режиме А, тормозила развитие деструктивных процессов в костной ткани крыс с безопорным положением задних конечностей в большей степени.

Изучение экскреции Са и Р показало, что под влиянием безопорного положения задних конечностей у крыс II, IV групп количество выведенного Р было в 1.1—1.3 раза (рис. 3), а Са — в 1.4—2 раза большим по сравнению с крысами контрольной группы (рис. 4). У крыс III, VI групп количество экскретируемого Са приближалось к значениям контрольной группы, а Р было на 20 % меньше, чем в контрольной группе. Отношение Са/Р у всех подопытных животных имело тенденцию к снижению. В сыворотке крови наблюдали снижение концентрации Са у крыс II группы на 10.8 %, а IV — на 12 %. У животных III группы содержание Са было близко к норме. Концентрация Р имела тенденцию к увеличению на 10 и 12 % у крыс II и VI групп. У животных III группы концентрация Р снижалась по сравнению с контролем на 17 %. Соответственно и отношение Са/Р снижалось в

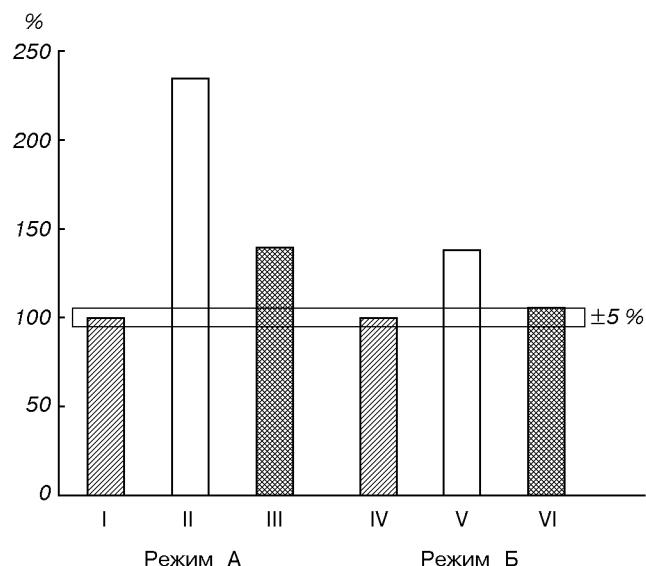


Рис. 4. Экскреция кальция у контрольных (I, IV) и подопытных (II, III, V, VI) животных

сыворотке крови крыс II, VI групп ( $p < 0.05$ ) и повышалось у крыс III группы.

В костной ткани, в отличие от сыворотки крови, содержание Ca, P, Mg у животных всех групп оставалось в пределах обычных внутривидовых вариаций.

Таким образом, 28-суточная разгрузка задних конечностей достоверно увеличивает выведение Ca и P с мочой и фекалиями. Учитывая, что биомеханические свойства костной ткани существенно изменяются, можно предположить, что изменения состояния кости при ее осевой разгрузке начинаются не с деминерализации, а с угнетения процессов всасывания кальция в кишечнике и его усвоения из пищи, с замедления процесса физиологической ретрактуризации костной ткани.

В исследованиях органического матрикса на этих же группах животных мы наблюдали тенденцию к повышению активности ЩФ в сыворотке крови у крыс II группы по сравнению с виварным контролем (рис. 5). Такие результаты могут быть как при активном росте костной ткани, так и при ее разрушении [21, 24]. Активность ЩФ у крыс III группы, вдыхавших ИГС в режиме А, была ниже, чем у животных II группы. Более того, активность ЩФ у животных III группы не отличалась от виварного контроля. У крыс VI группы, вдыхавших ИГС в режиме Б, активность ЩФ имела тенденцию к повышению по сравнению с животными с разгру-

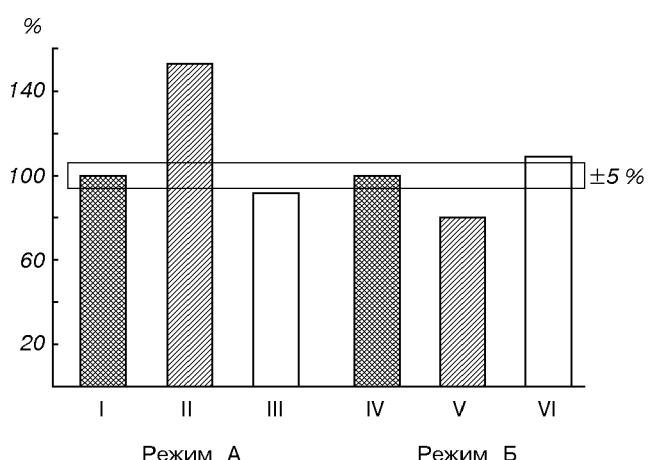


Рис. 5. Активность щелочной фосфатазы в сыворотке крови контрольных (I, IV) и подопытных (II, III, V, VI) животных

женными задними конечностями и не отличалась от виварного контроля. Это свидетельствует о торможении деструкции костной ткани у крыс с осевой разгрузкой костей бедра при снижении  $P_{O_2}$ .

В сыворотке крови всех исследованных групп закономерного изменения активности КФ и тартрат-резистентной фосфатазы не выявлено. Не исключено, что на ранних этапах остеодистрофии резорбция костного матрикса может осуществляться без активации остеокластов. Ранее было показано, что декальцинация может развиваться и без заметного изменения структуры кости [36].

После 28-суточного безопорного положения задних конечностей у крыс, вдыхавших атмосферный воздух, концентрация ГАГ в сыворотке крови (рис. 6) повышалась в 2.1 раза ( $p < 0.05$ ). Иными словами у животных II группы произошло нарушение метаболизма протеогликанов, которые поддерживают целостность соединительнотканного матрикса. Протеогликаны играют важную роль в процессах роста и дифференцировки клеток, поскольку регулируют рост и ориентацию коллагеновых фибрill, стабилизируют структуру волокон [14, 22, 38]. При сочетанном действии безопорного положения задних конечностей и ИГС, подаваемой в прерывистом режиме А, у крыс III группы отмечена нормализация концентрации ГАГ. В прерывистом режиме Б направленность реакции при подаче ИГС была такой же, но менее выраженной. Из этого мы делаем вывод, что ИГС, подаваемая в режиме А, эффективнее тормозит деструктивные процессы в метаболизме протеогликанов. Возможно, это является одной из причин более полного

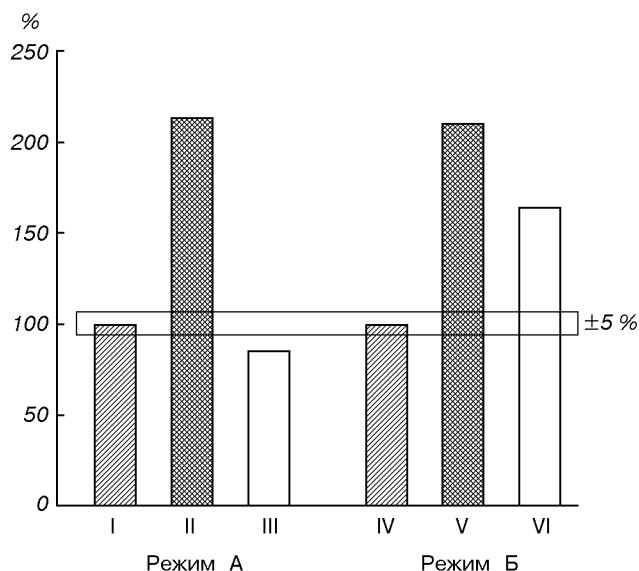


Рис. 6. Концентрация ГАГ в сыворотке крови контрольных (I, IV) и подопытных (II, III, V, VI) животных

сохранения биомеханических свойств костной ткани у животных этой группы.

Концентрация свободного оксипролина (ОКП) в сыворотке крови крыс II группы снижалась в 1.5 раза ( $p < 0.05$ ). У животных III группы этот показатель оставался таким же, как и у крыс контрольной группы. Содержание белковосвязанного ОКП в сыворотке крови имело тенденцию к повышению, как у животных II группы, так и III группы. Вместе с тем экскреция креатинина у всех подопытных животных не изменялась по сравнению с виварным контролем. Выведение общего ОКП с мочой, который является продуктом катаболизма коллагена, и служит показателем интенсивности этого процесса, снижалось на 40 % и 61 % соответственно у крыс II и III групп. Подобные изменения этих показателей наблюдали и у подопытных животных других групп. Такое выраженное торможение экскреции ОКП у лабораторных животных III, VI групп, хорошо коррелирует с описанными выше данными об изменениях содержания протеогликанов. Концентрация глюкуроновых кислот в бедренных костях крыс экспериментальных групп не изменялась по сравнению с виварным контролем.

Результаты проведенных исследований подтверждают сведения о том, что у животных, находившихся в условиях длительной разгрузки задних конечностей, происходят значительные изменения биомеханических свойств кости. Снижается ее спо-

собность оказывать сопротивление нагрузке, повышается хрупкость. Это означает, что переломы кости могут возникать при меньших нагрузках, чем обычно. В то же время концентрация минеральных солей в бедренных костях у обследованных животных мало отличалась от физиологического уровня, что отмечается и другими авторами [4, 11, 19]. Возможно, что отсутствие осевой нагрузки, замедляя метаболизм органического матрикса, изменяет размеры кристаллов гидрооксиапатита, составляющих основной геометрический каркас кости. А чем кристаллы крупнее, тем выше вероятность возникновения трещин между ними. Показано, что развивающиеся при функциональной разгрузке задних конечностей структурные нарушения способны усиливать друг друга [12, 21].

Отсутствие механической нагрузки снижает интенсивность потребления кислорода и скорость ремоделирования структурных элементов кости. Потребность костной ткани в поступлении новых порций кальция уменьшается. Но поступление его с пищей остается на прежнем уровне. Невостребованные кальций и фосфор выводятся с экскрементами, что свидетельствует о торможении усвоения этих веществ при безопорном положении задних конечностей. У животных, получавших газовую смесь с пониженным  $P_{O_2}$  как в режиме А, так и в режиме Б, количество выведенного Са и Р существенно уменьшалось. Одновременно замедлялось изменение биомеханических свойств костной ткани в особенности у крыс, получавших гипоксическую газовую смесь в режиме А. Это свидетельствует о стабилизирующей роли периодического понижения парциального давления кислорода на костный метаболизм в условиях, моделирующих функциональную разгрузку.

