

НАЦІОНАЛЬНЕ
КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО
УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНА
АКАДЕМІЯ НАУК
УКРАЇНИ

КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

ІСТОРІЯ - АВАНГІДА

ДОСЛІДЖЕННЯ

УКРАЇНІ

КИЇВ

АРЄ 8, ¶ 5/6, 2002

KYIV

ІСТОРІЯ
ДОСЛІДЖЕНЬ
ПРОСВІТЛЕННЯ
ІННОВАЦІЙ

21—27 вересня 2002 р.

*Proceeding of the 2-nd Ukrainian Conference
for Perspective Space Researches
(21—27 September 2002)*

ЗМІСТ

Черемних О. К. Передмова

Камелін А. Б., Кунцевич В. М., Черемных О. К. О результатах рассмотрения и подготовки совместных российско-украинских космических экспериментов на российском сегменте Международной космической станции

Анфимов Н. А., Лук'янченко В. І., Синельщиков М. В., Суворов В. В., Цимбалюк М. М. Основные результаты предварительного рассмотрения проекта «Долгосрочной программы совместных российско-украинских научных исследований и технологических экспериментов на РС МКС»

Патон Б. Е., Аснис Е. А., Заболотин С. П., Баранский П. И., Бабич В. М., Бондаренко В. П., Юрчук Н. А. Получение совершенных материалов в космосе

Шпак А. П., Федоров О. П., Берсудский Е. И., Живолуб Е. Л. Некоторые проблемы исследования процессов направленного затвердевания в условиях микрогравитации (создание установки МОРФОС)

Гамуля Г. Д., Скорогод В. В., Солнцев В. П., Сурду М. Н., Фролов Г. А. Разработка научной аппаратуры и антифрикционных материалов нового поколения для проведения космического эксперимента «Материал-Трение»

Бондаренко С. И., Гаврилов Р. В., Еременка В. В., Русанов К. В., Шербакова Н. С., Дергунов И. М., Крюков А. П., Королев П. В., Селянинова Ю. Ю., Жуков В. М., Харитонов В. С., Куценко К. В., Деев В. И., Шувалов В. А. Программа российско-украинских исследований теплообмена и гидродинамики в жидком гелии на Международной космической станции

Мороженко О. В., Відьмаченко А. П. Задачі спектрополяриметричного експерименту на Міжнародній космічній станції

Відьмаченко А. П., Іванов Ю. С., Мороженко А. В., Сосонкін М. Г. Ультрафіолетовий спектрометр-поляриметр для планетного моніторинга на борту МКС

Гопасюк С. І., Гопасюк О. С. Спектрополяриметр проекта СОТ

Кордюм Є. Л. Перспективи розвитку космічної та гравітаційної біології в Україні

Цетлін В. В., Дешевая Е. А., Новикова Н. Д., Полікарпов Н. А., Грачев Е. А., Григорян О. Р., Заворина О. А., Лазутін Л. Л., Нечаєв О. Ю., Чурило І. В. Влияние низких доз радиации на микробное сообщество космических станций

Борисова Т. А., Крысанова Н. В., Гиммелрейх Н. Г. Моделированная гравитация и глутаматергическая передача в больших полушариях мозга

Мищенко Л. Т. Влияние моделированной микрогравитации на ростовые процессы и фотосинтетический аппарат растений *Triticum aestivum L.*, инфицированных вирусом полосатой мозаики пшеницы

Родіонова Н. В., Оганов В. С. Цитологічні механізми гравітаційно-залежних змін у кістковій тканині

Климчук Д. О., Мартин Г. М. Застосування модельних систем — рослинних клітин *in vitro* — в дослідженні гравічувтивості організмів на клітинному рівні

CONTENTS

- 4 Cheremnykh O. K. Foreword
- 5 Kamelin A. B., Kuntsevich V. M., Cheremnykh O. K. On the results of the consideration and preparation for joint Russian-Ukrainian space experiments onboard the Russian Segment of the International Space Station
- 9 Anfimov N. A., Luk'yashchenko V. I., Sinel'shchikov M. V., Suvorov V. V., Tsimbalyuk M. M. The main results of the preliminary consideration of the project of the long-term program for joint Russian-Ukrainian scientific research and technological experiments aboard the Russian Segment of the ISS
- 15 Paton B. E., Asnis E. A., Zabolotin S. P., Baranskii P. I., Babich V. M., Bondarenko V. P., Yurchuk N. A. The production of perfect materials in space
- 19 Shpak A. P., Fedorov O. P., Bersuds'kyi E. I., Zhyvolub E. L. Some problems in the investigation of the processes of directional crystallization under microgravity (creating the MORPHOS installation)
- 28 Gamulya G. D., Skorokhod V. V., Solntsev V. P., Surdu M. N., Frolov G. A. The elaboration of novel scientific instrumentation and antifriction materials for performing the «Material-Friction» space experiment
- 35 Bondarenko S. I., Gavrylov R. V., Yeremenko V. V., Rusanov K. V., Shcherbakova N. S., Dergunov I. M., Kryukov A. P., Korolev P. V., Selyaninova Yu. Yu., Zhukov V. M., Kharitonov V. S., Kutsenko K. V., Deev V. I., Shuvalov V. A. Program of the Russian-Ukrainian investigations of the hydrodynamics and heat transfer in liquid helium aboard the International Space Station
- 39 Morozhenko O. V., Vid'machenko A. P. Tasks of the spectropolarimetric experiment aboard the International Space Station
- 45 Vid'machenko A. P., Ivanov Yu. S., Morozhenko A. V., Sosonkin M. G. UV Spectrometer-polarimeter for planetary monitoring aboard the ISS
- 51 Gopasyuk S. I., Gopasyuk O. S. The spectropolarimeter of the SOT project
- 54 Kordyum E. L. Prospects of the development of space and gravitational biology in Ukraine
- 58 Tsetlin V. V., Deshevaya E. A., Novikova N. D., Polikarpov N. A., Grachev E. A., Grigoryan O. R., Zavorina O. A., Lazutin L. L., Nechaev O. Yu., Churilo I. V. Effect of low radiation doses on microbe population in space stations
- 62 Borisova T. A., Krysanova N. V., Himmelreich N. G. Artificial gravity and glutamatergic transmission in cerebral hemispheres
- 66 Mishchenko L. T. The effect of artificial gravity on grows processes and photosynthetic apparatus of *Triticum aestivum L.* infected by the wheat streak mosaic virus
- 71 Rodionova N. V., Oganov V. S. Cytological mechanisms of gravity-dependent changes in a bone tissue
- 77 Klymchuk D. O., Martyn G. M. The use of the model systems, plant cells *in vitro*, in studing gravisensitivity of organisms at cellular level

- Козировська Н. О., Ковтунович Г. Л., Лар О. В., Ковалчук М. В., Негруцька В. В., Корнійчук О. С., Рогуцький І. С., Алпатов А. П., Кордюм В. А.* Моделювання молекулярних взаємодій бактерій з рослинами для політів експериментів
- Козак Л. В.* Зміна турбулентних процесів у нижній термофазі при проходженні внутрішніх гравітаційних хвиль
- Черемных О. К., Демків Д. П.* Взаимодействие высокоенергетических частиц с МГД-модами в магнитосфере Земли
- Федун В. Н., Юхимук А. К., Войцеховская А. Д., Черемных О. К.* Нелинейное взаимодействие вистлеров и инерциональных альвеновских волн в магнитосфере Земли
- Калита Б. И., Мезенцев В. П., Сорока С. А.* Наземно-космический активный акустический эксперимент «Геофон»
- Ермилов Ю. В.* Анализ вибраакустического состояния ракетных двигателей радиолокационными методами
- Аснис А. Е., Демченко В. Ф., Лесной А. Б., Заболотин С. П.* Математическое моделирование тепловых и гидродинамических процессов при электронно-лучевой бестигельной зонной плавке монокристалла кремния в условиях микрогравитации
- Майборода В. П., Молчановская Г. М.* Структурные мотивы и процессы массопереноса в расплавах
- 81** *Kozyrovska N. O., Kovtunovych G. L., Lar O. V., Kovalchuk M. V., Negruetska V. V., Korniichuk O. S., Rogutskyi I. S., Alpatov A. P., Kordyum V. A.* Modeling molecular plant-bacteria interactions for flight experiment
- 86** *Kozak L. V.* Changes of turbulence processes in thermosphere in the passage of inner gravity waves
- 91** *Cheremnykh O. K., Demkiv D. P.* Interaction of high-energy particles with magnetohydrodynamic modes in the Earth's magnetosphere
- 96** *Fedun V. M., Yukhimuk A. K., Voitsekhovskaya A. D., Cheremnykh O. K.* The nonlinear interaction of the whistler wave with the inertial Alfvén wave in the magnetosphere of the Earth
- 102** *Kalita B. I., Mezentsev V. P., Soroka S. A.* The ground-space active acoustic experiment Geofon
- 107** *Ermilov Yu. V.* Analysis of vibroacoustic condition of rocket engines by radar techniques
- 112** *Asnis A. E., Demchenko V. F., Lesnoi A. B., Zabolotin S. P.* Mathematical modelling of thermal and hydrodynamic processes in the electron beam floating-zone melting of silicon monocrystal under microgravity conditions
- 117** *Maiboroda V. P., Molchanovskaya G. M.* The structural motives and processes of mass transfer in the melts

НАШІ АВТОРИ

OUR AUTHORS

А. Б. Камелин¹, В. М. Кунцевич², О. К. Черемных²

¹Національне космічне агентство України, Київ

²Інститут космічних досліджень НАНУ—НКАУ, Київ

О результатах рассмотрения и подготовки совместных российско-украинских космических экспериментов на российском сегменте Международной космической станции

Наводяться основні результати роботи з підготовки першочергових спільних російсько-українських експериментів на російському сегменті МКС.

Институтом космических исследований Национальной академии наук и Национального космического агентства Украины (ИКИ НАНУ—НКАУ) и Центральным научно-исследовательским институтом машиностроения (ЦНИИМАШ) совместно с ОАО НПК «Курс» и Российской космической корпорацией «Энергия» им. С. П. Королева (РКК «Энергия») продолжается работа по подготовке совместных российско-украинских космических экспериментов на российском сегменте Международной космической станции (РС МКС). ИКИ НАНУ—НКАУ и ЦНИИМАШем разработан и согласован с РКК «Энергия» и ведущими научными организациями Российской Федерации проект долгосрочной программы совместных научных исследований и технологических экспериментов на РС МКС, принятый Российским авиакосмическим агентством (Росавиакосмосом) и Национальным космическим агентством Украины (НКАУ) в качестве базового документа для дальнейшей совместной работы. Документ включает в себя описание 48 космических экспериментов по следующим основным направлениям исследований:

- космическая биология и медицина;
- космические материаловедение и технология;
- физико-химические процессы в условиях микрогравитации;

- исследование Земли и ближнего космоса;
- астрофизика и внеатмосферная астрономия;
- космическая гелиоэнергетика.

Решением совещания Росавиакосмоса и НКАУ, состоявшегося в феврале 2002 г. в г. Москве, утвержден перечень первоочередных экспериментов, представляющих взаимный интерес для России и Украины, которые могут быть осуществлены на этапе развертывания МКС. Этим же решением предложены мероприятия организационного характера, направленные на дальнейшее совершенствование подготовки экспериментов.

К первоочередным совместным экспериментам, которые планируется провести на этапе развертывания Международной космической станции, отнесены следующие:

- «Биосорбент», «Биополимер» — по космической биологии и медицине;
- «Материал-Трение» + «Пента-Усталость», «Трубка», и КПО — по космическому материаловедению и технологии;
- МОРФОС — по исследованиям физико-химических процессов в условиях микрогравитации;
- «Обстановка» и «Планетный мониторинг — Спектрометр-поляриметр» — по исследованию Земли и ближнего космоса.

Кратко охарактеризуем каждый из них.

Космический эксперимент «Биосорбент» вызвал очень большую заинтересованность у российских коллег. Он предусматривает создание специфических углеродных сорбентов и их применение в условиях космоса. Последние дадут возможность лечить методом экстракорпоральной детоксикации критические состояния, которые могут возникать на фоне стресса при продолжительном пребывании человека в космосе. Созданные сорбенты могут быть также применены для биотехнологического получения особо чистых веществ в условиях микрогравитации. Головным постановщиком космического эксперимента от Украины является Институт проблем сорбции и проблем эндоэкологии, а от Российской Федерации — Российское акционерное общество «Биопрепарат», Государственный научный центр Российской Федерации и Институт медико-биологических проблем Российской академии наук.

Наиболее подготовленными в области космического материаловедения и технологии признаны эксперименты «Материал-Трение», «Пента-Усталость», «Трубка» и КПО.

Эксперимент «Материал-Трение» позволит получить новые материалы и обеспечить космическую область достоверными триботехническими данными, а его результаты найдут свое применение в космическом материаловедении, машиностроении и энергетике. Головными постановщиками космического эксперимента от Украины являются Специальное конструкторско-технологическое бюро по криогенной технике Физико-технического института низких температур им. Б. И. Веркина НАНУ, Государственное конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля, Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича Национальной академии наук Украины. От Российской стороны партнерами выступают Центральный научно-исследовательский институт в кооперации с другими научно-производственными организациями.

В рамках предложенного Институтом электросварки им. Е. О. Патона НАНУ космического эксперимента КПО уже сейчас российскими и украинскими специалистами проводятся совместные работы, предусматривающие разработку конструкций преобразуемого объема.

Предложенный космический эксперимент является пионерской разработкой, поскольку в настоящее время в космической технике нет примеров создания крупногабаритных конструкций преобразуемого объема. Проведенные предварительные расчеты основных параметров оболочек ожидаемых размеров позволяют надеяться на то, что коэффициент изменения объема может достигать 30. С

российской стороны в реализации проекта примет участие РКК «Энергия».

Исследование Земли и ближнего космоса планируется провести в рамках космических экспериментов «Обстановка» и «Спектрометр-поляриметр».

Широкий частотный и динамический диапазон измерений полевых характеристик, предложенный в космическом эксперименте «Обстановка», предоставляет возможность объединения в единый комплекс задачи локальной диагностики плазменного окружения МКС с дистанционным зондированием ионосферы. Планируется, что будут проведены исследования плазменно-волновых процессов взаимодействия МКС с ионосферой, изучены естественные возмущения электромагнитного поля, а также возмущения, вызванные антропогенной деятельностью и крупными естественными катастрофами на поверхности Земли. Достигнута договоренность постановщика космического эксперимента от Российской Федерации Института космических исследований Российской академии наук и постановщика космического эксперимента от Украины — Львовского центра Института космических исследований Национальной академии наук и Национального космического агентства Украины о совместном проведении космического эксперимента «Обстановка». В международную научную кооперацию по этому эксперименту предполагается включение также научных работников Австрии, Болгарии, Великобритании, Венгрии, Германии, Польши и Франции.

С помощью космического эксперимента «Планетный мониторинг — Спектрометр-поляриметр» предполагается осуществлять мониторинг планет Солнечной системы и Земли с борта МКС. Ультрафиолетовый спектрополяриметр, предложенный в рамках этого космического эксперимента, предназначен для измерения интенсивности, степени поляризации и положения плоскости поляризации отраженного верхними слоями планетных атмосфер солнечного излучения и интенсивности излучения Солнца в интервале длин волн 220—300 нм. Он позволит получить данные, необходимые для изучения физических и оптических свойств аэрозольной составляющей верхних слоев планетных атмосфер, в том числе и земной атмосферы, для высот более 30 км. Результаты эксперимента будут иметь существенное значение для таких областей знаний, как геофизика и физика атмосферы Земли.

Головным постановщиком эксперимента от Украины выступает Главная астрономическая обсерватория НАНУ. Эксперимент активно поддерживается постановщиком от Российской Федерации — Институтом космических исследований Российской академии наук.

На этапе развертывания МКС исследования по физико-химическим процессам в условиях микрогравитации представлены космическим экспериментом МОРФОС — выращивание кристаллов модельных веществ путем направленной кристаллизации с непосредственной видеорегистрацией морфологии границы раздела твердой и редкой фаз в условиях микрогравитации.

В рамках этого эксперимента впервые планируется осуществить единый методический подход к измерению основных параметров фронта кристаллизации при использовании монокристаллических затравок как в двумерных, так и в трехмерных образцах. Можно ожидать, что будут получены экспериментальные и теоретические данные по проблеме затвердевания материалов в условиях действия различных факторов, зависящих от уровня сил тяготения и конвекционных потоков расплава, в том числе:

- исследование устойчивости фазовой границы;
- исследование взаимодействия фронта кристаллизации с инородными включениями;
- исследование огрубления дендритных ветвей.

В области практического применения этот космический эксперимент направлен на:

- апробацию технологических условий получения на орбите монокристаллов различных веществ и сплавов с улучшенной структурой и свойствами;
- разработку технологии получения искусственных композитов в условиях микрогравитации.

Головными постановщиками эксперимента МОРФОС являются Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАНУ и Центральный научно-исследовательский институт машиностроения (Российская Федерация).

После 2004 г., на начальной стадии эксплуатации МКС, планируется реализация второй группы экспериментов, с более длительным периодом наземной подготовки и требующих привлечения непосредственно космонавтов к выполнению запланированной программы исследований. Вторая группа включает эксперименты «Пента-Кипение», «Пента-Усталость», «Технология», «Трубка», «Биополимер» и «Биолаборатория».

Ожидается, что космический эксперимент «Биолаборатория», основной целью которого являются исследования биологических эффектов микрогравитации на клеточном и молекулярном уровнях у бактерий, растений, животных и человека с целью выяснения механизмов действия этого постоянного фактора космического полета и разработки на основе полученных данных концепций гравичувствительности клетки, позволит получить оригиналь-

ную научную информацию о гравизависимых базовых клеточных процессах, приблизиться к выяснению механизмов гравичувствительности клетки и к пониманию роли постоянно действующей на Земле силы тяжести в функционировании живых систем. Будут получены фундаментальные знания, необходимые для разработки эффективных космических клеточных биотехнологий в интересах биологической науки, медицины и сельского хозяйства. Головным постановщиком космического эксперимента от Украины является Институт ботаники им. Н. Г. Холодного НАНУ, а от Российской Федерации — ГНУ РФ ИМБП РАН.

Космический эксперимент «Биополимер» (Головные постановщики от Украины — Институт высокомолекулярной химии НАНУ и Институт урологии НАНУ) предполагает создание биологически активных полимерных материалов, устойчивых к биокоррозии за счет структурно-химической модификации полимеров. Планируется, что созданные биологически активные соединения повысят надежность и долговечность функционирования станции и защитят космонавтов от токсического воздействия биодеструкторов и их метаболитов. Эксперимент будет осуществлен в кооперации с МГУ им. М. В. Ломоносова.

По предложению российской стороны космический эксперимент «Пента-кипение» преобразован в группу экспериментов, состоящую из трех отдельных серий, и получил название «Криокомплекс-Кипение». На первом этапе предусматриваются эксперименты по изучению кипения жидкого гелия. В дальнейшем планируется расширить круг задач космического эксперимента, дополнив его фундаментальными и прикладными исследованиями по физике различных жидкостей, в частности, в условиях заданной по направлению и величине гравитации, и в которых существенна визуализация процессов. Головными постановщиками этих серий экспериментов являются СКТБ ФТИНТ (Украина) и ЦНИИМАШ (РФ).