Безопорное положение задних конечностей у крыс приводило к статистически достоверному повышению уровня ГАГ в сыворотке крови. Это можно рассматривать как признак усиления распада протеогликанов, что не может не отразиться на трофике и механических свойствах костной ткани [18]. Так как при этом не наблюдалось заметных изменений в активности ЩФ и КФ в сыворотке крови и (как было показано в наших предыдущих исследованиях) в костной ткани [5], а экскреция оксипролина снижалась, можно заключить, что процессы формирования и резорбции кости у крыс при осевой разгрузке задних конечностей находятся в равновесии при относительном преобладании процессов резорбции.

При отсутствии механических стимулов для активации метаболизма кости необходим дополнительный раздражитель, который способен повысить

физиологическую активность остеобластов. Таким раздражителем может быть начальный этап кислородного голодания. Газовая смесь с пониженным содержанием кислорода, подаваемая в прерывистом режиме А, тормозит развитие деструктивных процессов, положительно влияет на биофизические характеристики костной ткани у животных с безопорным положением задних конечностей. Считаем, что этот метод, совместно с другими корректирующими воздействиями, может использоваться для профилактики ситуационной остеопении.

## ВЫВОДЫ

1. В условиях 28 суточного безопорного положения задних конечностей в бедренных костях крыс развиваются деструктивные изменения, которые проявляются в снижении абсолютной массы, плотности и биомеханических свойств кости.

2. Вывешивание животных в атмосфере воздуха существенно увеличивает выведение кальция и фосфора с мочой и фекалиями. У крыс, вдыхавших газовую смесь с пониженным  $P_{O_2}$  в этих же условиях, выведение кальция и фосфора было значительно ниже, чем у крыс, дышавших атмосферным воздухом.

3. Содержание кальция, фосфора и магния в бедренных костях крыс после 28-суточной разгрузки задних конечностей существенно не изменяется.

4. У крыс с безопорным положением задних конечностей при дыхании атмосферным воздухом концентрация гликозаминогликанов в сыворотке крови повышалась, тогда как вдыхание газовой смеси с пониженным  $P_{O_2}$  в тех же условиях тормозило развитие нарушений метаболизма протеогликанов.

5. Сопоставление двух режимов (А и Б) подачи газовой смеси с пониженным  $P_{O_2}$  показало, что в режиме А существенно тормозится снижение предела прочности, несущей способности, жесткости, энергии упругого деформирования бедренных костей крыс и показателей метаболизма протеогликанов.

1. Березовский В. А. Напряжение кислорода в тканях животных и человека. — Киев, 1975.—280 с.
2. Березовский В. А., Левашов М. И. Физиологические предпосылки и механизмы нормализующего действия нормобарической гипоксии и оротерапии // Физiol. журн.—1992.—38, № 5.—С. 3—12.
3. Березовский В. А., Левашов М. И. Введение в оротерапию. — Изд-во Академии проблем гипоксии РФ, 2000.—76 с.
4. Березовский В. Я., Літовка І. Г., Чака О. Г. Реакція

сполучної тканини на аксіальне розвантаження кісток стегна // Физiol. журн.—1998.—44, № 3.—С. 284.

5. Березовский В. А., Літовка І. Г., Чака Е. Г. и др. Біофізическая стимуляция остеогенеза // Пробл. остеологии.—1999.—2, № 2.—С. 12—15.
6. Воложин А. И. Механизмы остеодистрофии при невесомости // Патол. физиология и эксперим. терапия.—1984.—№ 1.—С. 19—27.
7. Воложин А. И., Лемецкая Т. И. Изменение кальциевого и фосфорного обмена в костях и зубах при кислородном голодании // Патол. физиология и эксперим. мед.—1970.—14, № 5.—С. 16—20.
8. Газенко О. Г. Некоторые вопросы оптимизации среды обитания // Пробл. космич. биол.—1997.—34.—С. 9—38.
9. Григорьев А. И., Воложин А. И., Ступаков Г. П. Минеральный обмен у человека в условиях измененной гравитации // Пробл. космич. биол.—1994.—74.—214 с.
10. Григорьев А. И., Ларина И. М. Принципы организации обмена кальция // Успехи физиол. наук.—1992.—23, № 3.—С. 24—52.
11. Диденко И. Е., Воложин А. И. Минеральный состав минерального компонента костей кроликов при 30 суточной гипокинезии // Космич. биол. и авиакосмич. мед.—1981.—15, № 1.—С. 84—87.
12. Добелис М. А. Влияние невесомости и некоторых ее моделей на механические свойства животных при скручивании // Космич. биол. и авиакосмич. мед.—1985.—19, № 6.—С. 40—45.
13. Кляцкин С. А., Лифшиц П. И. Определение гликозаминогликанов орциновым методом в крови больных // Лаб. дело.—1989.—№ 9.—С. 51—53.
14. Ковалев А. М. Особенности метаболизма коллагена и гликозаминогликанов костной ткани в условиях ограниченной двигательной активности и при физических нагрузках: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. — Киев, 1986.—17 с.
15. Колб В. Г., Камышников В. С. Справочник по клинической химии. — Минск, 1982.—311 с.
16. Крель А. А., Фурцева Л. Н. Методы определения оксипролина в биологических жидкостях и их применение в медицинской практике // Вопр. мед. химии.—1968.—14, вып. 6.—С. 635—640.
17. Леонтьев В. К., Петрович Ю. А. Биохимические методы исследования в клинической и экспериментальной стоматологии. — Омск, 1976.—93 с.
18. Никитин В. Н., Перский Е. Э., Утевская Л. А. Возрастная и эволюционная биохимия коллагеновых структур. — Киев: Наук. думка, 1976.—279 с.
19. 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» // Авиакосмич. и экол. медицина.—1992.—№ 5/6.—С. 20—24.
20. Прохончуков А. А. Сравнительное влияние невесомости и искусственной силы тяжести на плотность, содержание золы, кальция и фосфора в обызвествленных тканях // Космич. биол. и авиакосмич. мед.—1980.—14, № 4.—С. 23—25.
21. Прохончуков А. А., Жижина Н. А., Тигранян Р. А. Гомеостаз костной ткани в норме и при экспериментальном воздействии // Пробл. космич. биол.—1984.—49.—200 с.
22. Серов В. В., Шехтер А. Б. Соединительная ткань (функциональная морфология и общая патология). — М.: Медицина, 1981.—312 с.
23. Ступаков Г. П., Воложин А. И. Костная система и невесомость // Пробл. космич. биол.—1989.—63.—185 с.
24. Творогова М. Г., Титов В. Н. Щелочная фосфатаза: методические приемы исследования и диагностическое значение

- (Обзор литературы) // Лаб. дело.—1991.—№ 6.—С. 10—17.
25. Франке Ю., Рунге Г. Остеопороз: Пер с нем. — М.: Медицина, 1995.—304 с.
  26. Шандала М. Г., Руднев М. И. Обухан Е. И. Гигиеническая оценка биологических эффектов, наблюдаемых при недостатке кислорода в окружающей среде // Гигиена и санитария.—1983.—№ 9.—С. 65—66.
  27. Beresdorf J. N., Fedarko L. W., Midura R. J. Analysis of the proteoglycans synthesized by human bone cells in vitro // J. Biol. Chem.—1987.—P. 17164—17172.
  28. Heaney R. P. Calcium, bone health and osteoporosis // Bone Mineral Res. Ann.—1986.—4.—P. 225—261.
  29. Frey S. Etude d'une methode l'exploration et du taux normal de l'hydroxyproline due serum // Biochem. and Biophys. ets.—1965.—3, № 2.—P. 446—450.
  30. Kubota M. Study on proliferation and function of periodontal ligament fibroblasts and osteoblastic cells under hypoxia // Kokubyo Gakkai Zasshi.—1989.—56 (4).—P. 473—484.
  31. Lamb I. E. Hypoxia- an anti-deconditioning factor for manned space flight // Acrosp. Med.—1965.—36.—P. 97—100.
  32. Le Blank A. D., Scheider V. S., Evans H., et al. Bone montral loss and recovery after 17 weeks of bed rest // J. Bone and Mineral Res.—1990.—5, N 8.—P. 843—850.
  33. Lueken S. A., Arnaud S. B., Taylor A. K., Baylink D. J. Changes in markers of bone formation and resorption in a bed rest model of weightlessness // J. Bone Mineral Res.—1993.—8, N 12.—P. 1433—1438.
  34. Morey-Holton E. R., Arnaud S. B. Skeletal responses to spaceflight// Advances in space biology and medicine. — N. Y.: JAI press, 1991.—Vol. 1.—P. 37—69.
  35. Morey-Holton E. R., Wronski T. I. Animal models for simulating weightlessness // Physiologist.—1981.—24, N 6.—P. 45—48.
  36. Nishimyra Y., Fukuoka H., Kiriyama M., Suzuki Y. Bone turnover and calcium metabolism during 20 days bed rest in young healthy males and females // Acta physiol. Scand.—1994.—150, suppl., N 616.—P. 27—35.
  37. Rambaut P. C., Johnson P. S. Prolonged weightlessness and calcium loss in man // Acta astronaut.—1979.—6, N 9.—P. 1113—1122.
  38. Stegemann H. J. H. A simple procedure for the determination of hydroxyproline in urine and bone // Biochem. Med.—1952.—N 1.—P. 23—30.
  39. Tuncay O. C., Ho D., Barker M. K. Oxygen tension regulates osteoblast function // Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.—1994.—105 (5).—P. 457—463.
  40. Valias A. C., Lernike R. F., Grindeland R. E. Effects of spaceflight on rat humerus geometry, biomechanics and biochemistry // FASEBJ.—1990.—4, N 1.—P. 47—54.
  41. Wronski T. I., Morey-Holton E. R. Skeletal response to stimulated weightlessness: a comparison of suspension techniques // Aviat. Space and Environ. med.—1987.—58 (1).—P. 63—68.

---

#### EFFECT OF THE INTERMITTENT HYPOXIA ON THE BONE TISSUE STATE AFTER MICROGRAVITATION MODELING

V. A. Berezovskiy, I. G. Litovka,  
H. G. Chaka, S. Magomedov, and N. V. Mehed

We studied the influence of low  $P_{O_2}$  under normal atmospheric pressure on the Ca and P metabolism, bone remodeling markers, and biomechanical properties of the femura bone in rats with their hind limbs unloaded. A hypoxic gas mixture (HGM) was given in intermittent regime A and B for 8 hours/day during 28 days. It was shown that regime A slows down the development of osteopenia and may be used in complex with other rehabilitation procedures for preventing the unloading osteopenia.

УДК 621.3.013:389

## Вимірювання дипольних магнітних моментів технічних об'єктів

В. В. Дегтярьов

Надійшла до редакції 02.10.00

На основі мультипольної моделі зовнішнього магнітного поля запропоновано шістнадцятиточковий магнітометричний метод вимірювання дипольних моментів технічних об'єктів, що зменшує вплив завадонесучих мультиполів і зовнішніх електромагнітних завад на точність вимірювань.