Эксперимент «Пента-Усталость» ориентирован на исследование влияния факторов космического пространства на физико-механические свойства конструкционных материалов космического назначения, и в частности, на их квазистатические механические свойства и сопротивления усталостному разрушению. Постановщики: от Украины — СКТБ ФТИНТ НАНУ, от Российской Федерации — ЦНИИМАШ, РКК «Энергия».

Эксперимент «Технология» (постановщики: ИЭС им. Е. О. Патона и РКК «Энергия») направлен на совершенствование процесса получения кристаллов в условиях микрогравитации. Благодаря примене-

нию бесконтейнерной зонной плавки появляется реальная возможность создания более чистых, чем в ампулах, полупроводниковых материалов с более совершенной структурой самих кристаллов.

Космический эксперимент «Трубка» направлен на разработку и исследование параметров малогабаритных и миниатюрных тепловых труб для систем охлаждения и термостабилизации космических приборов и аппаратуры. Результаты эксперимента должны внести существенный вклад в теорию тепломассообмена. Они будут полезны не только при конструировании систем охлаждения и термостабилизации космических объектов, спутниковой аппаратуры, высотной авиации, ракетной техники, но и при создании высокоеффективных теплообменных устройств завтрашнего дня. Головные постановщики космического эксперимента от Украины — Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАНУ, а от Российской Федерации — ЦНИИМАШ, РКК «Энергия» и ИЦ им. М. В. Келдыша.

Центральный научно-исследовательский институт машиностроения предложил отнести некоторые эксперименты второй группы к группе первоочередных экспериментов. Это предложение в настоящее время всесторонне изучается.

Отбор перечисленных выше космических экспериментов осуществлялся в первую очередь с учетом степени их наземной подготовки, необходимости минимизации финансовых и материальных затрат на их осуществление, а также ограничений, накладываемых собственно ресурсами РС МКС: конструктивными особенностями, энергообеспечением научной аппаратуры, пропускной способностью при передаче информации с борта МКС на наземные пункты управления полетом, временными рамками проведения экспериментов, массой полезной нагрузки, транспортируемой российскими космическими аппаратами. Рассмотренные совместные эксперименты имеют, по мнению сторон, несомненную научно-практическую ценность, базируются на достигнутом уровне предшествующих космических исследований, проведенных украинскими и российскими учеными на орбитальных космических комплексах, имеют высокую степень наземной подготовки и учитывают ограничения, накладываемые

материальными ресурсами российского сегмента на полезные нагрузки для МКС. Немаловажную роль при отборе экспериментов играли и заинтересованность в их осуществлении соответствующих российских организаций-партнеров.

Работа по согласованию программ вышеназванных космических экспериментов и технических заданий на них близится к завершению. В настоящее время также заканчивается работа по согласованию «Положения о порядке реализации долгосрочной программы совместных Российско-украинских научных исследований и технологических экспериментов на РС МКС». Для разработки научной аппаратуры, наземного испытательного и вспомогательного оборудования и для обеспечения украинских организаций и предприятий необходимой нормативно-технической документацией в рамках долгосрочной программы в настоящее время разработан и находится на рассмотрении в Росавиакосмосе проект «Положения о согласовании работ по стандартизации ракетно-космической техники между Российской авиационно-космическим агентством и Национальным космическим агентством Украины, взаимном признании документов по стандартизации и взаимном обеспечении нормативными документами по стандартизации».

В рамках разрабатываемой «Программы сотрудничества Российской Федерации и Украины в области исследования и использования космического пространства в мирных целях на 2003 г.» запланированы работы украинских и российских ученых по реализации долгосрочной программы научных исследований и технологических экспериментов на РС МКС.

ON THE RESULTS OF THE CONSIDERATION OF AND PREPARATION FOR JOINT RUSSIAN-UKRAINE SPACE EXPERIMENTS ONBOARD THE RUSSIAN SEGMENT OF THE INTERNATIONAL SPACE STATION

A. B. Kamelin, V. M. Kuntsevich, and O. K. Cheremnykh

We present the main results of the preparation for the urgent joint Russian-Ukrainian experiments onboard the Russian Segment of the ISS.

Н. А. Анфимов¹, В. И. Лукьянченко¹, М. В. Синельщиков²,
В. В. Суворов¹, М. М. Цимбалюк¹

¹Центральний науково-дослідний інститут машинобудування Росавіакосмосу,
м. Корольов, Московська область, Росія

²Росавіакосмос, м. Москва, Росія

**Основные
рассмотрения
совместных
исследований
на РС МКС»**

**результаты
проекта
и
предварительного
«Долгосрочной
российско-украинских
технологических
программы
научных
экспериментов**

Розглядаються основні результати робіт із забезпечення реалізації першочергових спільних російсько-українських експериментів на РС МКС.

К настоящему времени усилиями российских и украинских ученых и специалистов разработан и подготовлен к утверждению проект «Долгосрочной программы совместных российско-украинских научных исследований и технологических экспериментов на РС МКС», предусматривающий выполнение 48 актуальных и значимых в научном и практическом отношении исследований и экспериментов [1, 2].

При формировании технического задания на совместные российско-украинские исследования российские ученые и специалисты исходили из того, что в результате выполнения исследований должны быть получены важные научные и практические результаты.

В основном близка к завершению работа по формированию, согласованию и подготовке к утверждению технических заданий на первоочередные совместные эксперименты: «Биосорбент», МОРФОС, «Материал — Трение», «Обстановка (Этап-1)», «Планетный мониторинг — Спектрометр-полариметр», «Трубка», «Технология», «Криокомплекс — Кипение», «Пента — Усталость»,

«Биолаборатория», «Биополимер» (таблица). Сроки реализации указанных экспериментов увязаны с решением проблем определения окончательной конфигурации РС МКС и утверждением «Положения о порядке реализации «Долгосрочной программы совместных российско-украинских научных исследований и технологических экспериментов на РС МКС» и использование полученных результатов».

Для практического развертывания работ в области совместной разработки уникальной научной аппаратуры, наземного испытательного и вспомогательного оборудования возникает необходимость обеспечения смежных украинских предприятий и организаций необходимой нормативно-технической документацией для обеспечения реализации в полном объеме «Долгосрочной программы совместных российско-украинских научных исследований и технологических экспериментов на РС МКС».

С этой целью разработан и в настоящее время находится на рассмотрении в Росавиакосмосе проект «Положения о согласовании работ по стандартизации ракетно-космической техники между Рос-

сийским авиационно-космическим агентством и Национальным космическим агентством Украины, взаимном признании документов по стандартизации и взаимном обеспечении нормативными документами по стандартизации».

Совместными усилиями ЦНИИМАШ и ИКИ НАНУ—НКАУ в настоящее время разработан проект «Положения о порядке реализации «Долгосрочной программы совместных российско-украинских научных исследований и технологических экспериментов на РС МКС» и использования полученных результатов».

В настоящее время ученые и специалисты России и Украины активно разрабатывают проект «Программы сотрудничества Российской Федерации и Украины в области исследования и использования космического пространства в мирных целях на 2003—2007 годы».

В частности, в рамках ОКР «РС МКС» предполагается участие ИКИ НАНУ-НКАУ, ОАО НПК «Курс», специализированных институтов НАНУ в проведении работ по согласованным программам, в том числе и в рамках «Долгосрочной программы совместных российско-украинских научных исследований и технологических экспериментов на РС МКС».

Концепция формирования ТЗ на совместные российско-украинские эксперименты заключается в создании оптимальной кооперации участников экспериментов и максимальном использовании заделов, имеющихся у каждой из сотрудничающих сторон.

При проведении совместного эксперимента «Биосорбент» с российской стороны предполагается участие РАО «Биопрепарат», ГНЦ ГосНИИ ОЧБ с кооперацией. В ходе эксперимента планируется осуществление биоспецифического хроматографического процесса в условиях микрогравитации с использованием замкнутой (герметичной) хроматографической системы.

В качестве биологической жидкости российские специалисты планируют использовать плазму донорской крови, обогащенную препаратом одного из интерлейкинов, а в качестве биосорбента-биосорбент, связывающий этот интерлейкин.

Необходимым условием успешного проведения экспериментов является согласование гидродинамических характеристик применяемых в исследований сорбентов.

Согласование ТЗ на совместный эксперимент «Биосорбент» продолжается.

В эксперименте МОРФОС планируется два постановщика эксперимента: с украинской стороны — Институт металлофизики НАНУ, с российской сто-

роны — ЦНИИМАШ. Партнеры имеют длительный опыт научных контактов и совместных работ.

Учитывая многолетний опыт ЦНИИМАШ по проведению экспериментов на пилотируемых и автоматических КА, включая опыт разработки бортовой научной аппаратуры различного назначения, целесообразно возложить на него роль головного разработчика блока визуализации оптических неоднородностей и стереоскопического наблюдения за фронтом кристаллизации, а также средств вибродиагностики (виброзащитной платформы, низкочастотных вибраторов, высокочувствительных акселерометров). К настоящему времени ТЗ на космический эксперимент МОРФОС практически согласовано.

В части эксперимента «Материал — Трение» с украинской стороны предполагается участие СКТБ ФТИНТ НАНУ (г. Харьков) и ИПМ НАНУ (г. Киев). С российской стороны в работах участвуют ЦНИИМАШ, РКК «Энергия», ИМАШ РАН, ИПМ РАН, НПО им. С. А. Лавочкина, НПО «Композит», ВНИИТРАНСМАШ.

Заинтересованность в результатах исследований подтвердили Российская академия наук и Межведомственный Научный совет по трибологии при РАН, Минпромнауки России и Союзе научно-исследовательских организаций (НИО).

В настоящее время ТЗ на эксперимент полностью согласовано и утверждено. Обсуждаются конкретные варианты реализации этого важного эксперимента.

В частности, Межведомственный научный совет по трибологии (МНСТ) осуществляет привлечение к работам зарубежных лабораторий и центров и проводит согласование с ними стандартов и программ выполнения работ.

Предполагается, что изготовление бортового модуля для испытаний в открытом космическом пространстве, управление его работой и съем целевой информации осуществляют Россия (такого рода работы успешно проведены российскими учеными и специалистами на автоматическом космическом аппарате «Луна-22»).

Проработки по космическим экспериментам «Обстановка» и «Трабант», включенных в утвержденную и реализуемую российскую «Долгосрочную программу научно-прикладных исследований и экспериментов, планируемых на РС МКС» показали, что украинская сторона заинтересована в участии в этих исследованиях.

Результаты анализа совместного научно-технического задела в области космических исследований и потенциальных возможностей сотрудничества российской и украинской сторон в указанных экс-

периментах позволяют рекомендовать их как совместные российско-украинские эксперименты в проект «Долгосрочной программы совместных российско-украинских научных исследований и технологических экспериментов на РС МКС».

В процессе подготовки эксперимента «Планетный мониторинг», также предусмотренного российской программой исследований на РС МКС, достигнута договоренность об использовании спектрометра-поляриметра разработки ГАО НАНУ в качестве фокального прибора телескопа Т-400 российской разработки, расположенного на прецизионной поворотной платформе. В результате этих проработок совместный эксперимент «Планетный мониторинг — Спектрометр-поляриметр» также включен в проект «Долгосрочной программы совместных российско-украинских научных исследований и технологических экспериментов на РС МКС».

К настоящему времени рассмотрены возможные варианты спектрометра-поляриметра с учетом общей компоновки телескопа Т-400, обсуждены проблемы реализации механического, оптического и электрического интерфейсов, согласованы планы работ.

В связи с задержкой подготовки необходимой технической документации, в частности из-за отсутствия согласованных и утвержденных технических заданий, российская сторона в 2002 г. профинансировала работы в обеспечение подготовки и проведения только двух первоочередных космических экспериментов («Обстановка (Этап-1)», «Планетный мониторинг — Спектрометр-поляриметр»). Уже развернуты работы по разработке эскизных проектов соответствующих комплексов бортовой научной аппаратуры.

В настоящее время предпринимаются значительные усилия по привлечению к работам по космическому эксперименту «Обстановка (Этап-1)» международной кооперации, сложившейся в ходе реализации ранее завершенных проектов.

По мнению российской стороны, проблематика космического эксперимента «Трубка» актуальна и имеет значительные перспективы практического использования. Однако варианты ТЗ необходимо существенно доработать с учетом расширения кооперации организаций постановщиков экспериментов. В частности, в их число необходимо включить ИЦ им. М. В. Келдыша (имеет практический опыт проведения космических экспериментов с устройствами такого класса), РКК «Энергия» имени С. П. Королева (является потенциальным потребителем тепловых труб различного назначения и располагает необходимыми высококвалифицированными специалистами), ЦНИИМашиностроения (располагает

хорошой экспериментальной базой и квалифицированными специалистами).

В процессе реализации совместного российско-украинского эксперимента «Трубка» предусматривается разработка летных экспериментальных установок для изучения различных тепловых труб как внутри, так и вне гермоотсека в связи с тем, что ряд неблагоприятных факторов, таких как радиолиз, образование неконденсирующихся газов и коррозия интенсифицируется космическим излучением и не моделируются внутри гермоотсека из-за радиационной защиты экипажа.

Наличие летной экспериментальной установки вне гермоотсека существенно расширяет количество исследуемых теплоносителей тепловых труб, включая вещества, неприемлемые для использования в гермоотсеках, например аммиак.

Формирование и согласование расширенной версии ТЗ на космический эксперимент «Трубка» по имеющимся оценкам близки к завершению.

Впереди выполнение достаточно сложного этапа оценки технической реализуемости космического эксперимента и выбора оптимального варианта проведения экспериментальных исследований на борту РС МКС.

Космический эксперимент «Технология» направлен на изучение возможностей получения в условиях микрогравитации (МГ) методом бесконтейнерной электронно-лучевой зонной плавки в космическом вакууме и методом зонной плавки в кварцевом газонаполненном контейнере без контакта с его внутренними стенками и использованием кольцевого нагревателя.

Предполагается исследовать возможности получения сверхчистых полупроводниковых материалов (Si, Ge, GaSb) указанными методами и совершенных композитных материалов системы WC-Ni в процессах жидкофазного спекания.

Согласование научно-методических вопросов завершено. Ведется поиск приемлемых вариантов реализации этого достаточно сложного эксперимента.

Значительное эволюционное развитие испытала идеология эксперимента «Пента — Кипение», что обусловлено поиском наиболее эффективного и безопасного варианта реализации криогенных исследований на борту РС МКС.

Проектные проработки, выполненные в ЦНИИМАШ и РКК «Энергия» имени С. П. Королева в обеспечение развития концепции создания на РС МКС криогенного унифицированного рабочего места (КУРМ), а также поиски безопасного варианта криогенных экспериментов на РС МКС показали, что наиболее реальным является проведение криогенных исследований с использованием возможно-

Состояние работ по совместной российской-украинской программе экспериментов на МКС

| № п/п | Условное наименование экспериментов | Основные предполагаемые участники работ с российской стороны | Выполняемые этапы работ | Оценка реализуемости КЭ |
|----------|---|--|---|---|
| 1 | «Биосорбент» | РАО «Биопрепарат», ГНЦ ГосНИИ ОЧБ, ГНЦ РФ ИМБП РАН | Разработка и согласование ТЗ | Реализуем на СМ |
| 2 | МОРФОС | ЦНИИМАШ, РКК «Энергия», РГНИИ ЦПК | Разрабатывается и согласовывается ТЗ, решается вопрос о головном разработчике НА | Реализуем на СМ |
| 3 | «Материал-Трение» | ЦНИИМАШ, ИМАШ РАН, ИПМ РАН, НПО им. С. А. Лавочкина, НПО «Композит», ВНИИтрансмаш, МНСТ и др. | Разработано, согласовано и утверждено ТЗ. Осуществляется выбор головных разработчиков бортовой и наземной НА, проводится оптимизация состава научной и производственной кооперации и выбор материалов для исследования | Реализуем на СМ+СО1. Воз-врат на «Шаттле» |
| 4 | «Обстановка (Этап-1)» | ИКИ РАН | Разработано и согласовано ТЗ. Разрабатывается ЭП бортового комплекса НА | Реализуем на СМ |
| 5 | «Планетный мониторинг — Спектрометр-поляриметр» | ИКИ РАН | Решаются проблемы реализации механического, оптического и электрического интерфейсов. Уточнено и согласуется ТЗ на СП. Разрабатывается ЭП бортового комплекса НА. Начато рабочее проектирование основных элементов бортового комплекса НА | Реализуем на СМ |
| 6 | «Трубка» | ЦНИИМАШ, РКК «Энергия», ИЦ им. М. В. Келдыша | Сформирована кооперация, доработаны ТЗ и методика КЭ, предложен вариант доработки НА. Проводится согласование и подготовка к утверждению ТЗ | Реализуем на СМ+СО1. Воз-врат на «Шаттле» |
| 7 | «Технология» | РКК «Энергия», ИХПМ, РГНИИ ЦПК | Доработано и согласовано ТЗ, обсуждаются варианты практической реализации эксперимента | Реализуем на по-следующих моду-лях при выполнении требований по энергообеспечению и вакуумированию НА. |
| 8 | «Криокомплекс-Кипение» | ЦНИИМАШ, МЭИ и др. | Предложена новая концепция группы космических экспериментов (ГКЭ) и этапы ее реализации. Разработано ТЗ на ГКЭ. Проводится согласование и подготовка к утверждению ТЗ | Реализуем на по-следующих моду-лях или с исполь-зованием ТГК типа «Прогресс» при решении проблем достав-ки криогенного блока и хладаген-тов |
| 9 | «Пента-Усталость» | ЦНИИМАШ, РКК «Энергия», ЗАО «Ком-позит — Тест» | Разработано и согласовывается ТЗ. Предложена кооперация организаций исполнителей | Реализуем на СМ+СО1 |
| 10 | «Биолаборатория» | ГНЦ РФ ИМБП РАН, РАО «Биопрепарат» с кооперацией | Согласованы цели, задачи, научно методические подходы. Решаются организационные проблемы | Реализуем на по-следующих моду-лях при решении проблем с разме-щением НА и ее энергообеспече-нием |
| 11 | «Биополимер» | МГУ (биологический фак.), РКК «Энергия» | Разработаны и согласованы ТЗ и методики выполнения эксперимента. Проведена научная и техническая экспертиза. Рекомендован к проведению на СМ МКС | Реализуем на СМ |

стей транспортного грузового корабля типа «Прогресс» как в свободном полете, так и в составе РС МКС. При этом предполагается решение задач отработки многоцелевого бортового криогенного комплекса с жидким гелием и исследование различных физических явлений в жидким гелием в условиях микрогравитации. Условное наименова-

ние такого эксперимента «Криокомплекс — Кипение». В настоящее время по этому эксперименту согласовывается техническое задание и формируется производственная и научная кооперация.

В части совместного российско-украинского эксперимента «Пента — Усталость» имеющиеся к настоящему времени данные позволяют сделать

следующие выводы.

- Результаты выполненных экспериментов подтверждают существенное влияние факторов космического пространства на структурное состояние и характеристики прочности, пластичности металлических и полимерных композитных материалов.
- Характеристики усталостной прочности являются наиболее чувствительными к изменениям структурного состояния, вызванным ФКП.
- Эксперимент «Пента — Усталость» может быть рекомендован для первоочередной реализации на борту РС МКС.

Развернута работа по формированию необходимой кооперации, дорабатывается и согласовывается техническое задание на эксперимент, выполняются работы по оценке технической реализуемости эксперимента и подготовке соответствующего заключения.