Точність вимірювання дипольного магнітного момента супутника безпосередньо пов'язана з вирішенням навігаційних задач і в кінцевому рахунку впливає на визначення траєкторії і орієнтацію супутника, через те що навіть невеликі за величиною, але постійно наявні недипольні складові магнітного потенціалу приводять до появи суттєвих похибок [1]. Тому підвищення точності зазначених вимірювань визначає необхідність розробки магнітометричних методів і засобів вимірювання магнітних параметрів джерела поля, які захищенні від впливу завадонесучих мультиполів вимірюваного джерела і, крім того, — від нестационарних електромагнітних полів, що створюються зовнішніми джерелами.

Вимірювання дипольних магнітних моментів засновано на мультипольній моделі зовнішнього магнітного поля (ЗМП) джерела, яка аналітично подається гармонічним рядом Гаусса [2] в циліндричній системі координат:

$$U = \frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (R^2 + z^2)^{-(n+1)/2} \times \sum_{m=0}^n (g_{nm} \cos m\varphi + h_{nm} \sin m\varphi) P_n^m [z(R^2 + z^2)^{-1/2}], \quad (1)$$

де  $g_{nm}$ ,  $h_{nm}$  — постійні коефіцієнти ряду, що дорівнюють магнітним моментам мультиполів  $m$ -го по-

рядку просторової гармоніки порядку  $n$ ;  $P_n^m [z(R^2 + z^2)^{-1/2}]$  — приєднані поліноми Лежандра.

Для просторової гармоніки першого порядку ( $n = 1$ ) коефіцієнти  $g_{11}$ ,  $h_{11}$ ,  $g_{10}$  дорівнюють компонентам дипольного магнітного момента джерела ЗМП на ортогональні осі  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ :  $g_{11} = M_x$ ,  $h_{11} = M_y$ ,  $g_{10} = M_z$ .

Мультипольна концепція магнітного поля джерела дозволяє застосувати точковий магнітометричний метод з метою виділення дипольної складової магнітного поля зі спектру мультиполів просторових гармонік ЗМП вищого порядку ( $n \geq 2$ ), що приводить в кінцевому рахунку до необхідності створення точкових магнітометричних пристрій першого порядку для вимірювання складових дипольних моментів джерел ЗМП.

На точність вимірювання дипольних моментів технічних об'єктів впливають мультиполія вищих порядків вимірюваного ЗМП — квадруполь, октуполь та інші, які є завадами і приводять до появи мультипольної складової методичної похибки.

Зниження цієї похибки може бути досягнуто за рахунок виключення сигналів завад, що створюються мультиполіями гармонік парного порядку і мультиполіями октупольної складової магнітного поля шляхом вибору оптимальної сітки контрольних точок і розташування певного числа первинних індукційних перетворювачів точкового типу (дат-

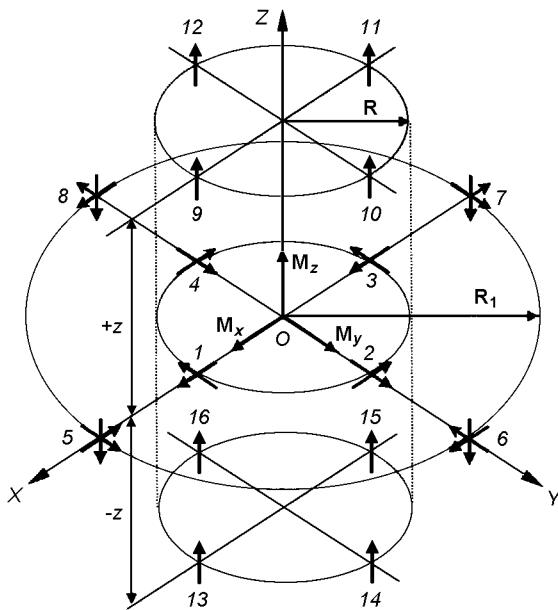


Схема розміщення точкових датчиків 1 — 16 навколо вимірюваного джерела ЗМП (див. текст)

чиків) навколо досліджуваного джерела ЗМП.

Пропонується шістнадцятичковий магнітометричний метод вимірювання компонентів  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  дипольної складової ЗМП джерела с точністю до завадонесучої гармоніки п'ятого порядку. Схема розміщення точкових датчиків навколо вимірюваного джерела ЗМП і орієнтація їх магнітних осей відносно вимірюваних складових  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  зображена на рисунку. Тут  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  — осі прийнятої системи координат, початок якої суміщений з геометричним центром вимірювального пристрою; стрілками позначено орієнтацію магнітних осей котушок датчиків, початок і кінець яких відповідають початку і кінцю обмотки індукційних котушок датчиків.

Як видно, пристрій виконано з шістнадцяти датчиків, поділених на три системи: дві по чотири датчики і вісім датчиків в третій. Системи двокомпонентних датчиків 1 ( $R$ ,  $0^\circ$ ,  $0$ ), 2 ( $R$ ,  $90^\circ$ ,  $0$ ), 3 ( $R$ ,  $180^\circ$ ,  $0$ ), 4 ( $R$ ,  $270^\circ$ ,  $0$ ) і друга система трикомпонентних датчиків 5 ( $R_1$ ,  $0^\circ$ ,  $0$ ), 6 ( $R_1$ ,  $90^\circ$ ,  $0$ ), 7 ( $R_1$ ,  $180^\circ$ ,  $0$ ), 8 ( $R_1$ ,  $270^\circ$ ,  $0$ ) розміщені в екваторіальній площині ( $z = 0$ ) рівномірно на колах радіусів  $R$  і  $R_1$  відповідно ( $R_1/R = 1.15$ ). Вісім однокомпонентних датчиків третьої системи 9 ( $R$ ,  $0^\circ$ ,  $+z$ ), 10 ( $R$ ,  $90^\circ$ ,  $+z$ ), 11 ( $R$ ,  $180^\circ$ ,  $+z$ ), 12 ( $R$ ,  $270^\circ$ ,  $+z$ ) і 13 ( $R$ ,  $0^\circ$ ,  $-z$ ), 14 ( $R$ ,  $90^\circ$ ,  $-z$ ), 15 ( $R$ ,  $180^\circ$ ,  $-z$ ), 16 ( $R$ ,  $270^\circ$ ,  $-z$ ) розміщені в площині  $\pm z$  на двох аксіальних колах радіуса  $R$ ,

чутливість до напруженості магнітного поля цих датчиків удвічі менша, ніж чутливість осьових котушок датчиків 5—8. Котушки кожної з систем датчиків з'єднані відносно вимірюваного дипольного поля послідовно узгоджено, відносно одна одну — зустрічно.

### ВИМІРЮВАННЯ КОМПОНЕНТІВ РАДІАЛЬНОГО ДІПОЛЬНОГО МОМЕНТА

Відносно вимірюваного дипольного поля, пропорційного  $g_{11}$ , радіальні і дотичні котушки вимірювального каналу  $X$  з'єднані електрично послідовно узгоджено, тому корисні сигнали, які наводяться в цих котушках вимірюваним дипольним полем, підсумовуються.

На магнітні осі радіальних  $1R$ ,  $3R$ ,  $5R$ ,  $7R$  і дотичних  $2\varphi$ ,  $4\varphi$ ,  $6\varphi$ ,  $8\varphi$  котушок датчиків 1—8, що здійснюють вимірювання  $M_x$ , впливають відповідно радіальна і дотична складові напруженості ЗМП джерела, які знаходяться шляхом диференціювання потенціалу  $U(1)$  за координатами  $R$  і  $\varphi$ .

Для аналізу запропонованого шістнадцятичкового магнітометричного методу достатньо обмежити гармонічні ряди радіальної і дотичної складових напруженості ЗМП членами до  $n = 3$ , які в цьому випадку для точок екваторіальної площини описуються такими виразами:

— радіальна складова напруженості ЗМП

$$\begin{aligned} H_R(z=0) &= -\frac{\partial U}{\partial R} = \\ &= \frac{1}{4\pi R^3} [2(g_{11}\cos\varphi + h_{11}\sin\varphi) + \\ &+ \frac{3}{R} \left[ -\frac{1}{2}g_{20} + 3(g_{22}\cos 2\varphi + h_{22}\sin 2\varphi) \right] + \\ &+ \frac{6}{R^2} [-g_{31}\cos\varphi - h_{31}\sin\varphi + 10(g_{33}\cos 3\varphi + h_{33}\sin 3\varphi)]]; \end{aligned} \quad (2)$$

— дотична складова напруженості ЗМП

$$\begin{aligned} H_\varphi(z=0) &= -\frac{\partial U}{\partial \varphi} = \\ &= \frac{1}{4\pi R^3} \{ (g_{11}\sin\varphi - h_{11}\cos\varphi) + \\ &+ \frac{6}{R} (g_{22}\sin 2\varphi - h_{22}\cos 2\varphi) + \frac{3}{R^2} \left[ -\frac{1}{2}(g_{31}\sin\varphi - h_{31}\cos\varphi) + \right. \\ &\left. - h_{33}\sin 3\varphi + 15(g_{33}\sin 3\varphi - h_{33}\cos 3\varphi) \right] \} + \dots \end{aligned} \quad (3)$$

Ці складові впливають на магнітні осі котушок каналу  $X$  і наводять електричні сигнали:

— в системі котушок  $1R$ ,  $2\varphi$ ,  $3R$ ,  $4\varphi$  датчиків

1—4, що розміщені на колі радіуса  $R$

$$\begin{aligned} E'_x &= \frac{1}{k_f} (H_{R1} + H_{\varphi 2} - H_{R3} - H_{\varphi 4}) = \\ &= \frac{6g_{11}}{k_f R^3} + \frac{15(-g_{31} + 2g_{33})}{k_f R^5} + \dots = E'_{x1} + E'_{x3} + \dots; \end{aligned} \quad (4)$$

— в системі котушок  $5R$ ,  $6\varphi$ ,  $7R$ ,  $8\varphi$  датчиків 5—8, що розміщені на колі радіуса  $R_1$

$$\begin{aligned} E''_x &= \frac{1}{k_{f1}} (H_{R5} + H_{\varphi 6} - H_{R7} - H_{\varphi 8}) = \\ &= \frac{6g_{11}}{k_{f1} R_1^3} + \frac{15(-g_{31} + 2g_{33})}{k_{f1} R_1^5} + \dots = E''_{x1} + E''_{x3} + \dots, \end{aligned} \quad (5)$$

де  $k_f$ ,  $k_{f1}$  — постійні по напруженості магнітного поля датчиків 1—4 і 5—8 відповідно;  $E'_{x1}$ ,  $E''_{x1}$  — корисні сигнали, які пропорційні коефіцієнту  $g_{11}$  дипольної складової магнітного поля;  $E'_{x3}$ ,  $E''_{x3}$  — сигнали завад, що пропорційні коефіцієнтам  $g_{31}$ ,  $g_{33}$  октупольної складової магнітного поля.