Группа космических экспериментов «Биолаборатория» содержит 14 самостоятельных экспериментов по различным направлениям космической биологии клетки с целью изучения клеточных и молекулярных механизмов влияния факторов космического полета на живые системы и гравитационную чувствительность различных типов клеток и клеточных ассоциаций. Значимость и актуальность предлагаемых исследований не вызывает сомнения.

Однако имеется ряд организационных проблем, требующих решения. В их числе некоторые различия по перечню экспериментов в согласованной совместной российско-украинской программе исследований в области космической биологии и ряд пересечений предлагаемых экспериментов с экспериментами «Долгосрочной программы научно-прикладных исследований и экспериментов, планируемых на РС МКС», утвержденной Росавиакосмосом и РАН.

Учеными и специалистами ГНЦ РФ ИМБП РАН разработаны проекты ТЗ космических экспериментов «Остеогенез», «Цитоскелет», «Сигнал», «Нейрон», «Мембрана», «Клетка — Вирус».

Указанные проекты ТЗ отправлены на согласование украинским ученым и специалистам и в дальнейшем могут служить основой для подготовки единого ТЗ.

Космический эксперимент «Остеогенез» направлен на выявление роли силы тяжести в генезисе и формировании соединительной и костной ткани с практическим выходом в области обеспечения нормального функционирования опорно-двигательного аппарата космонавтов в условиях микрогравитации.

Для проведения эксперимента предлагается разработать биокультиватор клеток, бортовой и транс-

портный холодильники или отдельный модуль бортового комплекса «Биолаборатория».

Эксперимент «Цитоскелет» нацелен на выяснение молекулярных механизмов гравичувствительности клетки. Для его реализации планируется разработка специального блока комплекса научной аппаратуры «Биолаборатория».

В совместном эксперименте «Сигнал» будет исследовано участие системы внутриклеточной сигнализации в осуществлении гравичувствительности клетки с использованием растительных и животных клеток, изучаемых средствами бортовых аппаратурных комплексов «Оранжерея» и «Биолаборатория».

В космическом эксперименте «Нейрон» будет изучаться состояние нервной системы высших животных в космическом полете, что актуально для прогнозирования поведенческих характеристик и самочувствия космонавтов в длительных полетах. В качестве объекта исследования предполагается монослойная культура нервных клеток, которые длительный период времени могут культивироваться в специальной культивационной камере, принцип действия которой разрабатывается российскими специалистами и которую предполагается адаптировать к бортовому комплексу «Биолаборатория».

В совместном российско-украинском эксперименте «Мембрана» предлагается изучение биологических мембран одноклеточных организмов, животных и растений, а также искусственных мембран.

Эксперимент «Клетка — Вирус» направлен на изучение особенностей взаимодействия клетки и вируса в условиях микрогравитации. Предполагается использовать в исследованиях культуры эпителиальных клеток, фибробластов, лимфобластоидных клеток, инфицированных аденоизом, растущих в монослое на твердом субстрате.

Совместный проект «Биополимер» посвящен разработке методов получения полимерных материалов стойких к биокоррозии путем структурно-химической модификации полимеров и при использовании биологически активных соединений, а также исследованию процессов биодеградации различных полимерных материалов на борту пилотируемых космических комплексов.

Секция «Технические исследования и эксперименты» КНТС Росавиакосмоса рекомендует включение эксперимента «Биополимер» в состав первоочередных российско-украинских экспериментов, предлагаемых к реализации на служебном модуле РС МКС.

В настоящее время идет разработка методики проведения эксперимента.

Ход работ в обеспечение реализации совместной

программы российско-украинских исследований на РС МКС регулярно рассматривается на специальных рабочих совещаниях представителей ЦНИИМАШ и РКК «Энергия» имени С. П. Королева с выработкой компромиссных вариантов преодоления возникающих проблемных затруднений и постоянно контролируется руководством ЦНИИМАШ и КНТС Росавиакосмоса.

В целом можно отметить, что работы по формированию и согласованию ТЗ на совместные российско-украинские эксперименты на РС МКС близки к завершению. На очереди подготовка и утверждение окончательных заключений о технической реализуемости предлагаемых экспериментов и открытие полномасштабного финансирования работ, проводимых партнерами в обеспечение согласованной программы исследований и экспериментов.

1. Анфимов Н. А., Синельщиков М. В., Суворов В. В., Цимбалиuk М. М. Методология формирования целевой про-

граммы пилотируемого космического комплекса (ПКК) // Сб. тр. Первой украинской конференции по перспективным космическим исследованиям.—2001.—С. 11—15.

2. Лукьянченко В. И., Синельщиков М. В., Суворов В. В. Основные направления разработки российско-украинской программы совместных научных исследований и технологических экспериментов на РС МКС // Сб. тр. Первой украинской конференции по перспективным космическим исследованиям.—2001.—С. 21—25.

**THE MAIN RESULTS OF THE PRELIMINARY
CONSIDERATION OF THE PROJECT OF THE LONG-TERM
PROGRAM FOR JOINT RUSSIAN-UKRAINIAN SCIENTIFIC
RESEARCH AND TECHNOLOGICAL EXPERIMENTS
ABOARD THE RUSSIAN SEGMENT OF THE ISS**

N. A. Anfimov, V. I. Luk'yashchenko, M. V. Sinel'shchikov,
V. V. Suvorov, and M. M. Tsimbalyuk

The main results of some work on the realization of the urgent joint Russian-Ukrainian experiments aboard the Russian Segment of the ISS are presented.

Б. Е. Патон¹, Е. А. Аснис¹, С. П. Заболотин¹,
П. И. Баранский², В. М. Бабич², В. П. Бондаренко³,
Н. А. Юрчук³

¹Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ

²Інститут фізики напівпровідників НАН України, Київ

³Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, Київ

Получение совершенных материалов в космосе

Наводяться матеріали з технологічних експериментів, направлених на отримання досконалих напівпровідникових та композиційних матеріалів в умовах мікрогравітації методом електронно-променевої безтигельної зонної плавки, в тому числі і в надглибокому вакуумі.

По заданию Национального космического агентства Украины для проведения экспериментов на Международной космической станции Институт электросварки им. Е. О. Патона Национальной академии наук Украины совместно с другими академическими организациями и Киевским политехническим институтом проводят работы, направленные на получение в космосе совершенных полупроводниковых и композиционных материалов, а также создания необходимой технологической аппаратуры для этих целей.

С российской стороны в качестве партнера по проведению космического эксперимента выступает Институт химических проблем микроэлектроники / Гиредмет (исследование германия и антимонида галлия).

Полупроводниковые материалы являются основой электронной техники, применяющейся во всех областях науки и техники. Есть ряд причин, по которым полупроводники являются весьма перспективными для получения их в космосе: полупроводниковые материалы используются в высокотехнологичной аппаратуре, и стоимость процесса их производства достаточно высока; для практических целей требуются сравнительно небольшие их количества; свойства полупроводников во многом зависят от технологии их производства, потому что сила тяжести, непреодолимая в земных условиях, сильно деформирует температурные и концентрационные поля и соответственно снижает качество получаемых полупроводников.

По этим причинам в настоящее время проблема исследования и получения полупроводниковых ма-

териалов в космосе стала одной из самых актуальных. В то же время эта задача сложна и многоплановая. Над ее решением работают многие научные организации в мире. Мы рассмотрим лишь некоторые из технологических вариантов, полезных, по нашему мнению, при выращивании монокристаллов в условиях микрогравитации и которые предполагается осуществить на борту МКС.

Для проведения исследований в космосе нами принят и разрабатывается метод бестигельной электронно-лучевой зонной плавки, который является весьма перспективным, так как он позволяет наиболее полно использовать главные отличительные особенности космоса — микрогравитацию и космический вакуум, в т. ч. и сверхглубокий при выведении вакуумпроводка от плавильной установки в аэродинамический след за молекулярным экраном. В этом случае в плавильном пространстве можно получить сверхглубокий вакуум — 0.10—10 нПа.

Кроме указанных отличительных особенностей данного метода, есть ряд других отличий.

- Высокая термическая эффективность (КПД процесса достигает более 80 %) и в связи с этим — малая потребляемая мощность.
- Указанный метод позволяет легко регулировать и удерживать заданную протяженность расплавленной зоны, что существенно при разработке как научных основ, так и практической реализации процесса.
- Обработка материалов может осуществляться в широком диапазоне температур 250—3000 °С и охватывать широкий круг обрабатываемых ма-

териалов и соединений.

- В условиях микрогравитации и связанного с нею отсутствия тепловой конвекции бестигельная зонная плавка позволяет изучить влияние на структуру и электрофизические свойства полупроводников других видов конвекции, в том числе термокапиллярной.
- Данный метод позволяет управлять лучом при его непосредственном воздействии на образец.

На рис. 1 приведена схема метода бестигельной электронно-лучевой зонной плавки. Плавление образца осуществляется путем перемещения вдоль продольной оси высокотемпературной зоны. Она образуется за счет непосредственной бомбардировки материала дисковым пучком электронов, который формируется специальным кольцевым электронно-лучевым нагревателем. Конструкция разрабатываемой экспериментальной полетной установки позволяет при необходимости вести плавку также в ампулах.

Для проведения исследований в космосе предполагается использовать кремний, германий и антимонид галлия (GaSb). Кремний — широко применяемый в настоящее время полупроводник для создания приборов электронной техники. По прогнозам специалистов в течение последующих 25—30 лет он останется основным полупроводниковым материалом для микроэлектроники. Германий и антимонид галлия наряду с кремнием выбраны нами в качестве основных модельных объектов для исследования и являются весьма важными с практической точки зрения полупроводниками.

Поскольку GaSb — бинарный полупроводник, разлагающийся при плавке в вакууме, планируется проведение процесса его плавки в среде аргона (~ 30 кПа) в запаянной кварцевой ампуле без контакта образца со стенками контейнера. Образцы будут

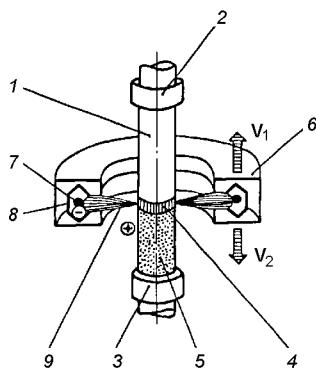


Рис. 1. Схема метода бестигельной электронно-лучевой зонной плавки: 1 — переплавляемый образец, 2 — верхний держатель, 3 — нижний держатель, 4 — расплавленная зона, 5 — переплавленный участок, 6 — электронно-лучевой нагреватель, 7 — катод, 8 — фокусирующее устройство, 9 — электронный пучок

иметь форму цилиндра диаметром 10 мм и полезной длиной 50—100 мм. Свойства полученных монокристаллов будут детально сопоставлены с земными.

Все указанные материалы обладают сильной зависимостью электрофизических свойств от структурного состояния материала, наличия и характера распределения примесей (легирующих и сопутствующих), а также дефектов структуры. Наземные технологии производства Si, Ge и GaSb хорошо отработаны и позволяют получать эти материалы с высоким уровнем электрофизических характеристик. Использование этих материалов для космического эксперимента позволит получить наиболее объективные оценки отличия их характеристик.

Эксперименты по кристаллизации полупроводников в космосе свидетельствуют о высокой чувствительности распределения примесей в твердой фазе к особенностям процессов тепломассопереноса, протекающих в расплаве при его кристаллизации. В условиях орбитального полета где гравитация незначительна, сильно ослабевает влияние гравитационной тепловой конвекции на процессы тепломассопереноса в расплаве и существенно возрастает влияние капиллярных сил вблизи поверхности расплава. Как показали эксперименты (в т. ч. численные), в невесомости при наличии свободной поверхности расплава определяющая роль в механизме тепломассопереноса принадлежит термокапиллярной, а при концентрации примесей в полупроводнике выше 10^{17} см^{-3} — и концентрационно-капиллярной конвекции.

Следует отметить, что совершенство полупроводниковых монокристаллов подразумевает также и их очистку.

Процессы кристаллизации в космосе обусловливают сильную чувствительность кристаллизационного процесса к различным факторам космического полета, основным из которых является преобладание капиллярных видов конвекции в условиях невесомости в областях расплава, граничащих с его свободной поверхностью, что способствует неоднородному распределению примеси (компонентов) в поперечном сечении и объеме выращиваемого кристалла.

На борту космического аппарата есть неконтролируемые, переменные по величине и направлению микроускорения. Эти микроускорения, основными источниками которых являются: действие двигателей ориентации космического аппарата и коррекции орбиты, функционирование аппаратуры жизнеобеспечения, физическая деятельность экипажа и др. влияют на гидродинамическую ситуацию в расплаве и сказываются на особенностях кристаллизационного процесса и свойствах выращиваемых кристаллов. По-видимому, одним из важных направлений воздействия на факторы, которые отрицательно влияют на совершенство структуры полу-

проводников является создание регулируемой термокапиллярной конвекции, что возможно сделать с помощью регулирования поверхностного натяжения расплавленной зоны за счет управления электронным лучом при его непосредственном воздействии на образец.

Высокая чистота кремния по легирующим примесям, доведенная к настоящему времени до 10^{10} ат/см³ не исключает высокого содержания сопутствующих примесей, особенно кислорода на уровне 10^{15} — 10^{17} ат/см³ в кристаллах, выращенных по методу Чохральского или методам зонной плавки.

Проведенные нами исследования содержания кислорода в кремнии показали, что даже при плавке в земных условиях в вакууме — 1 мПа содержание кислорода в переплавленном образце снижается почти на два порядка, что свидетельствует о хорошей перспективе получения кристаллов высокой чистоты в сверхглубоком вакууме, обеспечивающем молекулярным экраном.

При необходимости выполнить глубокую очистку кристалла не только от фоновых, но и легирующих примесей с высокой упругостью пара (например фосфора), сверхглубокий вакуум, обеспечиваемый молекулярным экраном также окажет весьма эффективное воздействие. Наши эксперименты показали, что даже при вакууме 3 мПа обеспечивается практически 12-кратное снижение содержания фосфора по сравнению с исходным переплавляемым кристаллом.

На борту космической станции предполагается осуществить ряд экспериментов по получению совершенных полупроводниковых и композиционных материалов. Следует отметить, что все эксперименты, как было сказано, будут проведены в сравнительном плане с наземными экспериментами по одинаковым технологиям и циклограммам процесса плавки.

При электронно-лучевой зонной плавке кремния и германия в условиях микрогравитации будет значительно изменен процесс тепломассопереноса и гидродинамики по сравнению с наземными условиями, и при этом практически не будет тепловой конвекции, что должно привести к равномерному тепловому полю в зоне кристаллизации и благоприятно сказаться на оптимальной форме фронта кристаллизации, который будет максимально приближен к плоскому. При этом следует ожидать равномерного распределения сопутствующих и легирующих примесей как в радиальном направлении, так и в объеме выращиваемого кристалла.

Протяженность расплавленной зоны один из основных параметров процесса зонной плавки, который оказывает влияние на структуру и электрофизические свойства полупроводника. Весьма важным является также наблюдение за распределением температуры вдоль зоны, так как именно темпера-

турный градиент оказывает влияние на возникновение конвекции Марангони.

При помощи разработанной методики с применением телевизионного пиromетра проводятся наблюдения высоты зоны и распределения температуры вдоль нее.

Один из экспериментов, который предполагается провести на орбите — плавка в теплозащитном экране. Как показали расчеты, температура поверхности образца в случае применения теплозащитного экрана увеличивается на 120—150 °С, а это, в свою очередь, кроме обеспечения большей стабильности процесса роста кристалла и снижения температурного градиента вдоль высоты зоны, положительно влияет на степень снижения временных и остаточных напряжений в кристалле.

На орбите предполагается провести также зонную плавку с вращением образца и перемешиванием расплава в процессе плавки. Конструкция установки позволяет это выполнить. Вращение образца, как показали наземные исследования, не приводит к деформации теплового поля в радиальном направлении и создает хорошие предпосылки для получения фронта кристаллизации, близкого к плоскому, более равномерному распределению температуры по сечению расплавленной зоны и соответственно получения равномерного распределения примесей и удельного электросопротивления по сечению растущего кристалла. В наземных экспериментах мы имеем при вращении устойчивую зону, по форме приближающуюся к цилиндрической. Несколько устойчивой будет расплавленная зона растущего монокристалла кремния при непосредственном воздействии электронного луча при вращении в условиях микрогравитации, должны показать эксперименты. Учитывая достаточно высокий уровень поверхностного натяжения, следует ожидать, что расплавленная зона будет устойчивой, и не будет приобретать форму скакалки (неустойчивость).

В связи с тем, что при отсутствии тепловой конвекции в условиях микрогравитации очистка образцов практически происходит не будет, предполагается исследовать особенности кристаллизации монокристаллов кремния с помощью очистки расплавленной зоны за счет принудительного вывода из нее заряженных ионов внешним тянувшим электрическим полем (при прохождении через образец постоянного тока), приложенным в направлении оси роста кристалла в процессе электронно-лучевой плавки. Этот механизм, как показали наземные эксперименты, должен работать даже в условиях, когда коэффициент сегрегации примесей приближается (как у бора) к единице.

Пропускание электрического тока наряду с влиянием эффекта Пельтье на границе твердой и жидкой фаз позволит провести очистку кристалла кремния в условиях микрогравитации от примес-

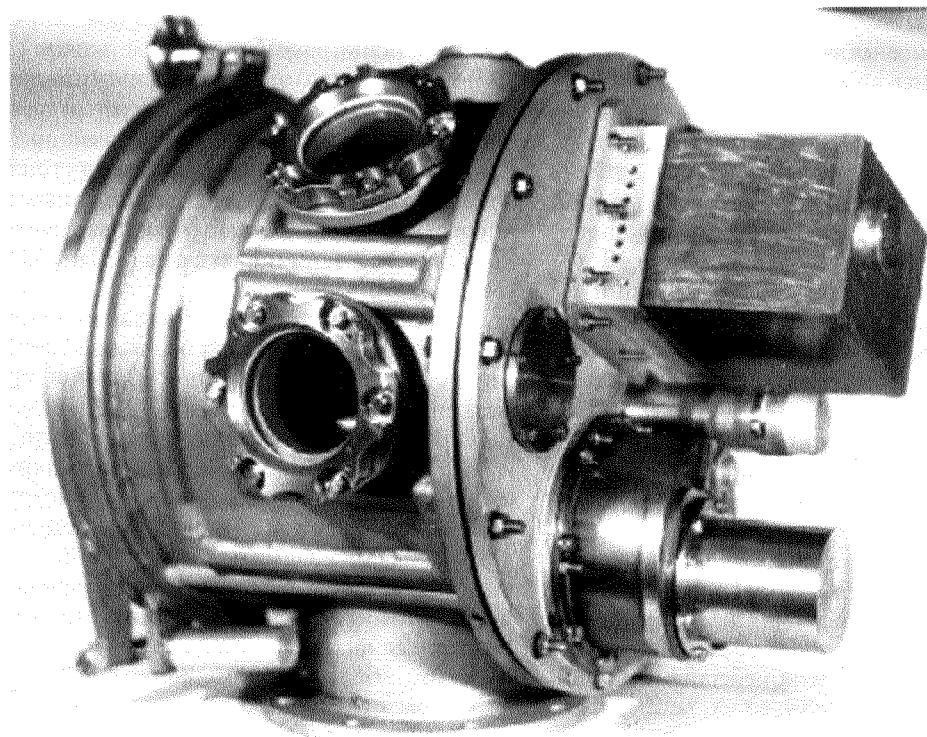


Рис. 2. Общий вид ростовой камеры экспериментальной полетной установки

ных атомов донорного и акцепторного типа, причем процессу электропереноса в условиях микрогравитации не будет препятствовать гравитационная конвекция, вследствие чего процесс должен быть более эффективным. В настоящее время в ИЭС им. Е. О. Патона отрабатываются наземные эксперименты этой технологии.