Результатуючий електричний сигнал на виході вимірювального каналу  $X$  дорівнює різниці сигналів (4), (5) вказаних систем котушок, що з'єднані послідовно стрічкою

$$\begin{aligned} E_x &= \frac{6g_{11}}{k_f R^3} \left( \frac{k_s R^3}{R_1^3} - 1 \right) + \frac{15}{k_f R^5} (-g_{31} + 2g_{33}) \times \\ &\times \left( k_s \frac{R^5}{R_1^5} - 1 \right) + \dots = E_{x1} + E_{x3} + \dots, \end{aligned} \quad (6)$$

де  $k_s = k_f/k_{f1} = S_1/S$ ;  $S$ ,  $S_1$  — чутливості до напруженості магнітного поля радіальних і дотичних котушок датчиків 1—4 і 5—8 відповідно.

В сигналі  $E_x$  відсутні сигнали завад, що створюються мультиполеми парних завадонесучих гармонік. За умови  $R_1 = k_s^{1/5} R$  сигнал завади  $E_{x3}$ , який створюється октупольною складовою магнітного поля ( $n = 3$ ), дорівнює нулю. В цьому випадку результатуючий електричний сигнал на виході вимірювального каналу  $X$  буде дорівнювати

$$E_x = \frac{6g_{11}}{k_f R^3} (k_s^{2/5} - 1) + \dots = E_{x1} + \dots \quad (7)$$

За вимірюваним значенням електричного сигналу  $E_x$  визначається  $x$ -складова дипольного момента джерела ЗМП:

$$g_{11} = M_x = \frac{1}{6} E_x k_f R^3 / (k_s^{2/5} - 1).$$

Результатуючий сигнал  $E_x$  вимірюється з похибкою, яка зумовлена непарними завадонесучими гармоніками ЗМП вищих порядків, з яких гар-

моніка п'ятого порядку вносить основний вагомий вклад в мультипольну складову методичної похибки вимірювання.

Компоненти напруженості магнітного поля завадонесучої гармоніки п'ятого порядку впливають на магнітні осі радіальних і дотичних котушок вимірювального каналу  $X$  і утворюють сигнал завади, який дорівнює

$$E_{x5} = \frac{210}{k_f R^7} \frac{1 - k_s^{2/5}}{k_s^{2/5}} \left( \frac{1}{8} g_{51} - \frac{3}{2} g_{53} + 99 g_{55} \right),$$

де

$$g_{51} = \frac{5}{8} M_x x_0^4, \quad g_{53} = -\frac{5}{192} M_x x_0^4, \quad g_{55} = \frac{1}{384} M_x x_0^4;$$

$x_0$  — координата ексцентричності магнітного момента  $M_x$  відносно прийнятої системи координат по осі  $X$ .

Мультипольна складова методичної похибки вимірювання  $M_x$  за умови  $k_s = 2$  дорівнює

$$\delta_x = \frac{E_{x5}}{E_{x1}} 100 \% = -10 \left( \frac{k_x}{R/L_x} \right)^4 100 \%, \quad (8)$$

де  $k_x = x_0/L_x \leq 0.5$  — коефіцієнт ексцентричності дипольного момента  $M_x$ ;  $L_x$  — габаритний розмір джерела ЗМП за координатним напрямком  $X$ .

Аналогічним чином визначається корисний електричний сигнал, що наводиться в котушках  $1\varphi$ ,  $2R$ ,  $3\varphi$ ,  $4R$  і  $5\varphi$ ,  $6R$ ,  $7\varphi$ ,  $8R$  вимірювального каналу  $Y$ , який за умови  $R_1 = k_s^{1/5} R$  буде дорівнювати

$$E_y = \frac{6h_{11}}{k_f R^3} (k_s^{2/5} - 1) + \dots = E_{y1} + \dots$$

Сигнал завади, що наводиться радіальною  $H_{R5}$  і дотичною  $H_{\varphi 5}$  компонентами п'ятої гармоніки ЗМП у вказаних котушках каналу  $Y$ , дорівнює

$$E_{y5} = \frac{210}{k_f R^7} \frac{1 - k_s^{2/5}}{k_s^{2/5}} \left( \frac{1}{8} h_{51} + \frac{3}{2} h_{53} + 99 h_{55} \right),$$

де

$$h_{51} = \frac{5}{8} M_y y_0^4, \quad h_{53} = \frac{5}{192} M_y y_0^4, \quad h_{55} = \frac{1}{384} M_y y_0^4;$$

$y_0$  — координата ексцентричності момента  $M_y$  по осі  $Y$ .

Мультипольна похибка вимірювання  $M_y$  визначається виразом ( $k_s = 2$ )

$$\delta_y = \frac{E_{y5}}{E_{y1}} \cdot 100 \% = -10 \left( \frac{k_y}{R/L_y} \right)^4 \cdot 100 \%, \quad (9)$$

$k_y = y_0/L_y \leq 0.5$  — коефіцієнт ексцентричності ди-

польного момента  $M_y$ ;  $L_y$  — габаритний розмір джерела ЗМП по координатному напрямку  $Y$ .

З аналізу виразів (8), (9) випливає, що при розміщенні датчиків на контрольній відстані двох габаритних розмірів джерела ЗМП для  $k_x = k_y = 1/3$  складова методичної похибки вимірювання  $M_x$  і  $M_y$  дорівнює 0.77 %.

### ВИМІРЮВАННЯ ОСЬОГО ДИПОЛЬНОГО МОМЕНТА $M_z$

Вимірювання складової  $M_z$  здійснюється  $z$ -котушками трикомпонентних 5—8 і однокомпонентних 9—16 датчиків, магнітні осі яких орієнтовані паралельно координатній осі  $Z$ . На магнітні осі котушок  $5z - 8z$  і  $9z - 16z$  каналу  $Z$  впливає осьова складова напруженості магнітного поля вимірюваного джерела  $H_z = -\partial U/\partial z$ . Результатуючий сигнал на виході каналу  $Z$  дорівнює:

$$\begin{aligned} E_z = & -\frac{8g_{10}}{k_f} \left[ \frac{1}{R_1^3} + \frac{2z^2 - R^2}{(R^2 + z^2)^{5/2}} \right] + \\ & + \frac{4g_{30}}{k_f} \left[ \frac{3}{R_1^5} - \frac{3R^2(R^2 - 8z^2) + 8z^4}{(R^2 + z^2)^{9/2}} \right] + \dots = \\ & = E_{z1} + E_{z3} + \dots \end{aligned}$$

де  $E_{z1}$  — результатуючий корисний сигнал;  $E_{z3}$  — результатуючий сигнал завади від гармоніки порядку  $n = 3$ .

З останнього виразу випливає, що за умови

$$\frac{8z^4 - 24z^2R^2 + 3R^4}{(R^2 + z^2)^{9/2}} = \frac{3}{R_1^5}$$

сигнал завади  $E_{z3}$ , що створюється октупольною складовою магнітного поля, буде дорівнювати нулю. Запишемо останній вираз у вигляді функції  $R_1/R = f(z/R)$ :

$$\frac{R_1}{R} = \left[ \frac{8}{3} \left( \frac{z}{R} \right)^4 - 8 \left( \frac{z}{R} \right)^2 + 1 \right]^{-1/5} \left[ 1 + \left( \frac{z}{R} \right)^2 \right]^{9/10},$$

для якої за умови  $z/R = 0.22$ , що відповідає співвідношенню  $R_1/R = 2^{1/5}$ , сигнал  $E_{z3} = 0$ .

В цьому випадку результатуючий сигнал  $E_z$  вимірювального каналу  $Z$  буде дорівнювати

$$E_z = \frac{1.14g_{10}}{k_f R^3} + \dots = E_{z1} + \dots,$$

звідки  $g_{10} = M_z = 0.88E_z k_f R^3$ .

Електричний сигнал  $E_z$  вимірюється з похибкою, що обумовлена завадонесучою п'ятою гармонікою ЗМП, яка наводить в осьових котушках вимі-

рювального каналу  $Z$  сигнал завади

$$E_{z5} = \frac{1}{k_f R^7} (-3.65g_{50} + 0.45g_{54}),$$

де  $g_{50} = 5M_z z_0$ ,  $g_{54} = 0$  — коефіцієнти, які дорівнюють магнітним моментам п'ятої гармоніки при зміщенні момента  $M_z$  на координату  $z_0$  по осі  $Z$ .

Похибка вимірювання  $M_z$  дорівнює

$$\delta_z = \frac{E_{z5}}{E_{z1}} \cdot 100 \% = 16 \left( \frac{k_z}{R/L_z} \right)^4 \cdot 100 \%,$$

де  $k_z = z_0/L_z \leq 0.5$  — коефіцієнт ексцентрисності дипольного моменту  $M_z$ ;  $L_z$  — габаритний розмір джерела ЗМП по координатному напрямку  $Z$ .

Аналіз останнього виразу виявляє, що на контрольній відстані  $R = 2L_x$  для  $k_z = 1/3$  мультиполна похибка вимірювання дипольного моменту  $M_z$  дорівнює 1.23 %.

### ВИСНОВКИ

1. Запропонований магнітометричний метод вимірювання дипольних магнітних моментів технічних об'єктів і вимірювальний пристрій, що його реалізує, забезпечують селективне виділення дипольної складової магнітного поля зі спектру мультиполів ЗМП з точністю до п'ятої гармоніки.

2. За рахунок оптимального вибору сітки точок розміщення магніточутливих датчиків навколо вимірюваного джерела ЗМП досягається локалізація завади, що створюється мульти полями парних гармонік ЗМП і непарної гармоніки третього порядку, внаслідок чого підвищується точність вимірювання.

3. Шістнадцятиточковий заводозахищений вимірювальний пристрій може бути використаний для вимірювання дипольних моментів технічних об'єктів, до яких ставляться вимоги щодо обмеження рівня напруженості магнітного поля.

1. Сарычев В. А., Овчинников М. Ю. Магнитные системы ориентации искусственных спутников Земли. — М., 1985.—104 с.—(Итоги науки и техники. Сер. Исследование космического пространства; Т. 23).

2. Яновский Б. М. Земной магнетизм. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1978.—592 с.

### MEASUREMENT OF MAGNETIC DIPOLE MOMENTS OF ENGINEERING OBJECTS

V. V. Dehtiar'ov

We propose a 16-point magnetometric method for measuring dipole moments of engineering objects. The method is based on a multipole model of the external magnetic field, which diminishes the effect of interfering multipoles and external electromagnetic disturbances on the accuracy of measurements.

УДК 621.316.546

# Коммутация сильноточных электрических цепей в экстремальных условиях

В. В. Кирик

Інститут електродинаміки Національної академії наук України, Київ

*Надійшла до редакції 17.01.00*

Розглянуто основні характеристики рідиннометалевих контактів. Подано конструкцію рідиннометалевого комутаційного приладу, що забезпечує комутацію струмів до ста тисяч ампер в умовах підвищених температур незалежно від положення у просторі.

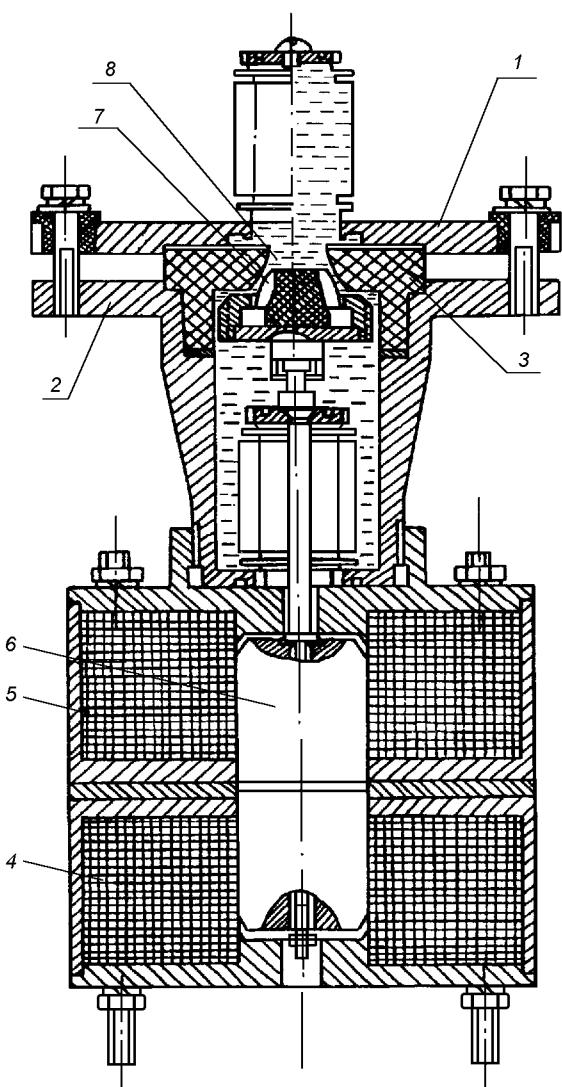
При проектировании орбитальной станции «Мир», которая в своем составе имела ядерную энергетическую установку, предполагалось использовать в качестве коммутационной и защитной электрической аппаратуры силовых цепей термоэмиссионного генератора жидкотемпературные коммутационные устройства. Применение жидкого металла в качестве электрических контактных элементов было необходимо для исключения их «холодной сварки» в условиях невесомости и повышенных температур (до 600 °C), которая присуща твердометаллическим коммутационным аппаратам.

Жидкотемпературные контакты (ЖМК) имеют малое и стабильное переходное сопротивление, которое состоит из сопротивления поверхностной пленки между твердым электродом и жидким металлом, а также сопротивления жидкого металла или образующихся интерметаллических сплавов и соединений. С точки зрения стабильности сопротивления выбирается такая контактная пара металлов, чтобы жидкий металл смачивал твердый. При этом воздух не может проникнуть в зону контакта, и в силу этого окисная пленка не может образовываться на твердой поверхности. Малое переходное сопротивление позволяет достичь в ЖМК плотностей тока, превышающих десятки и сотни ампер на квадратный миллиметр. В ЖМК нет необходимости в контактном нажатии. Они открывают возмож-

ность создания приводов с использованием для коммутации энергии самой разываемой цепи. Свойство текучести жидкого металла позволяет избавиться механической вибрации, сваривания и залипания контактов. Температурные режимы ЖМК определяются свойствами используемых металлов. Необходимое превышение температуры жидкого металла над температурой его плавления определяется свойствами металла и конструкцией устройства. В ЖМК открывается возможность создания дополнительного конвективного теплообмена. Достижение больших плотностей тока открывает возможность миниатюризации контактных устройств. Кроме всего сказанного, в ЖМК нет необходимости применения драгметаллов.

Совокупность перечисленных выше свойств позволила разработать коммутационные устройства и самовосстанавливающиеся предохранители на большие токи при напряжении 100 В и выше. При отключении используется энергия самой разываемой цепи с реализацией таких явлений, как джоулево тепловыделение и пинч-эффект. Необходимо только спровоцировать эти процессы в нужном месте. Характерно, что чем выше ток отключения, тем лучше условия коммутации.

В основу сильноточных жидкотемпературных коммутационных аппаратов (коммутаторов) большой силы положено клапанное запорное устройство



Коммутационное устройство: 1, 2 — токоподводы; 3 — керамическая шайба; 4, 5 — электромагнитные соленоиды; 6 — сердечник соленоида; 7 — керамический клапан; 8 — жидкий металл

пережимного типа, на основе которого разработана серия коммутационных устройств. В качестве жидкого металла использовались легкоплавкие щелочные металлы (Ga, In, Na, Sn) и их эвтектики с температурой плавления выше 10 °C.

На рисунке представлено одно из устройств [1]. Коммутационное устройство содержит герметичный корпус с токоподводами 1 и 2. В токоподвод 2 впрессована керамическая шайба 3. Коммутационное устройство содержит также соленоиды 4 и 5, предназначенные для включения и отключения устройства. К сердечнику 6 соленоида посредством тяги подсоединен бочкообразный клапан 7.

Внутренняя полость коммутационного устройства заполнена вакуумированным жидким металлом 8.

Для включения коммутатора на катушку 4 соленоида подается напряжение, в результате чего сердечник отодвигает клапан от шайбы, давая возможность металлу заполнить зазор между ними. Через жидкий металл замыкаются контакты токоподводов силовой цепи. Для приведения коммутационного аппарата в отключенное состояние подается напряжение на катушку 5 соленоида.

Отключение электрической цепи с номинальным током и ниже происходит после соприкосновения клапана с шайбой за счет испарения пленки металла в микронеровностях пережимных поверхностей. Следует отметить, что после первого спада тока к нулю возникают повторные замыкания, вызванные локальными подтоками жидкого металла по микронеровностям. Металл испаряется и выбрасывается из них. Повторные замыкания продолжаются до тех пор, пока металл не будет удален на такое расстояние, когда силы поверхностного натяжения смогут удерживать его от слияния. Поэтому керамика не должна смачиваться жидким металлом. Поскольку подтоки металла являются локальными, и их сечение меньше начального сечения пленки после соприкосновения пережимных поверхностей, а разрывной ток тот же, то выталкивание металла происходит с большей силой и быстрее, поэтому длительность повторных замыканий меньше, чем время от момента соприкосновения клапана с шайбой до первого спада тока к нулю. Время отключения токов ниже номинального составляет от 0.15 с до нескольких секунд и находится в обратной квадратичной зависимости от тока коммутации, т. е. для аппарата является оптимальным режим коммутации токов выше номинального значения.

При коммутации аварийных токов, превышающих более чем в десять раз номинальное значение, отключение цепи происходит до соприкосновения пережимных поверхностей клапана и шайбы. Оно вызывается как вскипанием жидкого металла, так и воздействием электромагнитных сил. Причем тепловой процесс является преобладающим при плотностях тока в зазоре, не превышающих  $240 \text{ A/mm}^2$ . Разрыв цепи за счет пинч-эффекта может происходить только при резком броске тока и при плотности тока в зазоре, превышающей  $240 \text{ A/mm}^2$ . Время отключения цепи в аварийном режиме ( $I_{\text{h}} < I < 10I_{\text{h}}$ ) находится в интервале от 0.005 до 0.1 с. Чем выше ток, тем меньше время разрыва цепи. При коммутации наблюдается резкое уменьшение тока к нулю, что говорит о практической бездуговой коммутации. Подтверждением этому является и состояние рабочих поверхностей

клапана и шайбы, которые были изъяты и подвергнуты осмотру после нескольких циклов коммутации. Рабочие поверхности в месте соприкосновения были гладкими, но окрашенными в черный цвет по круговой зоне шириной в 2—2.5 мм. Черный «порошок» на рабочих поверхностях вызван образованием и осаждением на поверхности мелкодисперсных капель жидкого металла и окислов, которые образуются при испарении металла и интенсивном его движении в рабочей зоне. Дуговые процессы в зазоре наблюдаются при разрушениях на рабочей поверхности керамики. Возникновение дуги приводит к сильному оплавлению поверхностей и образованию протока, соизмеримого с диаметром проходного отверстия в шайбе. Поэтому керамика должна хорошо выдерживать ударные нагрузки.

Бездуговая коммутация, характеризуемая резкими перепадами тока, приводит к перенапряжениям в цепи. Разрывной промежуток между поверхностями жидкого металла в зоне пережатия не превышает 2—2.5 мм, поэтому максимальное напряжение коммутации составляет 100 В. Существенного различия в работе аппарата при постоянном и переменном токах не наблюдается. Удельное поверхностное переходное контактное сопротивление между жидким металлом и твердометаллическим электродом составляло  $0.0028 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$  (без специальной обработки стальных контактных поверхностей). Максимальное количество циклов коммутации аварийного тока не превышает 200 раз на керамике АБН-1. При использовании алюмоборонитридной керамики с большим усилием на сжатие и при обеспечении шероховатости поверхности порядка 0.5—5 мкм возможно увеличение ресурса

аппарата по количеству отключений в несколько раз.

Испытания коммутационных аппаратов проводились в наземных условиях при температурах от 30 до 600 °С. Работоспособность аппаратов сохраняется в указанном интервале температур и не зависит от их ориентации в пространстве. Максимальный вес экспериментального образца при токе 50 кА составил 8.1 кг. Проведенные исследования электрических коммутационных аппаратов с жидкотекущим рабочим телом показывают, что надежность их работы определяется термической стойкостью пережимных и каналаобразующих керамических материалов, а также их химической стойкостью жидким металлом. Использование жидкого металла в качестве контактного элемента наделяет коммутационные устройства положительными дополнительными свойствами, позволяющими обеспечить их надежную работу в экстремальных условиях.

1. Пивняк Г. Г., Липковский К. А., Кирик В. В. Электрические сильноточные контакты, устройства регулирования и защиты с жидкотекущим рабочим телом. — Киев: Изд-во НАН Украины, 1996.—150 с.