Для проведения исследований в условиях микрогравитации композиционных материалов выбран композиционный материал типа WC-Ni, хорошо сочетающий пластичность металлической связки с износостойкостью и коррозионной стойкостью тугоплавкой составляющей.

Получать качественные композиты системы WC-Ni существующими методами в земных условиях не представляется возможным из-за влияния гравитационной ликвации. Для получения беспористого состояния материалов при жидкофазном спекании необходимо повышать температуру нагрева до расплавления связки. При этом из-за значительного отличия по плотности карбида вольфрама ($15.5 \text{ г}/\text{см}^3$) и никелевой связки ($8.9 \text{ г}/\text{см}^3$) происходит расслоение предварительно подготовленного материала, что в свою очередь приводит к неравномерности распределения составляющих композита

по высоте образца и, соответственно, значения твердости — параметра, определяющего работоспособность материала.

При зонном нагревании изделий в процессе жидкофазного спекания возможно получение материала со значительно меньшей ликвацией по сравнению с другими технологическими методами нагрева даже в земных условиях, а в условиях микрогравитации седimentации вообще не должно происходить.

В настоящее время в ИЭС им. Е. О. Патона изготавливается полетный вариант экспериментальной установки, а также проводятся наземные эксперименты для решения указанных выше проблем.

На рис. 2 показан общий вид ростовой камеры экспериментальной полетной установки.

THE PRODUCTION OF PERFECT MATERIALS IN SPACE

B. E. Paton, E. A. Asnis, S. P. Zabolotin, P. I. Baranskii, V. M. Babich, V. P. Bondarenko, and N. A. Yurchuk

We present the information on technological experiments aimed at the production of perfect semiconductor and composite materials under microgravity by the method of electron beam crucibleless zone melting, including in ultrahigh vacuum.

УДК 548.5

А. П. Шпак, О. П. Федоров,
Е. И. Берсуский, Е. Л. Живолуб

Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова, Київ

Некоторые
процессов
в
условиях
(создание
установки
МОРФОС)

проблемы
направленного
микрогравитации
исследования
затвердевания

Розроблено макет установки МОРФОС, призначений для наземного відпрацювання експериментів в галузі вивчення структури затвердіння при спрямованій кристалізації прозорих об'єктів. Проведена робота є етапом підготовки комплексного космічного експерименту, який дозволить виявити принципові особливості формування структури при спрямованій кристалізації в космічних умовах. Особливістю розробленого підходу є можливість досліджень монокристалів, вирощуваних в різних кристалографічних напрямках. Вважається, що зіставлення політичних і наземних даних, а також їхнє зіставлення з експериментом в квазідовимірному препараті дозволить визначити основні фізичні механізми впливу гравітаційної конвекції на структуроутворення кристалічних матеріалів, а також виробити рекомендації щодо методів впливу на цей процес в космічних умовах.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования кристаллизации в условиях невесомости принадлежат к числу приоритетов при постановке экспериментов на Международной космической станции (NASA Strategic Plan 2000; Proceedings of the Joint X European and VI Russian Symposium on Physical Sciences in Microgravity, St. Petersburg, 15—21, June 1997). Это дает основание прогнозировать определенный толчок в развитии физики процессов затвердевания в ближайшие годы. Международная космическая станция дает возможность многократно проводить эксперименты в различных модификациях, модернизировать экспериментальное полетное оборудование, корректировать подходы к осуществлению экспериментов в течение длительного времени функционирования МКС. Это позволит перейти от демонстрационных экспериментов, характерных для предыдущего этапа орбитальных исследований, к последовательному изучению физики процесса, а затем и технологии получения материалов методами затвердевания.

Особенностью готовящихся исследований на

МКС в области физики кристаллизации следует считать привлечение различных методик и объектов исследования для изучения различных сторон процесса кристаллизации. К ним относятся: исследования свободного роста кристаллов, направленная кристаллизация металлических, полупроводниковых и прозрачных модельных материалов, изучение особых структурных состояний при кристаллизации высоко переохлажденных расплавов. Следует ожидать, что будут получены ответы на актуальные вопросы об особенностях формообразования, захвата примесей и включений, потери устойчивости фазовой границы в специфических условиях тепломассопереноса в условиях микрогравитации. Особый интерес вызывают эксперименты, которые предполагают совместное исследование фазовой границы и гидродинамических потоков в объеме расплава и вблизи фазовой границы. Отметим, что акцент на фундаментальных основаниях затвердевания совершенно оправдан и с точки зрения практических применений. Опыт предыдущих лет показал, что попытки осуществить производство уникальных материалов без фундаментальных исследований

физических основ процессов терпят неудачу.

Среди отмеченных направлений исследований заметное место принадлежит экспериментам с прозрачными веществами, которые часто используются для изучения свободного роста кристаллов и выращивания в поле температурного градиента. Высокая информативность, возможность прямого наблюдения динамики процесса, низкое энергопотребление и массогабариты, сравнительная легкость поддержания заданных температурных условий делают такие эксперименты весьма перспективными для фундаментальных исследований на орбите.

В настоящей работе рассмотрены некоторые актуальные задачи физики затвердевания в невесомости, приведены результаты разработки методики исследования направленной кристаллизации прозрачных веществ в условиях орбитального полета, а также кратко изложены результаты наземных исследований. В работу вовлечены институты Национальной академии наук Украины: Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова (постановщик экспериментов), Институт электросварки им. Е. О. Патона (разработчик основной части экспериментального оборудования); Государственное научно-исследовательское предприятие «Украинский технологический центр оптического приборостроения» (разработчик оптических систем); предполагается участие московского института ЦНИИМАШ (с кооперацией российских исполнителей) в постановке экспериментов и создании части исследовательской аппаратуры.

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Направленное затвердевание прозрачных расплавов дает уникальную возможность проследить динамику структурообразования материалов в процессе их получения в космосе. Это позволяет доступными экспериментальными методами ответить на принципиальные вопросы космического материаловедения, а также существенно повысить уровень понимания роли гравитационной конвекции в структурообразовании. При этом решаются две группы проблем. Первая связана с получением прямых экспериментальных данных об изменении характерных параметров фронта кристаллизации в космосе по сравнению с земными условиями (критические скорости потери устойчивости плоского фронта V , межъячеистые и междендритные расстояния λ , особенности захвата примесей и включений). Вторая, более общая, группа проблем связана с физической картиной влияния потока расплава на морфологию фронта кристаллизации; в этом контексте возникает и обратная задача влияния морфологии фронта на поток, т. н. проблема связанной

конвективно-морфологической неустойчивости. С точки зрения физического подхода космический эксперимент — это частный случай кристаллизации в специфических условиях тепломассопереноса в невесомости.

В эксперименте МОРФОС применяется метод Бриджмена для исследования фронта кристаллизации прозрачных органических объектов. Ампула с исследуемым веществом перемещается в поле температурного градиента; при этом в расплаве отсутствуют (или очень малы) свободные поверхности, которые обуславливают конвекцию Марангони. Следует ожидать поэтому, что температурные и концентрационные условия на фронте будут полностью определяться диффузионными процессами в космосе и сильно зависеть от гравитационной конвекции в земных условиях. Сопоставление наземных и полетных данных будет для данного случая весьма продуктивным.

Рассмотрим кратко основные факторы, а также измеряемые морфологические параметры, чувствительные к уровню конвективного перемешивания, которые будут исследоваться в ходе космического эксперимента.

Критическая скорость потери устойчивости плоского фронта. Конвективное перемешивание существенным образом влияет на условия возникновения возмущений на плоском фронте и формирование ячеек. Согласно [4, 12] конвекция расширяет область устойчивого роста, вместе с тем этот же фактор приводит к формированию макронеоднородностей в распределении примесей вследствие специфической конфигурации потоков расплава перед фронтом. Изучение эффекта потери устойчивости при отсутствующем перемешивании расплава на земле затруднительно; так, при использовании квазидвумерного препарата возникает нежелательное воздействие стенок образца; в объемных образцах в поле температурного градиента, антипараллельного вектору силы тяжести, возникают потоки, вызванные радиальным температурным градиентом.

Дендритный (ячеистый) параметр. Дендритный (ячеистый) параметр λ определяет распределение примесей за фронтом кристаллизации и, тем самым, микросегрегационную и (в определенной степени) дефектную структуру кристаллического материала. Зависимость этого параметра от условий выращивания (включая параметры потока расплава) — объект многочисленных исследований на Земле и в космосе [2, 7, 10, 14].

Для дендритной стадии роста справедлива эмпирическая зависимость, которая получила и теоретическое обоснование:

$$\lambda = aG^{-1/2}V^{-1/4},$$

где G — температурный градиент, V — скорость выращивания кристалла.

Для ячеистого роста функции $\lambda = \lambda(G, V)$ могут иметь различный вид, в зависимости от того, какого типа бифуркация имеет место вследствие потери устойчивости плоского фронта. Для субкритической бифуркации некоторые теории предсказывают параболическую или эллиптическую форму ячеек. Для суперкритической бифуркации (уплощенные ячейки [8]) форма фронта не задается априори, а последовательно вычисляется. Исследования в космосе позволяют получить зависимости величины $\lambda(V)$ в условиях, контролируемых диффузией и дают возможность корректно сопоставить теорию с экспериментом. Так, в работах [9, 11, 13] приведены зависимости $\lambda(V)$, полученные в полетных условиях на шаттлах с использованием прозрачных сплавов; эти данные показывают удовлетворительное согласие с теорией, развитой в [8].

Кристаллографическая ориентация выращивания. До сих пор в полетных экспериментах изучались поликристаллические прозрачные материалы, что не позволяет корректно выявлять влияние ориентации выращивания на морфологию фронта; кроме того, границы зерен, являются мощным возмущающим фактором и вносят существенные искажения в картину возникновения и развития неустойчивости плоского фронта.

Некоторые постановщики экспериментов считают, что кристаллографическая анизотропия не влияет на морфологию фазовой границы [9] металлов и металlopодобных органик с ГЦК та ОЦК структурой решетки. Однако ростовые структуры, полученные при изучении металлических монокристаллов [7], а также морфология фронта прозрачных органик в квазидвумерных образцах указывают на количественные и качественные изменения в морфологии фронта в зависимости от ориентации выращивания. В частности, для ориентаций $<100>$ и $<110>$ обнаруживаются равносные и удлиненные ячейки соответственно, а в случае эксперимента в плоских препаратах установлена эмпирическая зависимость параметра λ от угла φ отклонения ориентации выращивания от $<100>$ [15]:

$$\lambda = \lambda_0 / \cos\varphi,$$

Отметим, что разворот ячеек в направлении ориентации преимущественного роста $<100>$ происходит в течение определенного времени, зависящего от скорости выращивания. По существу происходит постепенное приближение к равновесной структуре затвердевания. Скорость этого процесса определяется диффузионными процессами в приграничной области и существенно зависит от конвективного массопереноса.

Связанные конвективно-морфологические неустойчивости. Расплав, который движется перед

фронтом кристаллизации, оказывает влияние на условия потери устойчивости плоского фронта и параметры ячеек и дендритов. В свою очередь, форма искаженного фронта воздействует на поток в расплаве. Изучение этого явления началось сравнительно недавно [3] и требует последовательного экспериментального изучения в различных условиях перемешивания расплава.

Отметим, что в простейшем случае возникновения плоского потока расплава перед фронтом в объемном образце имеет место асимметрия структуры фронта, связанная с концентрационным градиентом вдоль поверхности фронта [13]:

$$dy/dx = 1/C_x D/V(1 - k)dC_x/dx,$$

где C_x — концентрация примеси вдоль фронта, D — коэффициент диффузии, k — коэффициент распределения. Таким образом, вследствие гравитационной конвекции ячеистая (или дендритная структура) становится функцией координаты фронта.

Рассмотрены и более сложные следствия влияния потока на процесс потери устойчивости, формирования неустойчивой (ячеистой и дендритной морфологии) фазовой границы. В частности, показано, что поток вызывает новые моды возмущения плоского фронта [3], может провоцировать макронародности (впадины) на фазовой границе.

Акустические воздействия на процесс затвердевания. Проблема управления структурой затвердевания в земных и полетных условиях — одна из наиболее актуальных. Для космических условий необходимость специальных воздействий обусловлена необходимостью компенсации остаточных микроДискорений и т. н. j - jitter. Вибрационные и ультразвуковые воздействия применялись в случае различных технологий получения материалов методами кристаллизации [1]. Отметим, что в случае выращивания кристаллов методом Чохральского успешно развиваются способы вибрационного воздействия на расплав. В случае космического эксперимента необходимость исследования такого рода можно рассматривать с двух сторон: как способ учета нежелательных вибраций на борту орбитальной лаборатории и как перспективный метод активного воздействия на структуру затвердевания.

Постановка экспериментов на борту орбитальной станции предполагает решение некоторых аспектов перечисленных проблем путем последовательного сопоставления данных на Земле и в космосе. Установка МОРФОС предназначена для прямого наблюдения за фронтом кристаллизации в объемном цилиндрическом образце. Предполагаются также параллельные исследования кристаллизации в квазидвумерных (плоских) препаратах, где конвекция практически отсутствует, но имеются ограничения

обусловленные поверхностными эффектами; такие эксперименты необходимы для определения круга задач, которые могут быть решены на земле в лабораторных условиях.

ПРИНЦИП РАБОТЫ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ МОРФОС

Установка предназначена для выращивания кристаллов прозрачных модельных веществ путем направленной кристаллизации при непосредственной видеорегистрации в течение процесса выращивания морфологии границы раздела твердой и жидкой фаз в условиях микрогравитации.

В состав установки МОРФОС входят рабочий блок и система управления и энергопитания;

Основные технические характеристики установки приведены в таблице.

Основная часть установки — рабочий блок (рис. 1 и 2) — предназначен для реализации процесса выращивания монокристаллов и содержит:

- градиентное устройство;
- образец с прозрачным веществом;
- механизм перемещения;
- блок оптической системы.

Рабочий блок помещен в защитную камеру, закрепленную на основании, которое размещается на виброизолированной платформе. Конструкция защитной камеры установки должна обеспечить заданный температурный режим работы в стандартных лабораторных условиях и минимизацию воздушных потоков внутри камеры, в том числе и конвективных (в наземных условиях).

Градиентное устройство предназначено для создания линейного температурного градиента вдоль оси цилиндрического образца; состоит из электрического резистивного нагревателя и полупроводникового холодильника цилиндрической формы, закрепленных на одной оси с образцом. Предусматривается возможность изменять расстояние между ними. Диапазон регулируемых температур нагревателя — 40...100 °C, температур холодильника — 0...20 °C. Точность поддержания заданных темпе-

Основные технические характеристики установки МОРФОС

| | |
|---|------------------------|
| Энергопотребление установки | $U \Gamma \leq 100$ Вт |
| Предварительные габаритные размеры: | |
| СУЭП | 250×300×400 мм |
| рабочего блока | 350×400×600 мм |
| Масса установки | ≤ 30 кг |
| Длительность одного процесса кристаллизации | ≤ 15 ч |

тур холодильника и нагревателя — не менее 0.05 K, при этом обеспечивается максимальное значение градиента температуры по длине образца в зоне фронта кристаллизации до 50 K/cm.

Образец представляет собой цилиндрическую трубку длиной до 200 мм, выполненную из стекла и заполненную прозрачным веществом. Конструкция кюветы обеспечивает проведение всех работ с образцом (подготовку затравочного кристалла, выращивание кристалла, комплексное наблюдение фронта кристаллизации и процессов вблизи фронта).

Механизм перемещения служит для передачи движения от привода на каретку с закрепленным на ней градиентным устройством. Скорость перемещения (скорость выращивания кристалла) выбирается в зависимости от запланированной программы эксперимента. В рабочем режиме диапазон скоростей 0.1—30 мкм/с, в транспортном режиме скорость перемещения не менее 1 мм/с. Точность поддержания скорости не менее 5 %.

Блок оптической системы предназначен для получения видеосигнала изображения фронта кристаллизации и областей кристалла, прилегающих к нему, непосредственно в процессе роста. Блок включает в себя телевизионную передающую камеру, блок фокусировки изображений, блок осветителей и обеспечивает наблюдение фронта кристаллизации сквозь зону расплавленного вещества в од-

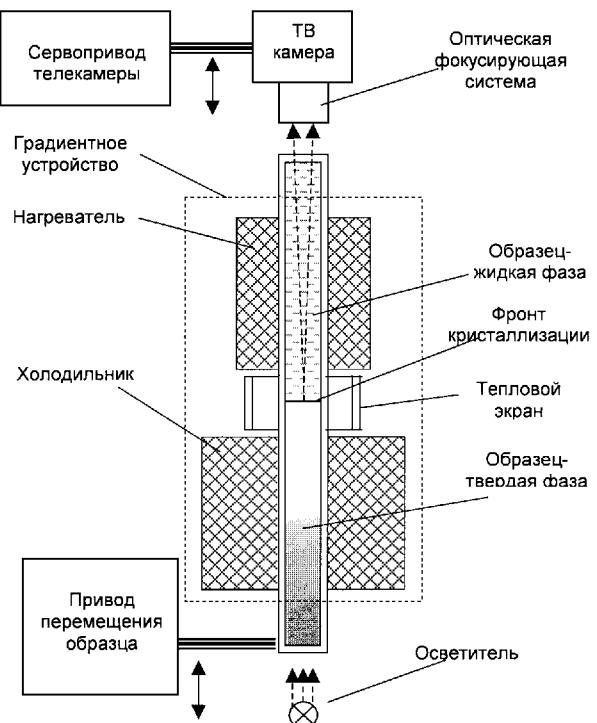


Рис. 1. Схема рабочего блока

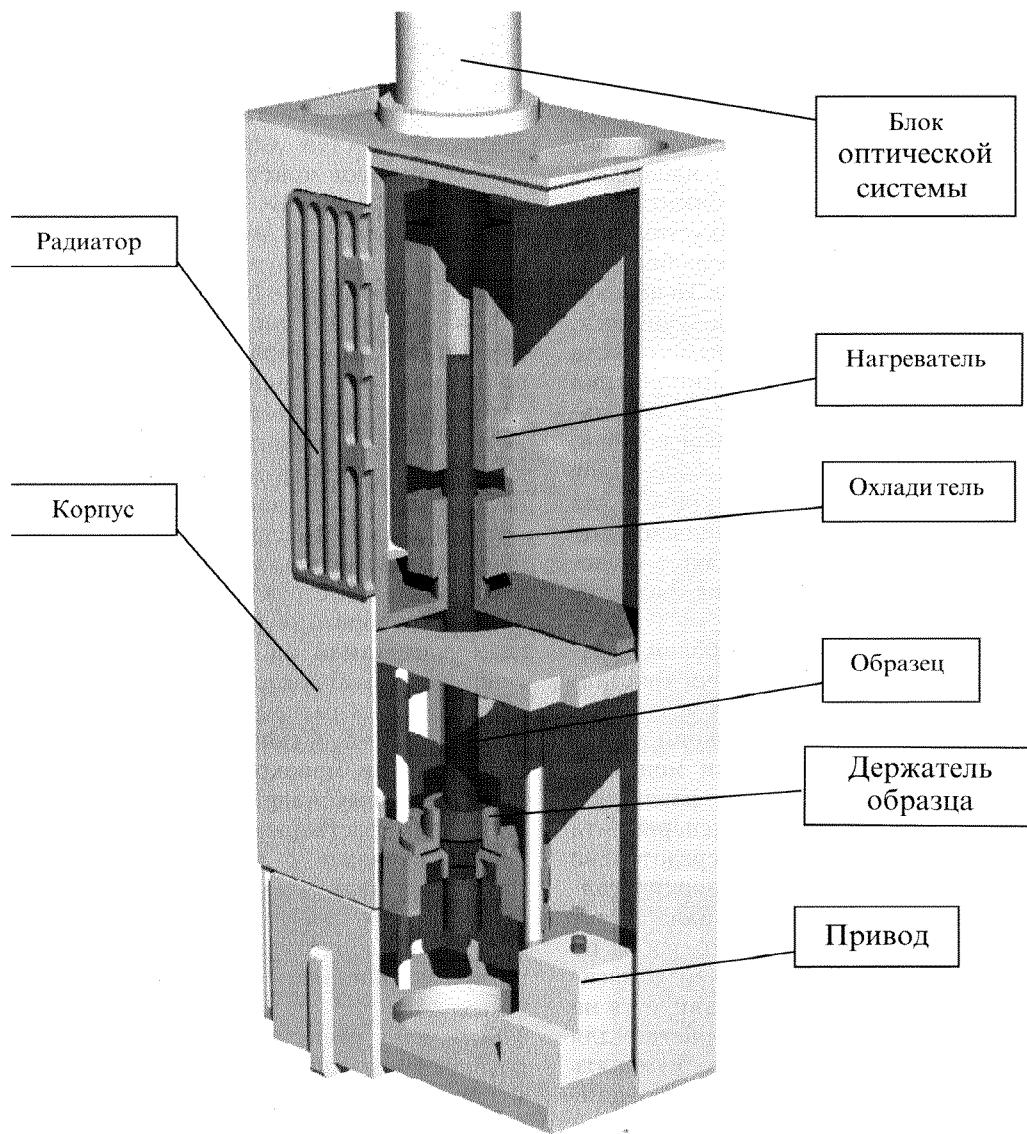


Рис. 2. Конструкция рабочего блока

ном из двух вариантов: либо вдоль оси образца сквозь горячий торец кюветы (при условии, что он плоский), либо под углом 30—60° к оси сквозь боковую стенку кюветы.