#### COMMUTATION POWER OF ELECTRICAL CIRCUITS IN EXTREME CONDITIONS

V. V. Kryuk

The basic characteristics of liquid-metal contacts are considered. The design of a liquid-metal switch ensuring commutation of currents up to one hundred of thousands of amperes in conditions of high temperatures and irrespective of position in space is presented.

УДК 629.7.054

## Многомерные задачи упругости подвеса поплавкового гирокопа

В. В. Каракун, В. Н. Мельник, В. Г. Лозовик

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

*Надійшла до редакції 15.02.00*

---

Наведено аналіз пружної взаємодії поплавкового двостепеневого гіроскопа з акустичним випромінюванням. Розкрито механізм одночасного впливу кутового руху ракети-носія і звукової хвилі на похибки поплавкового приладу.

---

Среди множества факторов, ухудшающих технические характеристики ракет-носителей, в частности транспортных РН, (продольные колебания, поступательная и угловая вибрации, кинематическое возмущение, тепловой факел ракетных двигателей и другие, менее значимые) особо следует отметить акустическое излучение, структура и интенсивность которого в общем случае носят случайный характер.

Звуковая волна генерирует в материале конструкций и комплектующих (навигационное оборудование, приборы управления и др.) множество форм колебаний, в том числе и резонансных. В конструкциях с небольшим значением импеданса в случае волнового совпадения это может привести к появлению необратимых деформаций, а также усталостных явлений в материале.

Вместе с тем оказалось, что одновременное воздействие аэродинамического шума и других внешних возмущений в совокупности могут привести к таким особенностям динамики изделий, которые не предусмотрены техническими условиями. Наиболее яркое подтверждение этого факта наблюдается в механических системах, содержащих носители кинетического момента.

Для конкретности рассмотрим поплавковый гирокопический датчик угловых скоростей, нашедший широкое применение в навигационных системах

летательных аппаратов. Конструкция его представляет собой два коаксиальных круговых цилиндра, разделенных тяжелой жидкостью. Внутренний (поплавок) заполнен инертным газом и содержит гиromотор, полуоси которого крепятся к боковой поверхности.

Пусть прибор установлен на ракете таким образом, что при старте РН (например, с поверхности Земли) вектор  $\omega_3$  угловой скорости поворота ее корпуса параллелен оси чувствительности (входной оси) прибора.

Вначале проанализируем совместное действие на гирокоп акустической вибрации торцов поплавка и углового движения корпуса РН, а затем — действие упругих перемещений боковой поверхности поплавка и качки корпуса ракеты. Мерой влияния этих факторов будем считать погрешность гирокопического датчика угловых скоростей.

В предположении отсутствия трансляции энергии изгибного движения торца на боковую поверхность поплавка, можно принять их соединение шарнирным. Тогда изгибное движение торцевой части под действием звуковой волны можно описывать уравнением тонкой круговой пластины, жестко закрепленной по краю:

$$D\Delta^2 W_T(x, y, t) + \rho h \ddot{W}_T(x, y, t) = q(x, y, t), \quad (1)$$

где

$$\Delta^2 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4} \stackrel{\text{def}}{=} A$$

— итерированный лапласиан;  $D = Eh^3/[12(1 - \sigma)]$ ,  $\rho$  и  $h$  — соответственно цилиндрическая жесткость, плотность материала и толщина пластины;  $\sigma$  — коэффициент Пуассона; пластина колеблется в плоскости  $xOy$ . На боковой поверхности  $\Gamma$  пластины

$$\Gamma: \begin{cases} x^2 + y^2 = R^2, \\ -\frac{h}{2} \leq z \leq \frac{h}{2} \end{cases} \quad (2)$$

выполняются граничные условия первого рода

$$W_T|_{\Gamma} = 0, \quad \frac{\partial W_T}{\partial n_1}|_{\Gamma} = 0, \quad (3)$$

что соответствует жесткому закреплению.

Уравнение (1) дает удовлетворительные результаты, если отношение толщины пластины к наименьшей длине генерируемой изгибной волны не превышает 0.1. В противном случае следует учитывать сдвиг и инерцию вращения или решать трехмерную задачу.

Асимптотическое решение задачи (1)–(3) найдем в виде линейной комбинации координатных функций

$$W_T \approx c^i u_i(x, y), \quad i = 1, \dots, N \quad (4)$$

со столбцом

$$C = (c^1 \ c^2 \ \dots \ c^N)^T = G^{-1}F, \quad (5)$$

где

$$G = \frac{4^5}{R^6} \pi \begin{vmatrix} 4 & 0 & 0 & 5 & 5 & 0 \\ 0 & 9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 9 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 19 & 7 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 7 & 19 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 \end{vmatrix}$$

— матрица Грама образов координатных функций, а элементы столбца  $F$  имеют вид:

$$F = \frac{3^2}{R^4} \begin{vmatrix} 2I_0 \\ \frac{6}{R} I_x \\ \frac{6}{R} I_y \\ -2I_0 + \frac{15}{R^2} I_x^2 + \frac{3}{R^2} I_y^2 \\ -2I_0 + \frac{3}{R^2} I_x^2 + \frac{15}{R^2} I_y^2 \\ \frac{12}{R^2} I_{xy} \end{vmatrix},$$

где

$$\iint_{x^2+y^2 \leq R^2} f(x, y) dx dy = I_0,$$

$$\iint_{x^2+y^2 \leq R^2} xf(x, y) dx dy = I_x,$$

$$\iint_{x^2+y^2 \leq R^2} yf(x, y) dx dy = I_y,$$

$$\iint_{x^2+y^2 \leq R^2} x^2 f(x, y) dx dy = I_x^2 \quad \text{и т. д.},$$

$f(x, y) \approx c^i \nu_i(x, y)$ ,  $\nu_i = Au_i$  — образы функций  $u_i$ .

Система линейно независимых функций

$$u_i = u_i(x, y), \quad x^2 + y^2 \leq R^2, \quad z = 0, \quad i = 1, \dots, N \quad (6)$$

принадлежит к области определения бигармонического оператора  $A = \Delta^2$  и удовлетворяет условиям (2).

В качестве координатных выберем функции

$$\begin{aligned} u_1 &= \left(1 - \frac{x^2}{R^2} - \frac{y^2}{R^2}\right)^2, & u_2 &= \frac{x}{R} u_1, & u_3 &= \frac{y}{R} u_1, \\ u_4 &= \frac{x^2}{R^2} u_1, & u_5 &= \frac{y^2}{R^2} u_1, & u_6 &= \frac{xy}{R^2} u_1. \end{aligned} \quad (7)$$

Задавая акустическое воздействие в виде плоской волны давления

$$P = P_0 \exp(i(\omega t - \mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r}_0)),$$

где  $\mathbf{k}_0 = \mathbf{n} \omega / c_0$  — волновой вектор;  $\mathbf{n}$  — единичный вектор распространения волны;  $\mathbf{r}_0$  — радиус-вектор точки пространства;  $P_0 = 160$  дБ при радиусе  $R = 0.02$  и жесткости  $D = 5$  Н·м прогиб алюминиевой пластины, например, при частоте  $\omega = 1000$  с<sup>-1</sup> имеет вид (рис. 1) и составляет около 50 нм в центре.

Скорость изгибающего движения торцов является относительной к корпусу прибора. Угловое движение ракеты со скоростью  $\omega_3$  — переносным. Возникающие при этом силы инерции Кориолиса  $d\mathbf{F}_{ii}^C(t) = -dm\mathbf{W}_C(t)$  образуют пару с моментом (рис. 2)

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{ii}^C(t) &= LW_C(t) \int dm = \\ &= 2m_T L \omega_3(t) \dot{W}(t) \sin[\omega_3, \hat{\mathbf{W}}_T(t)], \end{aligned} \quad (8)$$

где  $L$  — длина поплавка,  $m_T$  — масса торцевой пластины поплавка.

В соответствии с теоремой Резаля гироскоп начнет прецессировать со скоростью

$$\frac{d\mathbf{H}}{dt} = \mathbf{M}_{ii}^C(t), \quad (9)$$

где  $\mathbf{H}$  — кинетический момент гироскопа.

Угловая скорость прецессии определяется соотношением

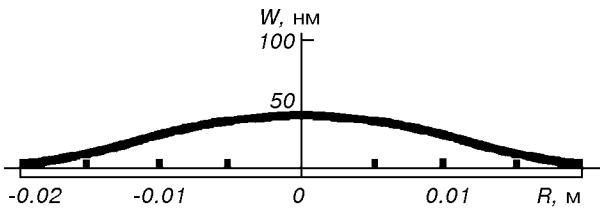


Рис. 1. Прогиб торцевой поверхности поплавка под действием акустической волны

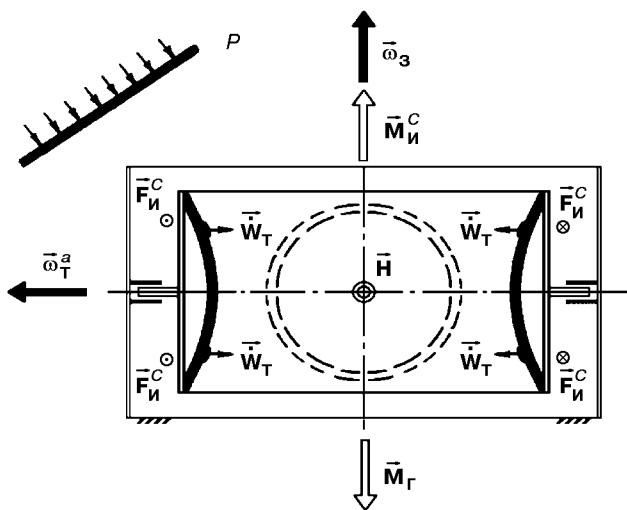


Рис. 2. Влияние прогибов торцов поплавка на прецессию гирокопа

$$\begin{aligned} \omega_T^a(t) &= \frac{M_i^c(t)}{H \sin(H, \omega_T^a)} = \\ &= \frac{2m_1 L \omega_3(t) \dot{W}(t) \sin[\omega_3(t), \dot{W}_T(t)]}{H \sin(H, \omega_T^a)}. \end{aligned} \quad (10)$$

Как следует из формулы (10), отсутствие качки корпуса ракеты приведет к отсутствию девиации оси гирокопа вместе с поплавком относительно цапф.

Прецессия гирокопа вызовет появление гирокопического момента  $M_r(t)$ , который будет уравновешивать  $M_i^c(t)$ , т. е.

$$M_r(t) = H \times \omega_T^a = -M_i^c(t).$$

Движение поплавка относительно выходной оси будет происходить до тех пор, пока не будет приостановлено моментом сил упругости пружины.