Процедура проведения эксперимента. В блоке кристаллизации (рабочем блоке) размещен держатель с образцом (ампула с исследуемым веществом), по его оси перемещается градиентное устройство (холодильник и нагреватель, выполненные в виде полых цилиндров, охватывающих образец); на этой же оси расположены с одной стороны осветитель, а с другой стороны — телекамера с оптической системой (объективом). В процессе работы образец остается неподвижным, а градиентное устройство, перемеща-

ясь с заданной скоростью, обеспечивает направленную кристаллизацию вещества, в ходе которой непрерывно работает система видеорегистрации. Телекамера с объективом отслеживает перемещение вдоль оси образца фронта кристаллизации, поддерживая фокусировку изображения.

Один из сценариев проведения эксперимента — это цикл, который, в свою очередь, состоит из нескольких повторных подциклов для данного образца с разными скоростями выращивания кристаллов. Эксперимент проходит в автоматическом режиме, вмешательство оператора предусматривается на стадиях предполетной подготовки, по завершении полета, а также при смене образца.

Предполагается несколько этапов создания и последующей модернизации установки МОРФОС. На этапе до 2004 г. предполагается создание полетной установки МОРФОС-1, основные характеристики которой приведены выше. В дальнейшем запланирована модернизация, которая позволит наблюдать и фиксировать потоки расплава вблизи фронта кристаллизации, а также изучать влияние акустических воздействий на процессы структурообразования.

Методика приготовления образцов. Используются прозрачные вещества, характеризующиеся, подобно металлам, нормальным механизмом роста и округлыми формами кристаллов (сукционитрил и его сплавы с ацетоном). Предполагается использовать и другие прозрачные вещества (бензофенон, тимол), имеющие гранные формы роста кристаллов (послойный механизм роста, характерный для большинства полупроводниковых материалов). Отметим, что до настоящего времени наиболее исследованной системой из указанных выше является сукционитрил—ацетон.

Для решения обозначенных выше проблем чрезвычайно важным является получение монокристаллических образцов. В частности, задача исследования роли кристаллографической ориентации может быть решена только при использовании монокристаллических затравочных кристаллов различной ориентации. Поэтому при подготовке эксперимента МОРФОС большое внимание было сосредоточено на разработке методики получения монокристаллов. Ориентация прозрачного монокристалла может быть определена на стадии дендритного роста по симметрии расположения боковых ветвей относительно дендритного ствола. Методика базируется на использовании профицированного устройства для прорашивания кристалла, позволяющего изменять направление роста исходного кристалла на заданный угол.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАЗЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Цель первого этапа лабораторных исследований состояла в получении последовательности морфологических данных для монокристаллов сукционитрила при различных скоростях выращивания. Особое внимание уделялось принципиально важному для космических условий этапу потери устойчивости плоского фронта и переходу к ячеистой структуре. Использовались монокристаллические затравки ориентаций $<100>$, $<110>$ и $<111>$. Планируется получить монокристаллы, отклоненные от указанных ориентаций на 10° — 15° . Применялись скорости выращивания монокристаллов 0.5, 0.6, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5 мкм/с. Параллельно

изучались монокристаллы ориентаций $<100>$ и $<110>$ в плоских (квазидвумерных) препаратах. На рис. 3—5 показана типичная последовательность формы фронта кристаллизации в интервале указанных скоростей для объемных цилиндрических монокристаллов кристаллографической ориентации $<100>$, $<110>$ и $<111>$. На рис. 6 показана типичная последовательность формы фазовой границы для монокристалла того же вещества кристаллографической ориентации $<100>$ в плоском препарате.

Как видно из рис. 3, для ориентации $<100>$ характерна структура равносенных ячеек, близких по форме к гексагональным. Зависимости межъядерного расстояния λ от скорости роста анализируются двумя методами: нахождения среднего расстояния между центрами ячеек, а также методом построения графа наименьших расстояний (MST-методика [5]). Последняя позволяет оценить степень отклонения структуры ячеек от идеальной гексагональной структуры.

Во всех образцах различных кристаллографических ориентаций на начальной стадии потери устойчивости наблюдается образование нод (узлов) — хаотически расположенных по фронту углублений, рис. 3—5. Судя по картине оплавления (при протягивании монокристалла в направлении, противоположном направлению выращивания), ноды обогащены растворимыми примесями; это качественно совпадает с картиной, наблюдавшейся на монокристаллах алюминия и цинка [6], а также данными для некоторых металлов других авторов [7]. Эта же структурная особенность ранней стадии потери устойчивости наблюдается в плоских препаратах.

Отмечено существенное влияние конвективных потоков на распределение нод по поверхности фазовой границы. Структура нод, а также последующая ячеистая структура характеризуется определенной асимметрией (элементы неустойчивой структуры образуются на одном из краев образца и медленно покрывают всю поверхность фазовой границы в процессе выращивания). Качественные наблюдения за потоками перед фронтом (при помощи инородных частиц, движущихся в расплаве) указывают на то, что указанная асимметрия вызвана конвективными потоками в расплаве. Эти потоки, по всей видимости, обусловлены радиальным температурным градиентом, который может провоцировать конвекцию даже в случае антипараллельности векторов силы тяжести и температурного градиента.

Потеря устойчивости плоского фронта детально наблюдалась для ориентаций $<100>$, $<110>$ и $<111>$. В большинстве случаев развитие периодического возмущения начинается с ноды и представляет собой гребень волны (пучность), соединяющий соседние ноды. Со временем совокупность гребней

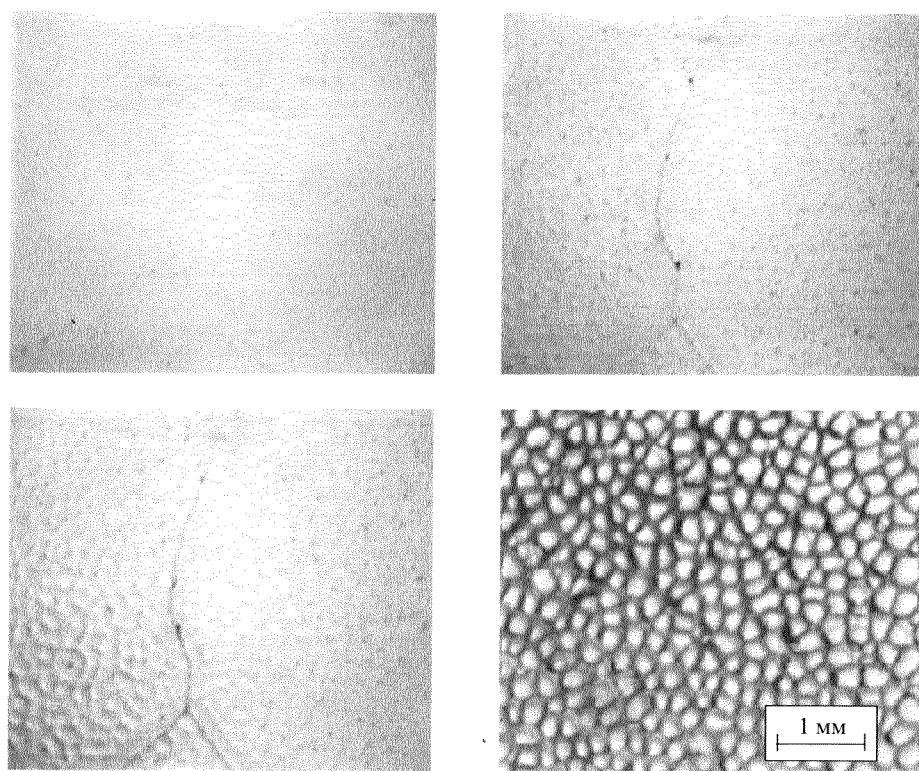


Рис. 3. Последовательные стадии потери устойчивости фронтом кристаллизации (сукционитрил, $<100>$; $R = 1.1 \text{ мкм/с}$, объемный препарат). Интервал между кадрами 1, 2, 3 — 30 мин, между 3, 4 — 60 мин

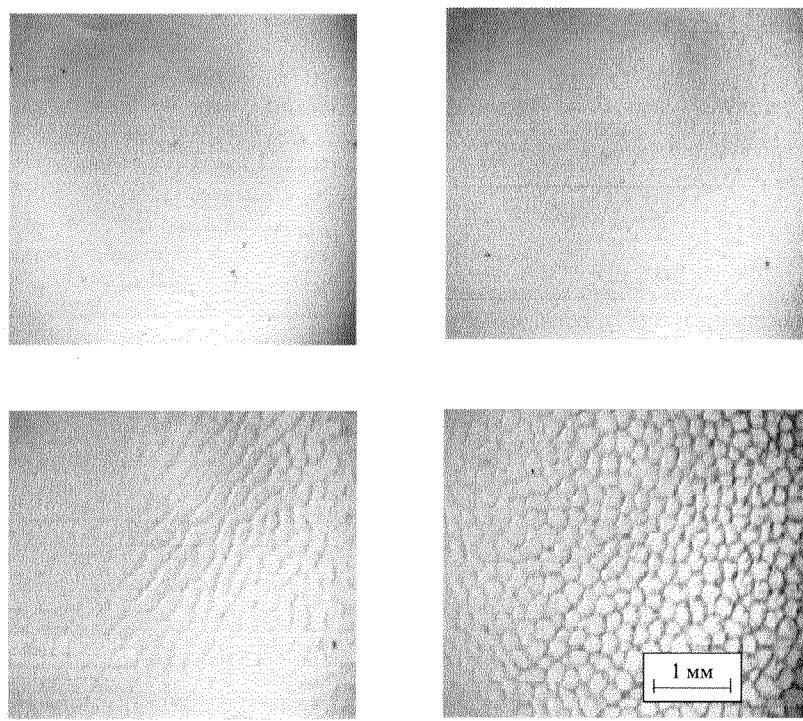


Рис. 4. То же, для направления $<110>$

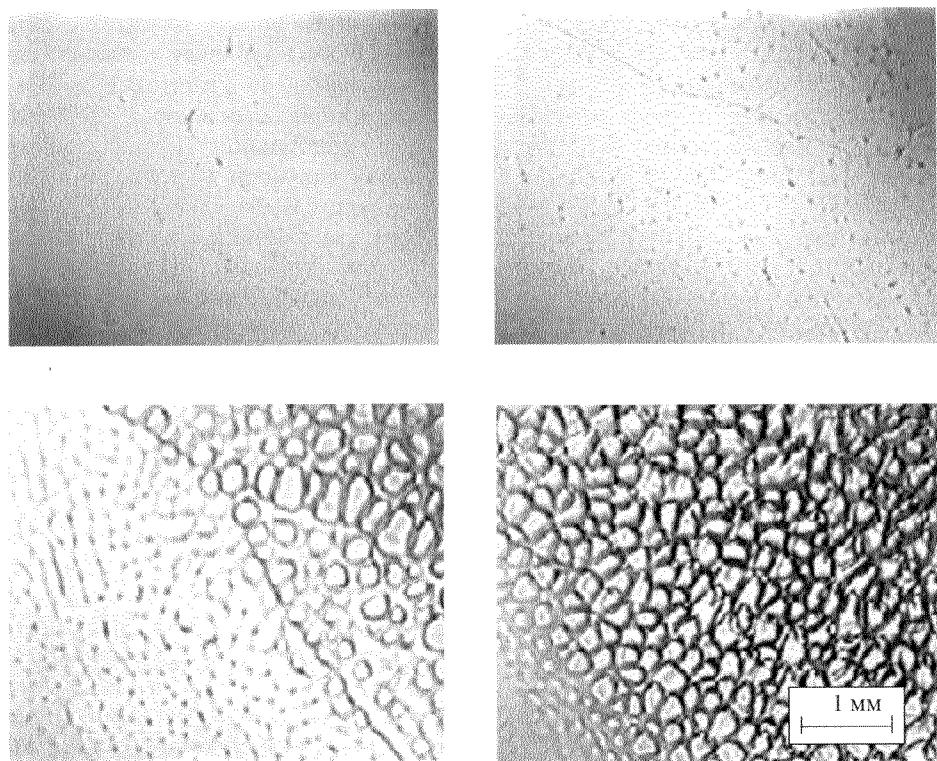


Рис. 5. То же, для направления $<111>$

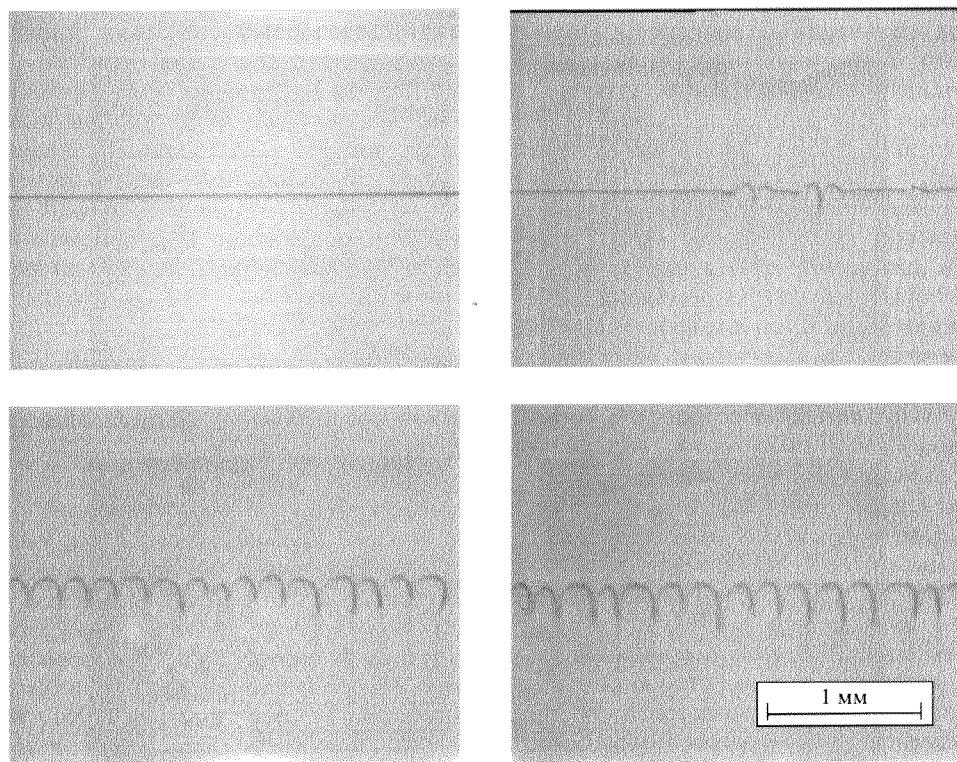


Рис. 6. Последовательные стадии потери устойчивости фронтом кристаллизации (сукционитрил, $<100>$; $R = 0.68$ мкм/с, квазидвумерный препарат). Интервал между кадрами 1, 2 — 60 мин, 2, 3 — 80 мин, 3, 4 — 140 мин

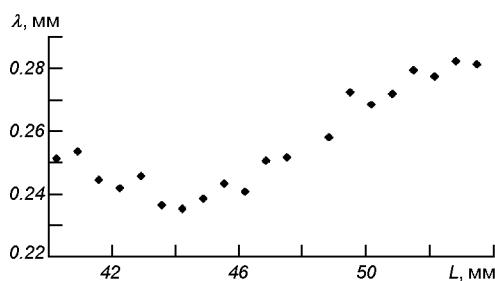


Рис. 7. Зависимость межячеистого параметра λ от положения фронта кристаллизации (сукцинонитрил, $<100>$; $R = 1.1$ мкм/с, объемный препарат). Начальное положение $L = 0$

формируется в структуру равноосных ячеек, относительно равномерно распределенных по поверхности фронта. Отмечались и отдельные случаи образования гребней волн на участках фазовой границы, свободной от нод. В обоих случаях результирующая структура оказывалась идентичной. Аналогичная картина образования периодического возмущения наблюдалась и в плоском препарате (рис. 6).

В случае выращивания монокристалла, не содержащего субграниц, в направлении $<100>$ равноосные ячейки распределены по поверхности хаотически, а признаков удлиненных ячеек не наблюдалось при всех применяющихся условиях выращивания.

Удлиненные ячейки характерны для ориентаций, близких к $<110>$. Причем в данном случае они образуются и в совершенном монокристалле, не содержащем субграниц.

Типичная временная зависимость межячеистого параметра λ для одной из скоростей выращивания в направлении $<100>$ представлена на рис. 7. Как видно, в процессе выращивания стационарные условия формирования ячеистой структуры не достигаются. Предварительные оценки указывают на влияние гравитационной конвекции на достижение стационарной структуры ячеистого фронта.

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

Создан макет полетной установки для исследования направленной кристаллизации прозрачных модельных веществ. Результаты наземных исследований показали, что установка позволяет решать широкий круг задач, связанных со структурообразованием в условиях микрогравитации. Прецизионные исследования морфологии фронта кристаллизации позволили выявить ряд новых эффектов, связанных с начальным этапом потери устойчивости, влиянием кристаллографической ориентации, а также с изучением условий стационарности при наличии и отсутствии гравитационной конвекции.