В свою очередь, элементы боковой цилиндрической поверхности поплавка под действием волны акустического давления  $P$  приобретут касательную  $V(t)$  и радиальную  $W(t)$  составляющие перемеще-

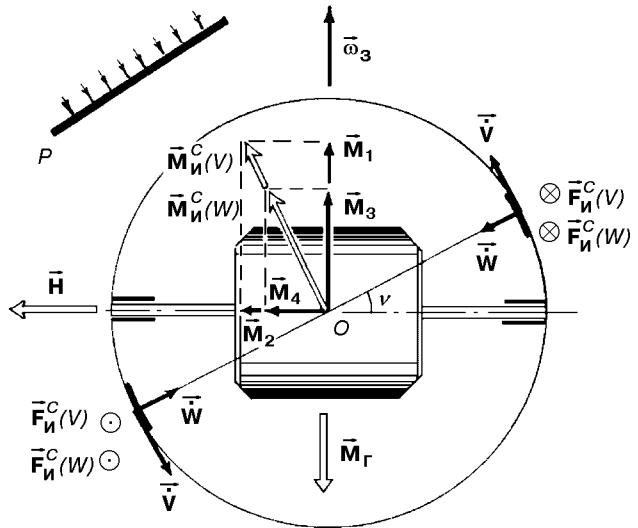


Рис. 3. Влияние перемещений боковой поверхности на девиацию главной оси

ния (рис. 3). Как и в предыдущем случае, тангенциальная составляющая  $V(t)$  приведет к появлению сил инерции Кориолиса и, соответственно, момента

$$\begin{aligned} M_i^c(V) &= \int_{m_\Pi} 2RW_C dm = \frac{4J_\Pi \omega_3(t) \dot{V}(t) \sin[\omega_3(t), \dot{V}(t)]}{R} = \\ &= \frac{4J_\Pi \omega_3(t) \dot{V}(t)}{R} \sin v, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $R$ ,  $m_\Pi$ ,  $J_\Pi$  — радиус, масса и момент инерции поплавка с ротором, соответственно. Его составляющая  $M_1 = 2J_\Pi \omega_3(t) \dot{V}(t)/R$  вызывает прецессию оси фигуры гирокопа со скоростью  $\dot{H} = M_1$ , в то время как другая,  $M_2 = 2\pi J_\Pi \omega_3(t) \dot{V}(t)/R$ , не представляет опасности, так как уравновешивается вращающим моментом.

Повторяя логику предыдущих рассуждений, оценим влияние радиальных перемещений  $W(t)$ . При качке корпуса РН они приводят к возникновению момента сил инерции Кориолиса

$$M_i^c(W) = \int_{m_T} 2RW_C' dm = \frac{4J_\Pi \omega_3(t) \dot{W}(t) \sin[\omega_3(t), \dot{W}(t)]}{R}$$

с составляющими

$$M_3 = \frac{2\pi J_\Pi \omega_3(t) \dot{W}(t)}{R}, \quad M_4 = \frac{2J_\Pi \omega_3(t) \dot{W}(t)}{R},$$

первая из которых также приводит к прецессии оси фигуры, а составляющая  $M_4$  уравновешивается моментом гиродвигателя.

Момент  $M_3$  вызывает прецессию с угловой скоростью

$$\omega_{\Pi}^a = \frac{2J_{\Pi}\omega_3}{HR\sin(H, \omega_{\Pi}^a)} [\dot{V}(t) + \pi\dot{W}(t)]$$

при выполнении условия (рис. 3)

$$\mathbf{M}_1 + \mathbf{M}_2 = -\mathbf{M}_{\Gamma}.$$

Под действием волны акустического давления  $P$  боковая поверхность поплавка кроме тангенциальной  $V$  и радиальной  $W$  в общем случае будет иметь и третью составляющую упругого перемещения поверхности вдоль образующей цилиндра. Вместе с тем ею можно пренебречь как вследствие малости (жесткость конструкции в этом направлении значительно превышает остальные), так и по причине отсутствия моментов сил инерции Кориолиса (их векторы пересекают центр подвеса).

Дифференциальные уравнения упругой цилиндрической поверхности поплавка запишем в виде [3]

$$\begin{aligned} \omega_{\Pi}^2 \rho V + \frac{\partial^2 V}{\partial \beta^2} - \frac{1-\sigma}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} + \frac{\partial W}{\partial \beta} = 0, \\ \omega_{\Pi}^2 \rho W + \frac{\partial V}{\partial \beta} + \\ + c^2 \left( \frac{1}{R^4} \frac{\partial^4 W}{\partial \beta^4} + \frac{2}{R^2} \frac{\partial^4 W}{\partial z^2 \partial \beta^2} + \frac{\partial^4 W}{\partial z^4} \right) + W = F(z, \beta, t), \end{aligned} \quad (12)$$

где  $c^2 = h^2/(12R^2)$  — коэффициент,  $h$  и  $R$  — толщина и радиус оболочки,  $0 < z < L$ ,  $0 \leq \beta \leq 2\pi$  — центральный угол,  $L$  — длина,  $F(z, \beta, t) = P_0 \exp[i\omega t - k_0(\alpha z + \beta_1 R_\beta)]$ ;  $\alpha = \cos\theta_1 \sin\theta$ ,  $\beta_1 = \sin\theta_1$ ,  $z$ ,  $R_\beta$  — координаты точки поверхности.

Для граничных условий вида

$$\begin{aligned} V|_{z=0} = V|_{z=L} = 0, \\ \frac{\partial^2 W}{\partial z^2}|_{z=0} = \frac{\partial^2 W}{\partial z^2}|_{z=L} = 0 \end{aligned}$$

решения системы (12) строятся в виде рядов

$$\begin{aligned} V(z, \beta, t) &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} V_{mn}(t) \exp(im\beta) \sin\left(\frac{n\pi z}{L}\right) = \\ &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ -im \frac{F_{mn}}{\Delta_{mn}} \exp(im\beta) \sin\left(\frac{n\pi z}{L}\right) \right], \\ W(z, \beta, t) &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} W_{mn}(t) \exp(im\beta) \sin\left(\frac{n\pi z}{L}\right) = \\ &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \left[ \omega^2 \rho - m^2 - \frac{1-\sigma}{2} \left( \frac{n\pi}{L} \right)^2 \right] \times \right. \\ &\quad \left. \times \left[ \frac{F_{mn}}{\Delta_{mn}} \exp(im\beta) \sin\left(\frac{n\pi z}{L}\right) \right] \right\}, \end{aligned} \quad (13)$$

где

$$\begin{aligned} F_{mn}(t) &= l_{mn} P_0 \exp(i\omega t) \frac{2n\pi [1 - (-1)^n]}{(n\pi)^2 - (k_0 L)^2} \times \\ &\times \left[ i \frac{\exp(-2\pi k_0 \beta_1 R) - 1}{2\pi(k_0 \beta_1 R + m)} \right], \quad k_0 L \neq n\pi, \\ \Delta_{mn} &= m^2 + \left[ \omega^2 \rho - m^2 - \frac{1-\sigma}{2} \left( \frac{n\pi}{L} \right)^2 \right] \times \\ &\times \left\{ (\omega^2 \rho + 1) + c^2 \left[ \left( \frac{m}{R} \right)^2 + \left( \frac{n\pi}{L} \right)^2 \right]^2 \right\}. \end{aligned}$$

Численный анализ показывает, что тангенциальные составляющие  $V$  на 7-8 порядков меньше радиальных  $W$ . Поэтому ими можно в дальнейшем пренебречь и ограничиться более подробной оценкой перемещений в радиальном направлении.

Очевидно, что продольные  $n$ -формы будут только нечетными, т. е.  $n = 1, 3, 5, \dots$ , а  $m$ -формы для отрицательных и положительных значений будут совпадать (рис. 4, *a*, *б*). На рис. 4, *в—е* представлены некоторые низшие формы перемещений поверхности в плоскости шпангоута. Их значение в среднем сечении ( $z = 3$  см) составляет 4.50—4.60 нм для принятых значений уровня звукового давления. С увеличением номера формы амплитуды уменьшаются.

Ограничивааясь суммированием по  $m$ -формам от -10 до 10, а по  $n$ -формам — от 1 до 10, можно провести численную оценку перемещений  $W$  поверхности под действием акустической волны (рис. 5, *а—г*) для некоторых значений частоты падающей волны  $\omega$ . Продольные  $n$ -формы низших номеров изображены на рис. 6.

В итоге имеем

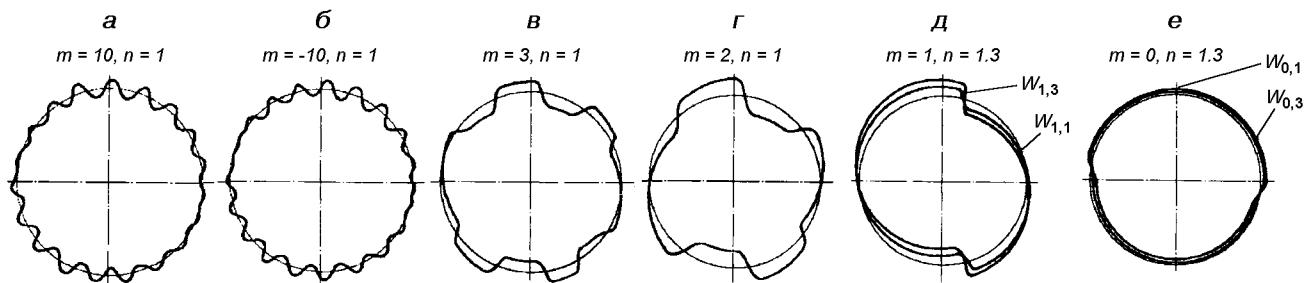
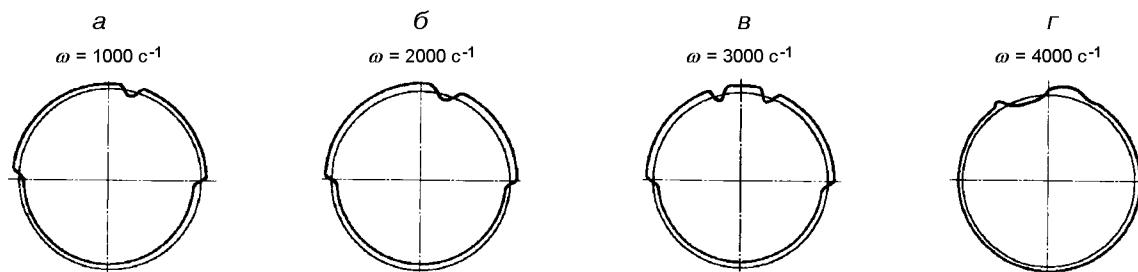
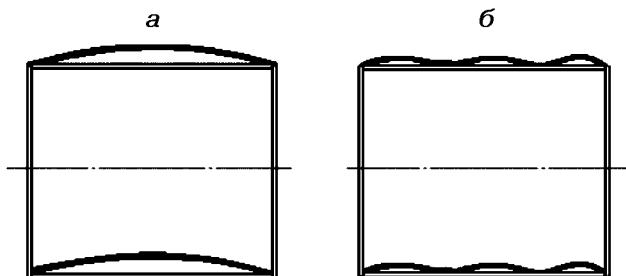
$$\omega^a = \omega_{\Pi}^a + \omega_{\Gamma}^a \approx \frac{2\omega_3}{HR} [m_{\Gamma} RL \dot{W}_{\Gamma}(t) + J_{\Pi} [\dot{V}(t) + \pi \dot{W}(t)]],$$

где  $\dot{W}_{\Gamma}(t)$ ,  $\dot{V}(t)$  и  $\dot{W}(t)$  — скорости перемещения элементов поверхности поплавка под действием звуковой волны.