1. Абрамов О. В. Кристаллизация металлов в ультразвуковом поле. — М.: Металлургия, 1972.—256 с.
2. Billia B., Trivedi R. // Handbook of Crystal Growth 1, P. B.
3. Buhler L., Davis S. H. // J. Cryst. Growth.—1998.—186.—P. 629—647.
4. Coriell S. R., Hurle D. T. J., Sekerka R. F. // J. Cryst. Growth.—1964.—167.—P. 1.
5. Dussert C., Rasigni G., Rasigni M., Palmari J. Minimal spanning tree: A new approach for studying order and disorder // Phys. Rev. B.—1986.—34, N 5.—P. 3528—3531.
6. Fedorov O. P., Zhivolub E. L. Structure of metal single crystals grown in various crystallographic directions from melt // Crystallography Reports.—1998.—43, N 5.—P. 877—883.
7. Flemings M. Solidification Processing. — N. Y., 1974.
8. Hunt J. D., Lu S. // Metall. Mater. Trans.—1996.—27A.—P. 611.
9. Kauerauf B., Zimmerman G., Murmann L., Rex S. Planar to cellular transition in the system succinonitrile-acetone during directional solidification of a bulk sample // J. Cryst. Growth.—1998.—193.—P. 701—711.
10. Kauerauf B., Zimmerman G., Rex S., et al. Directional cellular growth of succinonitrile-0.075 wt % acetone bulk samples. Part 2: Analysis of cellular pattern // J. Cryst. Growth.—2001.—223.—P. 277—284.
11. Kauerauf B., Zimmerman G., Rex S., et al. Directional cellular growth of succinonitrile-0.075wt % acetone bulk samples. Part 2: Results of space experiments // J. Cryst. Growth.—2001.—223.—P. 265—276.
12. Mullins W. W., Sekerka R. F. // J. Appl. Phys.—1964.—33.—P. 444.
13. Noel N., Jamgotchian H., Billia B. In situ and real-time observation of the formation and dynamics of a cellular interface in a succinonitrile-0.5 wt % acetone alloy directionally solidified in a cylinder // J. Cryst. Growth.—1997.—181.—P. 117—132.
14. Noel N., Jamgotchian H., Billia B. Influence of grain boundaries and natural convection on microstructure formation in cellular directional solidification of dilute succinonitrile alloys in a cylinder // J. Cryst. Growth.—1998.—187.—P. 516—526.
15. Young G. W., Davis S. H., Bratkus K. // J. Cryst. Growth.—1987.—83.—P. 560.

SOME PROBLEMS IN THE INVESTIGATION OF THE PROCESSES OF DIRECTIONAL CRYSTALLIZATION UNDER MICROGRAVITY (CREATING THE MORPHOS INSTALLATION)

A. P. Shpak, O. P. Fedorov, E. I. Bersuds'kyi, E. L. Zhyvolub

The MORPHOS installation for the ground-based study of solidification structure during directional crystallization of transparent substances is designed. The work performed is a stage of preparation of the integrated space experiment which will allow one to detect fundamental peculiarities of structure formation during directional crystallization under space conditions. The special feature of our approach is the possibility to investigate single crystals grown in various crystallographic directions. The comparison of flight and ground-based data as well as their comparison with the experiment in quasi-two-dimensional preparation will allow one to determine the basic physical mechanisms of gravity convection effect on structure formation of crystalline materials and to make some recommendations concerning methods of action on this process under space conditions as well.

УДК 536.42:621.891

Г. Д. Гамуля¹, В. В. Скороход², В. П. Солнцев²,
М. Н. Сурду³, Г. А. Фролов²

¹СКТБ Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна, Харків

²Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича, Київ

³Державне науково-виробниче підприємство «Спецавтоматика», Київ

Разработка научной аппаратуры и антифрикционных материалов нового поколения для проведения космического эксперимента «Материал-Трение»

Космічний експеримент «Дослідження перспективних для космічної техніки матеріалів на тертя і знос у відкритому космічному просторі і наземних лабораторіях» (шифр КЭ «Материал-тертя») прийнято до реалізації у першій п'ятірці на етапі розгортання російського сегменту Міжнародної космічної станції. Зарах у підготовці цього експерименту заплановано участь ряду російських, українських і білоруських організацій. Представлено стан робіт, які проводяться організаціями України з підготовки наукової апаратури для космічного експерименту «Материал-тертя» і розробки однієї з основних груп матеріалів, призначених для досліджень в цьому експерименті, — антифрикційних матеріалів з елементами самоорганізації.

ВВЕДЕНИЕ

Обоснование необходимости проведения Украиной ряда космических экспериментов (КЭ) на исследовательских модулях российского сегмента Международной космической станции (РС МКС), в том числе для экспериментов, которые в дальнейшем были объединены под шифром КЭ «Материал-Трение» было выполнено в 1998 году и опубликовано в работах [5, 7]. Вопросы, связанные с применением аппаратуры, позволяющей регистрировать динамику изменения свойств материалов, применяемых для космических аппаратов, непосредственно в процессе воздействия факторов космического пространства были рассмотрены в [3].

В результате проведенных работ космический эксперимент «Исследование перспективных для космической техники материалов на трение и износ в открытом космическом пространстве и наземных лабораториях» (шифр «Материал-Трение») был принят к реализации в первой пятерке на этапе развертывания российского сегмента Международ-

ной космической станции.

В настоящее время выполнены аванпроект и эскизный проект на научную аппаратуру космического эксперимента «Материал-Трение», в разработке которых участвовали Институт проблем материаловедения и СКТБ Физико-технического института низких температур НАН Украины, Государственное конструкторское бюро «Южное» и Государственное научно-производственное предприятие «Спецавтоматика».

Научная аппаратура космического эксперимента «Материал-Трение» предназначена для получения характеристик трения и изнашивания антифрикционных и износостойких материалов в натурных космических условиях на борту исследовательского модуля РС МКС и в наземных лабораторных условиях с помощью трибометров космического назначения, а также изучение фрикционного поведения материалов в условиях космоса и выявление влияния факторов космического пространства на механизмы изнашивания исследуемых материалов.

Потенциальными объектами исследования явля-

ются антифрикционные и износостойкие материалы, перспективные для узлов трения КА, в том числе композиционные износостойкие материалы на металлической основе, включая принципиально новые материалы разработки Института проблем материаловедения НАНУ, в основу которых положен принцип самоорганизующихся систем; самосмазывающиеся антифрикционные материалы на полимерной основе; твердые смазочные покрытия и др. [2, 4]. Проведение экспериментов в космосе позволит выявить не только влияние вакуума, условий теплообмена и циклического изменения температуры, которые надежно моделируются в наземных экспериментах, но и учесть воздействие радиации и длительной микрогравитации на процессы трения. Последний фактор особенно важен для понимания влияния продуктов изнашивания материалов на процессы трения.

Результаты космического эксперимента «Материал-Трение» позволяют повысить надежность и достоверность моделирования воздействия факторов космического пространства на процессы трения и изнашивания, что в свою очередь послужит основой для создания банка сертифицированных триботехнических данных материалов, перспективных для изделий космической техники.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ «МАТЕРИАЛ-ТРЕНИЕ»

Комплекс научной аппаратуры, разрабатываемой в настоящее время украинской стороной, состоит из комплекта бортового оборудования (КБО-Т) и комплекта наземного оборудования (КНО-Т).

На рис. 1 показана структурная схема КБО-Т, в состав которой входят:

- МБТ — многопозиционный бортовой трибометр, включающий три модульных узла трения и электромеханический привод. Конструктивно два МБТ, расположенные на одной оси, объединены в блок МБТ. В составе КБО-Т предусмотрено три блока МБТ.
- БУК-1 — многоканальная система для управления работой блоков МБТ.
- БУК-2 — системный микроконтроллер, включающий микроконтроллер, контроллер интерфейса, блок памяти, блок связи с бортовым вычислительным комплексом.
- КТЭ-МБТ — контейнер для хранения, транспортирования и эксплуатации блоков МБТ и образцов материалов для экспонирования, а также БУК-1.
- КТ — собственно контейнер.
- КТ-БУК — контейнер для хранения и транс-

портирования БУК-2.

— ОМЭ — образцы материалов для экспонирования.

— ПМ — платформа для монтажа КТЭ-МБТ на внешней оболочке РС МКС.

Структурная схема МБТ представлена на рис. 2. МБТ представляет собой многопозиционный бортовой трибометр, включающий три модульных узла трения, установленные на общем валу, соединенном с электромеханическим приводом. Привод

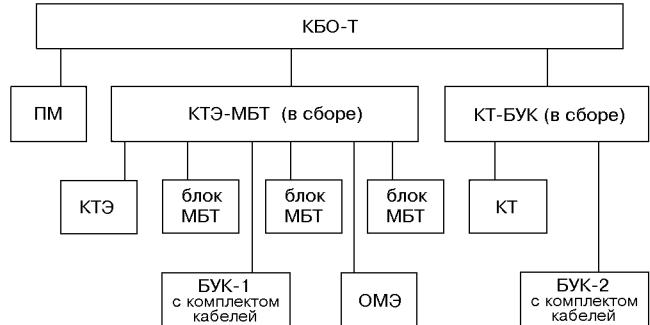


Рис. 1. Структурная схема комплекта бортового оборудования для проведения космического эксперимента «Материал-Трение»: КБО-Т — комплект бортового оборудования; МБТ — многопозиционный бортовой трибометр; ПМ — платформа для монтажа КТЭ МБТ на внешней оболочке РС МКС; БУК-1 — многоканальная система для управления работой блоков МБТ; БУК-2 — системный микроконтроллер; ОМЭ — образцы материалов для экспонирования; КТЭ-МБТ — контейнер для хранения, транспортирования и эксплуатации блоков МБТ и образцов-материалов для экспонирования, а также БУК-1; КТЭ — собственно контейнер; КТ-БУК — контейнер для хранения и транспортирования БУК-2; КТ — собственно контейнер

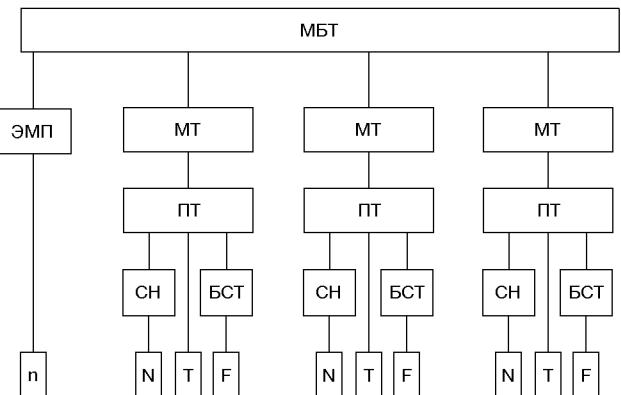


Рис. 2. Структурная схема многопозиционного бортового трибометра: МБТ — многопозиционный бортовой трибометр; ЭМП — электромагнитный привод; МТ — модульный узел трения; ПТ — пара трения; СН — система нагружения; БСТ — блок измерения силы трения; n — датчик частоты вращения вала; N — датчик силы (нормальной нагрузки); T — датчик температуры; F — датчик силы (силы трения)

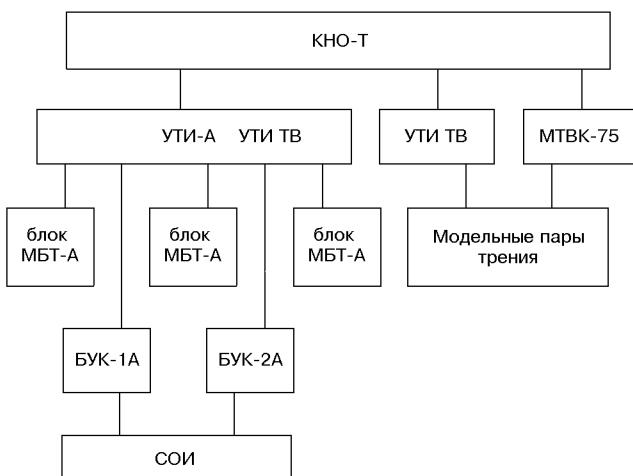


Рис. 3. Структурная схема комплекта наземного оборудования для проведения космического эксперимента «Материал-Трение»: КНО-Т — комплект бортового оборудования; МБТ-А — лабораторный аналог многопозиционного бортового трибометра; УТИ-А — криогенно-вакуумная лабораторная установка, в которой имитируется воздействие факторов космического пространства на МБТ-А; УТИ ТВ — криогенно-вакуумная лабораторная установка, в которой имитируется воздействие факторов космического пространства на модельные пары трения; МТВК-75 вакуумная установка для испытаний модельных пар трения; БУК-1А — многоканальная система для управления работой блоков МБТ; БУК-2А — системный микроконтроллер; СОИ — система обработки информации, получаемой от КБО-Т и КНО-Т

снабжен датчиком частоты оборотов вала.

Узел трения состоит из пары трения, представляющей собой ведущий образец-диск (или два диска), к торцевым поверхностям которого прижимаются два ведомых образца-шарика (или цилиндрические инденторы), системы нагружения, блока измерения силы трения и датчика температуры одного из ведомых образцов.

На рис. 3 представлена структурная схема КНО-Т. В состав КНО-Т входят:

- МБТ-А — лабораторный аналог МБТ. В составе КНО-Т предусмотрено три блока МБТ-А;
- БУК-1А — многоканальная система для управления работой МБТ-А;
- БУК-2А — системный микроконтроллер, включающий микроконтроллер, контроллер интерфейса, блок памяти, блок связи с компьютером;
- Модельные пары трения для отбора материалов, перспективных для космического эксперимента (по 20 пар трения для каждого из исследуемых сочетаний материалов);
- УТИ ТВ — криогенно-вакуумная лабораторная установка, в которой имитируется воздействие факторов космического пространства на модельные пары трения;
- МТВК-75 — вакуумная машина трения;

— УТИ-А — криогенно-вакуумная лабораторная установка, в которой имитируется воздействие факторов космического пространства на МБТ-А;

— СОИ — система обработки информации, получаемой от КБО-Т и КНО-Т;

— Наземное оборудование для тестирования КБО-Т по стандартной программе, предусмотренной для оборудования, поставляемого на борт РС МКС.

На рис. 4 представлена структурная схема измерительных каналов трибометра. Основным элементом является многоканальная информационно-измерительная система (МИСС). МИСС предназначена, для измерения электрического сопротивления, термоэдс, электрического напряжения, коэффициента передачи напряжения датчиков температуры: термометров сопротивления, термисторов, шести типов термопар, диодных чувствительных элементов и других датчиков, информативными параметрами которых являются перечисленные величины.

Система включает одноканальный измеритель МИСС, который совместно с шестнадцатиканальным коммутатором образует шестнадцатиканальную измерительную систему. Система имеет конфигурируемую оператором гибкую структуру, которая позволяет использовать для измерения температуры любой из возможных типов датчиков температуры или тензометрические датчики усилий любой структуры. Система позволяет гибко изменять алгоритм обработки исходной информации о параметрах датчиков, в том числе осуществлять усреднение или весовую фильтрацию для устранения влияния перекосов в трибометре и др. Количество используемых измерительных систем определяется числом необходимых измерительных каналов, а также ограничениями по количеству вводов и по быстродействию. Высокие точность и чувствительность измерительной системы и мощное программное обеспечение, позволяющие обеспечить необходимую реальную высокую помехоустойчивость в условиях влияния тепловых, вибрационных и электромагнитных помех, дают возможность достигнуть высокой информативности результата измерения.

ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР ИЗНОСОСТОЙКИХ И АНТИФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ЭЛЕМЕНТАМИ САМООРГАНИЗАЦИИ

Использование материалов на основе самоорганизующихся неорганических систем для узлов трения представляет особый интерес. Эти износостойкие материалы способны рассеивать внешний поток энергии, и при трении в экстремальных условиях улучшают свои функциональные свойства. По-

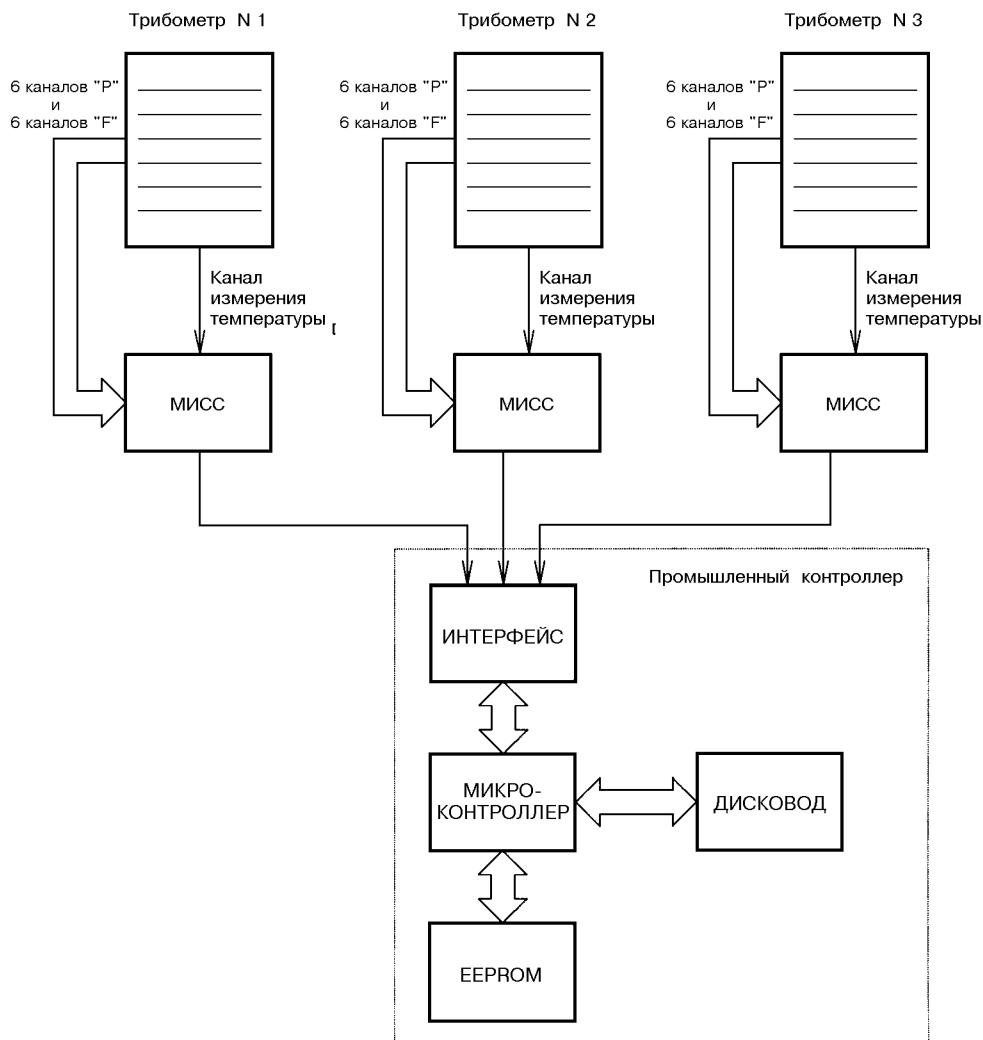


Рис. 4. Структурная схема измерительных каналов трибометра на базе системы МИСС

скольку космический вакуум, среда планет Марса, Венеры являются экстремальными для работы узлов трения космических аппаратов, в условиях которых наиболее интенсивно проявляется воздействие внешних энергетических потоков на материалы, следует ожидать, что композиции на основе самоорганизующихся систем могут проявить максимальный уровень своих функциональных свойств.

Триботехнические исследования, которые проводились в вакууме, показали, что характер трения и износа резко изменяется, если в композициях есть как твердые фазы — упрочнители, так и твердые смазки. Их совместное влияние наиболее выражено, если во время трения возбуждаются химические процессы, приводящие к образованию вторичных структур с динамическим характером устойчивости. Это свойственно системам, содержащим халько-

генидные составляющие. При весьма малых концентрациях халькогенидной составляющей (до 1.5 %) интенсивность износа уменьшается в 5—10 раз. Такие композиции обладают всеми необходимыми элементами процессов самоорганизации и без сомнения станут определяющими для нового поколения материалов космического назначения.

Процессы самоорганизации при трении возникают и в случае стандартных известных материалов при реализации нормального окислительного износа [1]. В таких случаях под воздействием внешней среды на поверхности трущегося тела вследствие трибоактивации образовывались вторичные структуры, которые обеспечивали резкое снижение интенсивности износа и коэффициента трения. По существу в зоне трения возникла динамически устойчивая структура, которая возобновлялась в

результате воздействия внешних энергетических и материальных потоков. В вакууме и инертных средах вследствие отсутствия материальных потоков внешней среды (воздуха, активных газов), процессы самоорганизации возможно реализовать в случае, если материал будет иметь продолжительную или постоянную возбудимость только внешними энергетическими потоками [6]. Такая композиция должна быть, без сомнения, неравновесной, в структуре которой должен находиться источник термодинамической неустойчивости. Для этого в структуре материала необходимо иметь гетерогенизирующую фазу, которая бы позволяла локализовать пластическую деформацию и привести к упругому взаимодействию полей напряжений вокруг нее, приводящему к трансформации упругой энергии в тепловую. Именно тепловая энергия, действующая на источник термодинамической неустойчивости, приводит к протеканию химических реакций в кинетической области, в результате которых происходит как релаксация напряжений, так и залечивание структурных и поверхностных межкристаллических дефектов. Возникает вопрос — как долго может сохраняться источник неустойчивости (неравновесности)?

Механизм сохранения постоянной возбудимости заключается в реализации автоволновых процессов в порошковой среде. Введение термодинамически неустойчивого соединения в композицию, при разложении которого в условиях трибоактивации возникают химические реакции, приводят к самообновлению источника возбудимости. При этом в порошковой реагирующей среде вследствие постоянного протекания химических реакций происходит релаксация дефектов в большей степени на поверхности трения, где они в основном накапливаются, т. е. происходит процесс залечивания, и материал восстанавливает свой функциональные свойства.

На рис. 5 показано, что введение небольшого количества термодинамически неустойчивого соединения в композицию, основой которой является обычная инструментальная сталь, приводит к увеличению износостойкости, например, в среде CO_2 на порядок, а в вакууме — в пять раз.

На рис. 6 представлены результаты испытаний модельных материалов на основе титана. Как видно, при таких же структурных составляющих материал с элементами самоорганизации существенно превосходит свои равновесные аналоги. Композиция с элементами самоорганизации при трении в зависимости от величины внешних механических воздействий имеет несколько областей минимальных значений интенсивности износа или, как при-

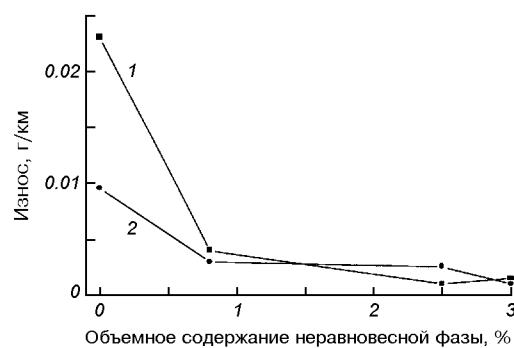


Рис. 5. Влияние содержания неравновесной фазы на износостойкость инструментальной стали в среде CO_2 и вакууме при скорости скольжения 0.5 м/с и нагрузке 25 Н: 1 — в среде CO_2 (300 Па); 2 — при давлении 1.33 мПа

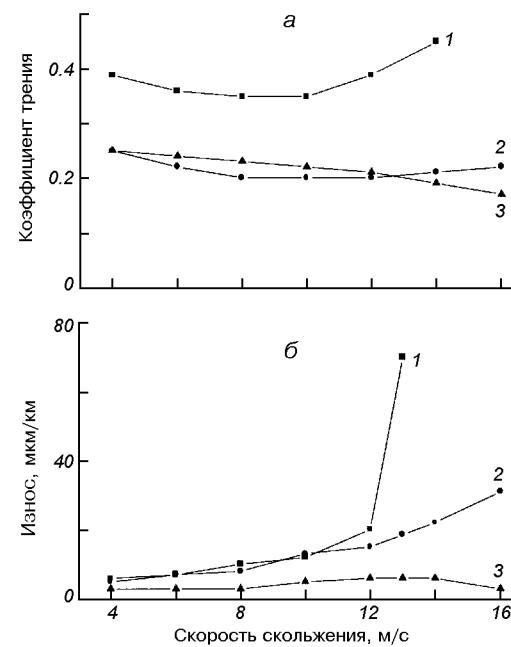


Рис. 6. Зависимость триботехнических свойств равновесного и неравновесного материалов на основе титана от скорости скольжения: 1 — $\text{Ti} + 6$ об. % твердой смазки (равновесный материал); 2 — $\text{Ti} + 12$ об. % твердого соединения + 6 об. % твердой смазки (равновесный материал); 3 — $\text{Ti} + 12$ об. % твердого соединения + 6 об. % твердой смазки (неравновесный материал с элементами самоорганизации)

нято называть, областей нормального механохимического износа. Кроме того, материалы с элементами самоорганизации наследуют свои диссипативные свойства в зависимости от технологических параметров получения композиции, в частности температуры спекания (рис. 7). Наблюдаются немонотонное изменение триботехнических свойств

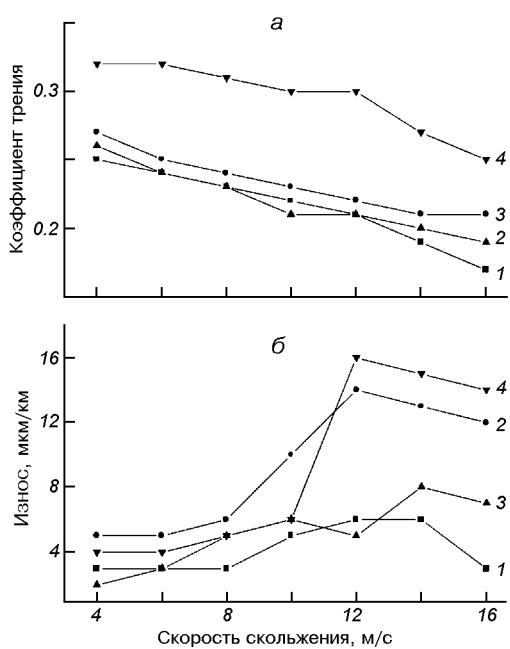


Рис. 7. Зависимость триботехнических свойств материала с элементами самоорганизации от температуры спекания: 1 — 1225 °C, 2 — 1250 °C, 3 — 1300 °C, 4 — 1350 °C

композиции, спеченной при разных температурах.

В настоящее время созданы материалы на базе металлических систем (Ti, V, Fe и др.), предназначенные для работы в узлах трения марсоходов, а также в условиях высокого вакуума. Изучение трения и износа этих материалов проводилось по различным схемам скольжения: сегментный образец — вал, плоский образец — вал, сфера — плоскость, плоскость — плоскость. Интенсивность износа материалов, содержащих подсистему, склонную к самоорганизации, в сравнении с известным материалом С-5, применяемым для шасси «Лунохода», в 2–3 раза ниже при трении в вакууме и в 8–10 раз при трении в разреженной среде CO₂.

Испытания разработанных материалов для изделий типа «Зубчатое колесо» приводились в вакууме (6.7 мПа) и разреженной среде CO₂ (1.3 кПа) по схеме кольцо — сферический индикатор с радиусом 2.25 мм при скорости скольжения 0.5 м/с и нормальной нагрузке 25 Н. Пары кольцо — индентор изготавливались из одноименных материалов. Оценка интенсивности износа производилась по потере массы кольца и индентора в г/км пути трения. Данная схема испытания являлась основной при выборе перспективных материалов для шестеренчатых передач в луноходе, так же, как и условия испытаний (скорость, нагрузка).

Результаты испытаний показали, что введение в состав материалов термодинамически неустойчи-

вых соединений, вызывающих процессы самоорганизации, при трении и износе существенно снижают интенсивность износа как в среде CO₂, так и в вакууме.

Наиболее износостойкими в разреженной среде CO₂, как и на воздухе, является материал на основе высоколегированной стали Р6М5 с объемной долей термодинамически неустойчивого соединения до 3 %. При трении в вакууме лучше работает среднелегированный материал 10Х4В2М2 с объемной долей этого соединения 2.5 %. При этом оба материала примерно одинаково работоспособны и в вакууме, и в окислительных средах (воздух, CO₂).

Износостойкость этих материалов в сравнении с металло-стеклянным материалом С-5Ф (самым лучшим из серии, предложенных для шасси «Лунохода») при трении в вакууме выше в 3–4 раза и в 5–10 раз выше при трении в среде CO₂. Это позволяет их рекомендовать в качестве материалов для зубчатых механизмов, работающих как на орбите, так и в атмосфере Марса.

Материалы с элементами самоорганизации на основе титана, в связи с его кристаллическим строением (гексагональная решетка), предпочтительно использовать как антифрикционные, в частности в качестве подшипников скольжения. Поэтому схема испытания (вал — втулка), скорость скольжения до 16 м/с и нагрузка 1.5—2.5 МПа были выбраны исходя из условий эксплуатации материалов такого класса.

Полученные результаты свидетельствуют о широких возможностях управления триботехническими свойствами материалов на основе титана. В отличие от материалов с элементами самоорганизации на основе легированных сталей мартенситного класса, которые не существенно изменяют коэффициент трения при изменении состава, степени легирования и величины внешней нагрузки, материалы на основе титана обладают более широким спектром функциональных свойств. Характеристики трения и износа этих материалов свидетельствуют о высокой износостойкости и позволяют их считать перспективными для применения в изделиях космической техники.

1. Поверхностная прочность материалов при трении / Под ред. Б. И. Костецкого. — Киев: Техніка, 1976.—296 с.
2. Скороход В. В., Фролов Г. А. Наземные исследования материалов и конструкций для ракетно-космической техники // Космічні дослідження в Україні, 2000—2002. — Київ: НКАУ, 2002.—С. 77—83.
3. Сурду М. Н., Фролов Г. А., Камелин А. Б. Некоторые аспекты применения импедансометрии в экспресс-измерениях влияния факторов космического пространства на свойства материалов // Сб. трудов конференции «Сучасні технології в аерокосмічному комплексі». — Житомир: ЖІТП,

- 4-6 вересня 2001. — С. 25—29.
4. Фролов Г. А., Скороход В. В. Задачи некоторых материаловедческих экспериментов на РС МКС // Сб. трудов Первой украинской конференции по перспективным космическим исследованиям. — Киев: НКАУ, ИКИ НАНУ-НКАУ, 8—10 октября 2001.—С. 31—35.
5. Gamulia G. D., Ostrovska O. L., Yukhno T. P. Study of the adequacy of the friction and wear data obtained for antifriction and wear-resistant materials directly in space at orbital stations and in laboratory conditions // Космічна наука і технологія.—2000.—6, № 4.—С. 44.
6. Skorokhod V. V., Solntsev V. P., Solntseva T. A. Physico-chemical fundamentals of creating materials with elements of self-organization // Proceedings of Inter. conf. Science for Materials in the Frontier of Centuries: Advantages and Challenges, 4-8 November 2002, Kiev, Ukraine. — P. 60—61.
7. Trefilov V. I., Frolov G. A., Surdu M. N., et al. Degradation of materials and constructions under the influence of outer space factors // Космічна наука і технологія.—2000.—6, № 4.—С. 30—32.

THE ELABORATION OF NOVEL SCIENTIFIC INSTRUMENTATION AND ANTIFRICITION MATERIALS FOR PERFORMING THE «MATERIAL-FRICTION» SPACE EXPERIMENT

G. D. Gamulya, V. V. Skorokhod, V. P. Solntsev,
M. N. Surdu, G. A. Frolov

The space experiment «The investigation of materials perspective for space engineering on friction and wearing in open space and ground laboratories (the code is SE «Material-Friction») was adopted for realization among the first five experiments at the stage of development of the Russian Segment of International Space Station. At present the participation of some Russian, Ukrainian, and Belorussian organizations is scheduled for preparation of the experiment. We describe the state of the work which is carried out by Ukrainian organizations for the preparation of scientific instrumentation for SE «Material — Friction» and for the elaboration of one of the main groups of the materials destined for investigations in the frameworks this experiment, namely, antifriction materials with elements of self-organizing.

С. И. Бондаренко¹, Р. В. Гаврилов¹, В. В. Еременко¹, К. В. Русанов¹,
Н. С. Щербакова¹, И. М. Дергунов², А. П. Крюков², П. В. Королев²,
Ю. Ю. Селянинова², В. М. Жуков³, В. С. Харитонов⁴, К. В. Куценко⁴,
В. И. Деев⁴, В. А. Шувалов⁵

¹Фізико-технічний інститут низьких температур НАНУ

²Московський енергетичний інститут

³Інститут високих температур РАН

⁴Московський інженерно-фізичний інститут

⁵Центральний науково-дослідний інститут машинобудування

Программа теплообмена и гидродинамики в жидкому гелии на Международной космической станции

Представлено програми спільних українських і російських експериментів з використанням проектованої в Україні кріогенної політної установки (КПУ) для міжнародної космічної станції МКС. Установка дає можливість створити контрольований рівень мікрогравітації в діапазоні (0.01—0.0001) g за рахунок обертання кріостата і візуалізувати процеси у рідкому гелії. Першочергові експерименти стосуються досліджень різних аспектів кипіння рідкого гелію. Для реалізації кожного з цих експериментів буде використовуватися той самий гелієвий кріостат, блок керування, розташований усередині МКС, і різні експериментальні комірки з нагрівачами і давачами температури. Об'єднання п'яти експериментів в одну програму дає значну економію фінансових засобів і часу. Широкий спектр можливих перспективних досліджень є передумовою розвитку КПУ як унікальної кріогенної космічної лабораторії.

ВВЕДЕНИЕ

Концепция экспериментов по кипению жидкого гелия в условиях микрогравитации и украинской криогенной установки для международной космической станции была впервые представлена в 1998 г. [1]. Особенности установки с точки зрения новых исследовательских возможностей состоят в создании контролируемой микрогравитации в диапазоне (10^{-2} — 10^{-4}) g за счет вращения криостата и визуализации процессов в жидком гелии.

За прошедшее время были продолжены организационные работы и научные исследования в этой области. Существенным новым моментом в организации работ стало объединение усилий Украины и России в подготовке криогенных экспериментов на борту МКС. В настоящее время Физико-технический институт низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины (ФТИНТ) со стороны Украины с некоторыми российскими организациями готовят совместные эксперименты с использованием проектируемой в Украине криогенной полетной установки

(КПУ). Организации, участвующие в кооперации на сегодняшний день, представлены коллектиком авторов этой статьи.

Полетные эксперименты по физике криогенных жидкостей, предложенные российскими организациями, представляют взаимный научный интерес.

Первоочередные планируемые эксперименты относятся к исследованию различных аспектов кипения жидкого гелия. В таблице представлено краткое описание планируемых экспериментов по физике кипения. Для реализации каждого из этих экспериментов будет использоваться один и тот же гелиевый криостат, блок управления, расположенный внутри МКС и различные экспериментальные ячейки с нагревателями и датчиками температуры. Объединение пяти экспериментов в одну программу дает значительную экономию финансовых средств и времени. Облик КПУ приобрел за эти годы более завершенный вид [2]. На рис. 1 представлена упрощенная схема установки.

В настоящее время обсуждается возможность развития КПУ в будущем с целью расширения ее

Краткое описание экспериментов по физике кипения, планируемых украинскими и российскими учеными

| Эксперимент | Организация-постановщик | Объект исследования |
|-------------|---|---|
| № 1 | Физико-технический институт низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины | Рост и отрыв паровых пузырей на единичном центре парообразования |
| № 2 | Физико-технический институт низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины | Возникновение и движение границы между областями с пузырьковым и пленочным режимами кипения в одномерной и двумерной схемах кризиса теплообмена |
| № 3 | Московский энергетический институт (МЭИ), Россия | Возникновение и динамика паровой пленки; теплообмен при пленочном кипении |
| № 4 | Московский инженерно-физический институт (МИФИ), Россия | Теплообмен и режимы парообразования при «набросе» мощности |
| № 5 | Институт высоких температур РАН (ИВТАН), Россия | Теплообмен и режимы парообразования на поверхности с пористым покрытием |

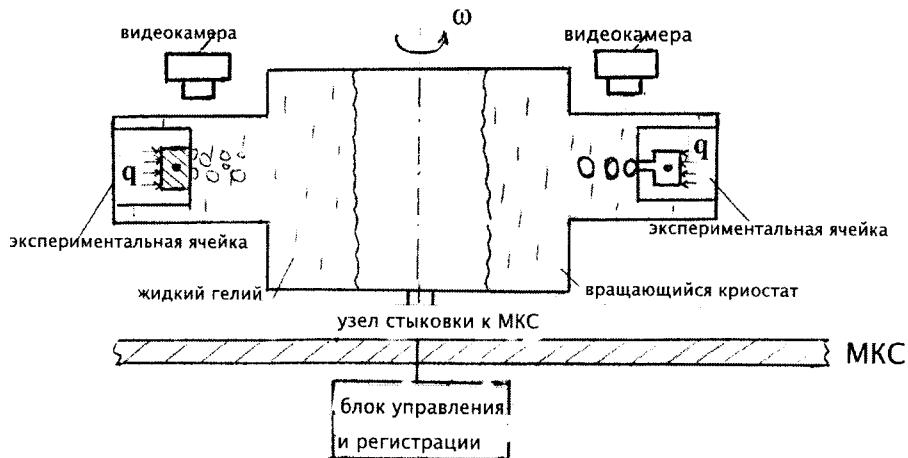


Рис. 1. Упрощенная схема установки

функциональных возможностей и проведения перспективных экспериментов.

ПЕРВОЧЕРЕДНЫЕ РОССИЙСКО-УКРАИНСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО КИПЕНИЮ В ЖИДКОМ ГЕЛИИ

Анализ содержания предложенных на сегодняшний день научных экспериментов показал их значительную близость в способах реализации.

Все пять предлагаемых экспериментов состоят в подводе тепла к неподвижному или движущемуся жидкому гелию с целью вызвать парообразование, в измерении температур гелия и тепловыделяющей поверхности, в видеорегистрации процессов фазового перехода «жидкость—пар» (определение положения и скорости движения поверхности раздела фаз) и в создании определенных микроускорений.

Четыре эксперимента выполняются в нормальном гелии, один — в сверхтекучем. Большинство экспериментов относится к изучению кризисных переходов между режимами теплообмена в жидком гелии и эффектов нестационарности; некоторые касаются влияния свойств поверхности кипения на парообразование и теплообмен.