Угловое положение корпуса РН зададим с помощью углов Эйлера (рис. 7), выбрав в качестве опорной (стартовой) систему  $O_1\xi\eta\zeta$ . Систему координат  $O_1x_1y_1z_1$  свяжем жестко с корпусом прибора,  $O_1xyz$  — с поплавком. Тогда имеют место очевидные соотношения

$$\begin{aligned} \omega_{x_1} &= \dot{\psi} \sin\theta \sin\varphi + \dot{\theta} \cos\varphi, \\ \omega_{y_1} &= \dot{\psi} \sin\theta \cos\varphi - \dot{\theta} \sin\varphi, \\ \omega_{z_1} &= \dot{\psi} \cos\theta + \dot{\varphi} + \omega_0, \end{aligned} \quad (14)$$

где  $\omega_0$  — измеряемая угловая скорость,  $\psi(t)$ ,  $\theta(t)$ ,  $\varphi(t)$  — соответственно углы рыскания, тангажа и собственного вращения. Для системы координат,

Рис. 4. Поперечные mn-формы для  $\omega = 1000 \text{ c}^{-1}$ Рис. 5. Радиальные перемещения поверхности в среднем сечении: значения  $W_{\max}$  для а, б, в, г составляют соответственно 3.717, 3.879, 4.118, 4.372 нмРис. 6. Продольные mn-формы колебаний для  $\omega = 1000 \text{ c}^{-1}$ ,  $m = 0, 1, 2$ : а —  $n = 1$ , б —  $n = 3$ 

связанной с поплавком, имеем

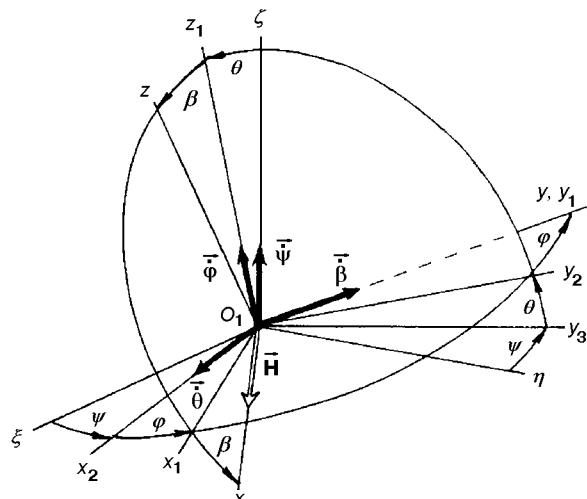
$$\begin{aligned}\omega_x &= \omega_{x_1} \cos \beta - \omega_{z_1} \sin \beta, \\ \omega_y &= \omega_{y_1} + \dot{\beta}, \\ \omega_z &= \omega_{x_1} \sin \beta + \omega_{z_1} \cos \beta.\end{aligned}\quad (15)$$

Теперь имеются все необходимые предпосылки для оценки степени одновременного влияния на гирокомпас и акустического излучения.

Угловые скорости  $\omega_x$  и  $\omega_z$  приведут к возникновению «акустической» погрешности, определяемой соотношением

$$\begin{aligned}\omega_1^a(t) &\approx \frac{2(\omega_x \sin \beta + \omega_z \cos \beta)}{HR} \mathbf{x} \\ &\times [m_T R L \dot{W}_T(t) + J_\Pi [\dot{V}(t) + \pi \dot{W}(t)]].\end{aligned}\quad (16)$$

Вектор скорости  $\omega_1^a$  направлен вдоль выходной оси

Рис. 7. Углы Эйлера:  $O_1\xi\eta\zeta$  — опорная система координат,  $O_1x_1y_1z_1$  — связанная с корпусом прибора,  $O_1xyz$  — жестко связанная с поплавком

прибора (рис. 8).

Угловая скорость  $\omega_y$  корпуса РН в совокупности с радиальной акустической вибрацией  $\dot{W}(t)$  поплавка приведет к возникновению угловой скорости прецессии

$$\omega_2^a = \frac{4J_\Pi \omega_y(t) \dot{W}(t)}{HR},$$

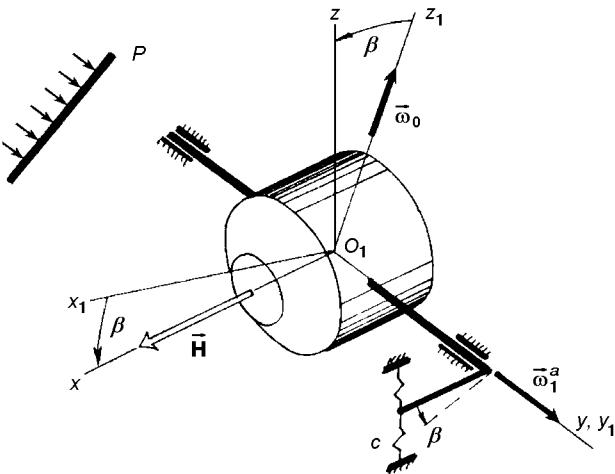


Рис. 8. Влияние кинематического возмущения  $\omega_x$  и  $\omega_y$  на акустическую девиацию

вектор которой направлен вдоль входной оси (рис. 9).

Дифференциальное уравнение движения подвижной части прибора с учетом соотношений (16), (17) запишем в виде [2]

$$\begin{aligned} B\ddot{\beta} + R\{[(\omega_z + \omega_2^a \cos \beta)^2 - \omega_x^2] \sin \beta \cos \beta - \\ - \omega_z(\omega_z + \omega_2^a \cos \beta) \cos 2\beta\} + \\ + H[\omega_x \sin \beta + (\omega_z + \omega_2^a \cos \beta) \cos 2\beta] + \\ + B(\dot{\omega}_y + \dot{\omega}_1^a) + c\beta + b\dot{\beta} = 0, \end{aligned}$$

где  $B = J_0 + J_y$ ,  $R = J_0 + J_z - J_x$ ;  $J_x$ ,  $J_y$ ,  $J_z$  — моменты инерции поплавка,  $J$ ,  $J_0$  — полярный и экваториальный моменты инерции ротора.

Ограничиваюсь рамками прецессионного движения, определим угол поворота подвижной части следующим образом:

$$\begin{aligned} \beta = -\frac{H\omega_z \cos \beta}{c} - \frac{H\omega_x \sin \beta}{c} - \frac{B\dot{\omega}_y}{c} - \\ - \frac{H\omega_2^a \cos^2 \beta}{c} - \frac{B\dot{\omega}_1^a}{c}. \quad (17) \end{aligned}$$

Смысл первых трех слагаемых известен — это полезный сигнал, пропорциональный измеряемой угловой скорости, методическая погрешность от влияния перекрестной угловой скорости  $\omega_x$  и погрешность, обусловленная влиянием углового ускорения  $\dot{\omega}_y$  соответственно. Два последних слагаемых в правой части есть погрешность прибора, обусловленная совместным воздействием на подвес гироскопа кинематического возмущения и звуковых полей.

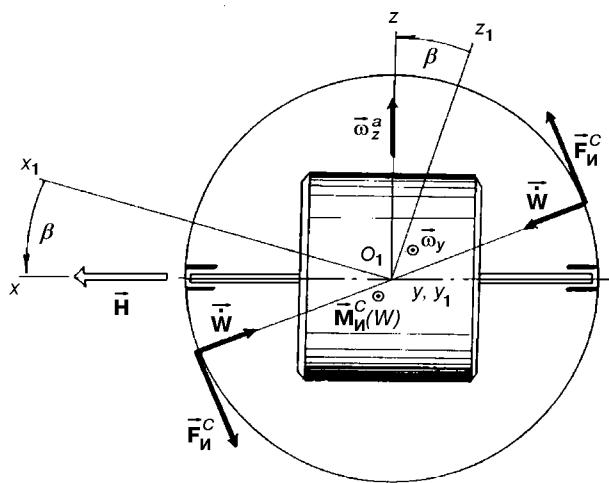


Рис. 9. Влияние кинематического возмущения  $\omega_y$  на акустическую девиацию

Сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований серийно выпускаемого поплавкового гироскопа типа ДУСУ2-6АС, проведенных на установке «Сирена» ИПП НАН Украины, и теоретических расчетов дают удовлетворительное совпадение [1]. Максимальное значение погрешности ДУСУ (сдвиг нуля) соответствует «ложной» угловой скорости 0.6 град/с при частоте 810 Гц звукового излучения. Характер изменения погрешности — квадратичный, и систематическая составляющая появляется с частоты  $f = 500$  Гц.

Полученные результаты позволяют провести качественный и количественный анализ этого явления, оценить степень влияния того или иного фактора, а также решить задачи оптимизации упруго-вязких свойств подвеса гироскопа.

1. Каракун В. В., Лозовик В. Г., Потапова Е. Р., Мельник В. Н. Многомерные задачи нестационарной упругости подвеса поплавкового гироскопа. — Киев: Корнейчук, 2000.—128 с.
2. Лунц Я. Л. Ошибки гироскопических приборов. — Л.: Судостроение, 1968.—232 с.
3. Kennard E. H. The new approach to shell theory circular cylinders // J. Appl. Mech.—1953.—20, N 1.

#### MULTI-DIMENSIONAL PROBLEMS OF THE ELASTICITY OF FLOATING GYROSCOPE HOLDER

V. V. Karachun, V. N. Mel'nik, and V. G. Lozovik

We analyze the elastic interaction of the floating two-degree gyroscope with acoustic radiation. The mechanism of simultaneous influence of attitude and sound wave on the errors of the floating device is revealed.