Проведя также эксперименты на нагревателях с

различной шероховатостью и выполненных из различных материалов, получаем дополняющие друг друга данные, дающие достаточно развернутую картину различных случаев кипения.

Содержание экспериментов объединенной российско-украинской программы по кипению таково.

Эксперимент № 1 (постановщик ФТИНТ) выполняется в нормальном гелии под давлением, близком к атмосферному. Цель эксперимента — получить видеозапись роста и отрыва паровых (газовых) пузырей в гелии на единичном центре парообразования при трех уровнях искусственной микрогравитации (разные скорости вращения криостата). Для подготовки эксперимента были разработаны и изготовлены макеты нагревателя и системы видеосъемки. На рис. 2 представлена схема разработанной конструкции нагревателей.

Эксперименты № 2 и № 3 (постановщик ФТИНТ) выполняются при условиях, аналогичных эксперименту № 1. Цель этих экспериментов — изучение влияния микроускорений на устойчивость пузырькового и пленочного режимов кипения гелия к локальным тепловым возмущениям, а также динамики автоволнового процесса кризисной смены режимов кипения вследствие потери устойчивости.

Предполагается исследовать задачу при локали-

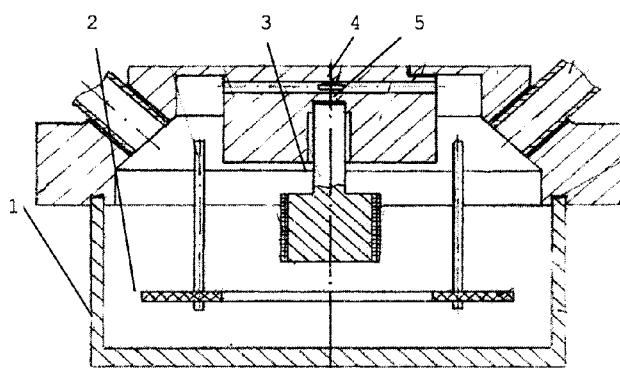


Рис. 2. Схема нагревателя 1 — тело нагревателя, 2 — вакуумная изоляция, 3 — тепловыделяющий элемент, 4 — центр кипения, 5 — датчик температуры

зации возмущения в центре круглой пластины, эксперимент и локализация возмущения в небольшой зоне узкого кольца. Режим подачи мощности или квазистационарный (последовательное повышение и снижение мощности малыми ступенями на всей поверхности), или наброс мощности (быстрое включение одной высокой ступени — имитация возмущения), или полное выключение — в зоне возмущения.

Эксперимент № 3 (постановщик МЭИ) выполняется в сверхтекучем гелии на цилиндрической поверхности кипения, окруженной пористым экраном. Цель эксперимента — исследование влияния различных микроускорений на возникновение и распад паровой пленки, отделяющей сверхтекучую жидкость от нагреваемой поверхности (т. е. опять-таки на кризисный переход между режимами однодфазной конвекции и кипения), а также на движение границы между паровой пленкой и жидким гелием (рис. 3). Режим подачи мощности — увеличение и снижение большими ступенями сверхкритического уровня.

Эксперимент № 4 (постановщик МИФИ) выполняется в условиях, аналогичных экспериментам № 1—3. Плоская поверхность кипения также близка по характеристикам к используемой в эксперименте № 2. Электрообогрев равномерен по поверхности, однако существенно нестационарен по времени. Он производится скачком в виде наброса мощности от нуля до уровня, превышающего критический. Цель эксперимента — исследовать влияние различных микроускорений и величины набрасываемых плотностей теплового потока на время между набросом и развитием кризиса кипения, а также на динамику температуры поверхности кипения, образование и движение паровой фазы (рис. 4).

Эксперимент № 5 (постановщик ИВТАН) выполняется в условиях и на поверхности кипения, аналогичной используемой в эксперименте № 2, за-

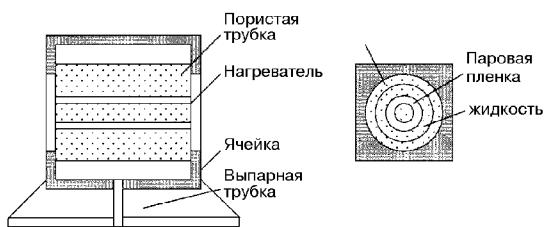


Рис. 3. Экспериментальная ячейка

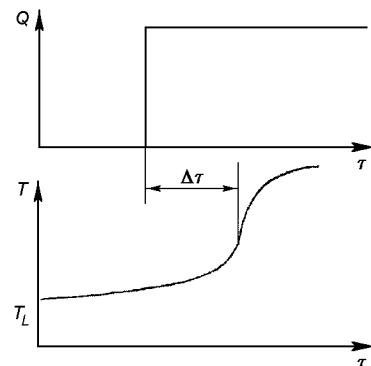


Рис. 4. Схема подачи мощности и изменения температуры

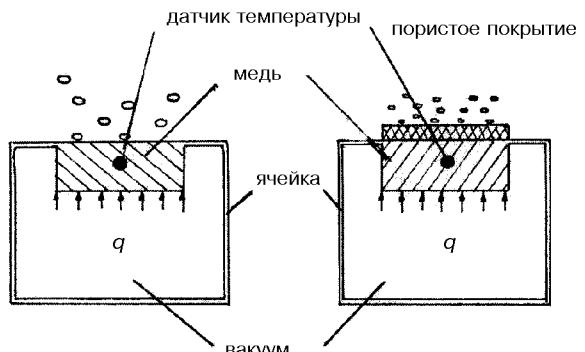


Рис. 5. Экспериментальная ячейка

исключением того отличия, что на поверхность нанесены металлические пористые покрытия (рис. 5). Цель эксперимента — определить влияние различных уровней микроускорения и различных характеристик покрытия (толщина, пористость, проницаемость) на теплообмен в жидком гелии, в особенности на критические плотности теплового потока. Режим изменения мощности — квазистационарный (т. е. малыми ступенями).

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ В ЖИДКОМ ГЕЛИИ И РАЗВИТИЕ КОСМИЧЕСКОЙ КРИОГЕННОЙ УСТАНОВКИ

Перекачка криогенной жидкости в космос играет важную роль для дозаправки систем охлаждения космических аппаратов. В первых опытах, прове-

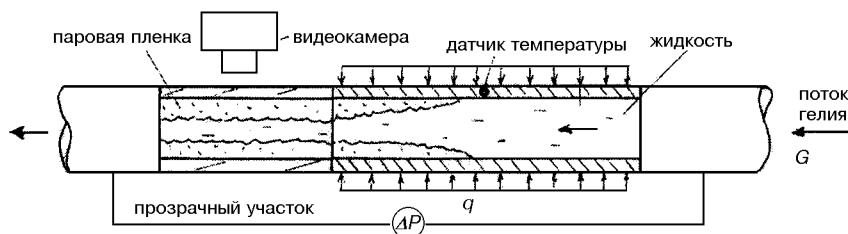


Рис. 6. Схема экспериментального устройства

денных американскими учеными, была обнаружена высокая чувствительность процесса к ускорениям космического аппарата. На российском модуле предполагается провести исследования по перекачке гелия для отработки наиболее надежной методики ее осуществления. С этой целью планируется поставить эксперимент «Криомагистраль» (поставщик ЦНИИМАШ) для выяснения физики движения жидкно-паровой смеси в канале.

Эксперимент «Криомагистраль» выполняется в сверхтекучем гелии с использованием экспериментального трубопровода, непрозрачная часть которого оснащена электронагревателем и датчиками температуры стенок, а прозрачная часть позволяет наблюдать за процессами течения двухфазного потока и определять скорости фаз (рис. 6). Цель эксперимента — изучить влияние уровня микрогравитации и скорости потока гелия на теплообмен со стенкой трубопровода, структуру двухфазного потока и режимы течения, гидравлическое сопротивление. Режим изменения мощности — квазистационарный, т. е. небольшими ступенями.

Среди других планируемых экспериментов можно отметить:

- исследование перехода от режима передачи тепла теплопроводностью к режиму конвективного теплообмена в условиях управляемой микрогравитации;
- исследование конвекции в жидком гелии при разных уровнях микрогравитации;
- наблюдение за образованием газовых пузырей в жидком гелии при прохождении через него космических частиц;
- исследование бортовых сверхпроводящих детекторов гравитационных волн.

Постановка этих экспериментов требует дальнейшего развития КПУ как криогенной космической космической лаборатории, в которой возможно реализовать различные уровни гравитации и осуществить визуализацию процессов в жидком гелии, чего, по нашим сведениям, не удалось реализовать и не планируется никем на МКС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Украинская криогенная полетная установка для МКС находится в стадии технического проектирования.

2. Проведено обоснование и согласование первоочередных совместных российско-украинских экспериментов в жидком гелии с помощью криогенной полетной установки. В основном это эксперименты по кипению и теплообмену в сверхтекучем и нормальном гелии.

3. Широкий спектр возможных перспективных исследований является предпосылкой развития криогенной полетной установки в будущем.

1. Bondarenko S., Rusanov K., Shcherbakova N. // J. Low Temp. Phys.—2000.—119.—P. 203.
2. Bondarenko S., Rusanov K., Shcherbakova N. // Proceedings of the 5th Chino-Russian-Ukrainian Symposium on Space Science and Technology, June 6–9, 2000, Kharbin, People Republic of China.—2000.—2.—P. 594.

PROGRAM OF THE RUSSIAN-UKRAINIAN INVESTIGATIONS OF THE HYDRODYNAMICS AND HEAT TRANSFER IN LIQUID HELIUM ABOARD THE INTERNATIONAL SPACE STATION

S. I. Bondarenko, R. V. Gavrylov, V. V. Yeremenko, K. V. Rusanov, N. S. Shcherbakova, I. M. Dergunov, A. P. Kryukov, P. V. Korolev, Yu. Yu. Selyaninova, V. M. Zhukov, V. S. Kharitonov, K. V. Kutsenko, V. I. Deev, V. A. Shuvalov

We present the Program of joint Ukrainian and Russian experiments aboard the International Space Station (ISS) with the use of the Cryogenic Flight Facility (CFF) that is under development in Ukraine at present. The CFF allows one to ensure controlled acceleration in the range of $(0.01\text{--}0.0001)g$ by means of the cryostat rotation and to visualize processes in liquid helium. The investigation of phenomena of liquid helium boiling is among the experiment to be carried out first. To realize each experiments, the same cryostat, control unit inside the ISS as well as various experimental cells with heaters and temperature sensors will be used. The integration of the five experiments into one scientific program saves time and resources. A broad spectrum of conceivable promising investigations is a prerequisite to be further evolution of the CFF as a space cryogenic laboratory.

О. В. Мороженко, А. П. Відьмаchenko

Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ

Задачі спектрополяриметричного експерименту на Міжнародній космічній станції

Розв'язання ряду задач з фізики газово-аерозольного шару планетних атмосфер планується здійснити з борту Міжнародної космічної станції в рамках комплексної програми «Планетний моніторинг», яку реалізує Інститут космічних досліджень АН Російської Федерації. За домовленостями між ІКД РАН та ГАО НАН України та погодженням Космічних агентств Росії та України українська сторона розробляє та поставляє УФ-спектрополяриметр, що є складовою згаданої космічної програми. В роботі надається перелік основних наукових задач, які можуть бути розв'язані на основі спостережних даних в УФ-ділянці спектру: 1) визначення спектральних значень комплексного показника заломлення хмарових частинок; 2) вивчення природи фотометричних деталей дисків планет з потужними атмосферами; 3) моніторинг довгoperіодичних змін оптичних характеристик планетних атмосфер та визначення можливого механізму їхньої появи; 4) розв'язання проблеми сильнопоглинаних частинок Акселя, яким приписуються ефекти УФ-поглинання в планетних атмосferах; 5) дослідження потужності водневої атмосфери комет; 6) встановлення причин зміни потужності озонового шару та температурного режиму в глобальних масштабах Землі; 7) уточнення даних про спектральні значення уявної частини показника заломлення марсіанського аерозолю, його оптичної товщини та ефективного радіуса частинок.

ВСТУП

Серед дистанційних методів досліджень лише спектрополяриметрія дозволяє з високою мірою достовірності визначати величину комплексного показника заломлення та параметрів функції розподілу за розмірами хмарових частинок в планетних атмосferах. Характерною властивістю цього методу є те, що спектральні значення другого параметра Стокса $Q(\alpha)$ (α — фазовий кут), який рівний добутку видимого альбедо планети $A(\alpha)$ на ступінь лінійної поляризації $P(\alpha)$ дифузно відбитого нею світла, головним чином визначається ефектами однократного розсіяння світла [14]. Завдяки цьому ще в середині двадцятих років минулого сторіччя Ліо [24], порівнюючи отриману ним фазову залежність ступеня поляризації світла диску Венери з вимірами в лабораторних умовах $P(\alpha)$ для водяних крапельок, прийшов до висновку, що радіус хмарових частинок приблизно рівний 1 мкм. Як не парадоксально, але проведений вже в 1970-х рр. аналіз спектральних фазових залежностей поляризації зі строгим врахуванням багатократного

розсіяння підтверджив, що дійсно ефективний радіус частинок становить 1.05 мкм. Принципово новим в цій роботі було лише визначення дисперсії розмірів частинок (0.07) та спектральних значень дійсної частини показника заломлення $n_r \approx 1.44$ на $\lambda = 900$ нм та 1.46 — в короткохвильовій ділянці спектру [20]. Про чутливість характеру фазової залежності $P(\alpha)$ свідчить рис. 1, який взято з роботи [20].

Пізніше такі оцінки були зроблені також для хмарових частинок атмосфер Марса [6, 10], Юпітера [25] та Сатурна [1]. Доцільно зауважити, що при відсутності спостережних даних про фазові залежності поляризації непогані результати дає аналіз спектральної залежності параметра $Q(\alpha)$ в досить широкому інтервалі довжин хвиль при окремих значеннях фазового кута. Відзначимо, що пряме зондування атмосфери Венери лише уточнило згадані вище характеристики хмарових частинок [23].

Крім оцінок вказаних параметрів хмарових частинок, спектрополяриметрія має важливе значення і при вивченні деяких інших властивостей газово-аерозольного шару планетних атмосфер. Перелічимо їх.

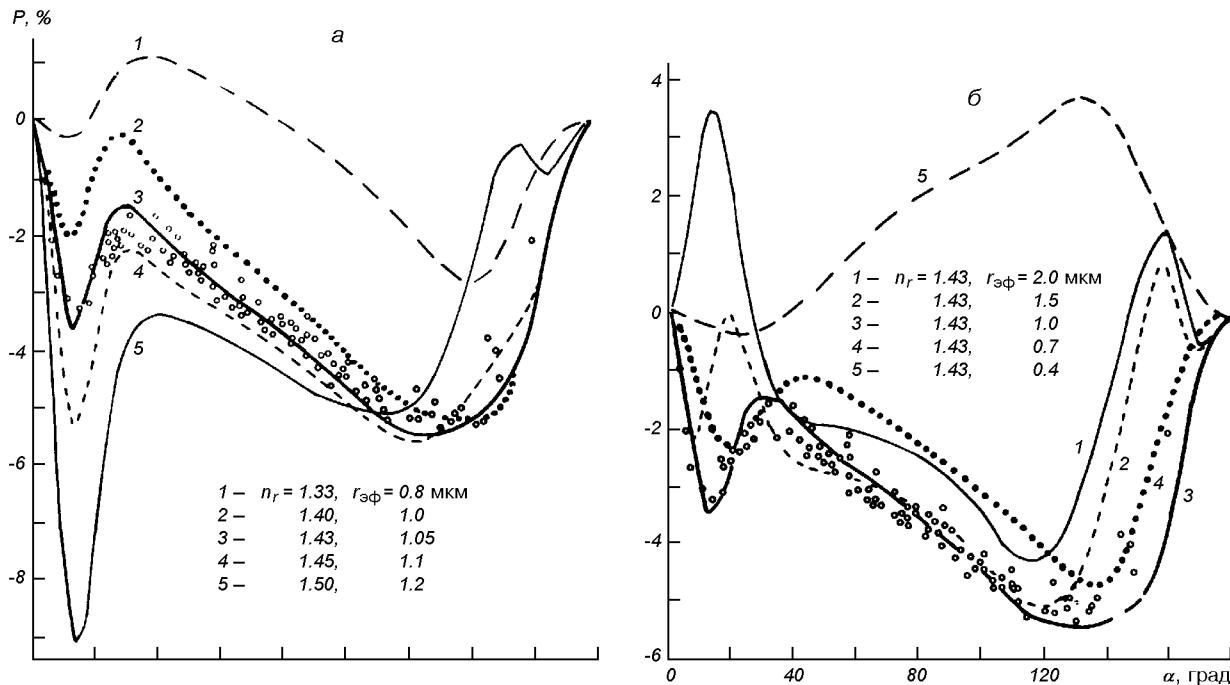


Рис. 1. Спостережна фазова залежність поляризації Венери (світлі кружки) та результати розрахунків: при різних значеннях дійсної частини показника заломлення та середнього радіуса частинок (а), лише середнього радіуса (б)

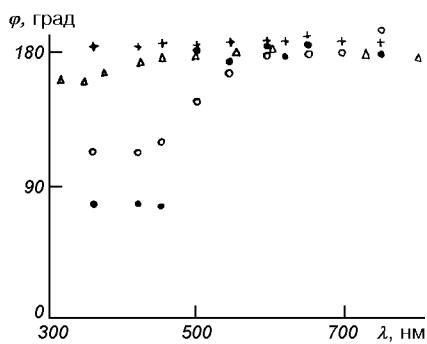


Рис. 2. Спектральна залежність положення площини поляризації світла Сатурна для західного (світлі кружки) та східного (темні кружки) приекваторіальних районів, центра диску (трикутники) та південного полярного району (хрестики)

1. Визначення положення площини поляризації, а вірніше, міри її відхилення від положення площини розсіяння чи радіуса-вектора планети (рис. 2) дозволяє виявляти наявність орієнтованих частинок у верхніх шарах атмосфери. Це було доведено роботами з вивчення поляризаційних властивостей деталей диску Сатурна [2].

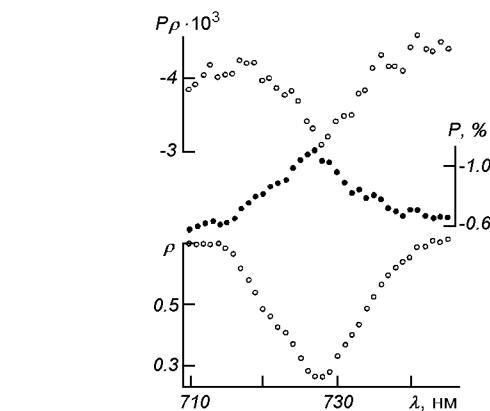


Рис. 3. Спектральна залежність відбивної здатності (темні кружки), ступеня поляризації (світлі кружки внизу) та добутку цих параметрів (світлі кружки вгорі) в смузі поглинання на 727 нм в центрі диску Юпітера

2. Спектрополяриметрія в контурах смуг поглинання метану лише в центрі диску планети (рис. 3) дозволяє з великою точністю визначати кількість метану в надхмаровому шарі [7]. При цьому із спостережень необхідно отримати значення ступеня поляризації світла в центрі смуги поглинання $P_v(\mu_0)$ та в неперервному спектрі $P_c(\mu_0)$, а також

залишкову інтенсивність $R_v(\mu_0)$ в центрі смуги поглинання; визначення кількості метану NL на промені зору здійснюється за формулою

$$NL = -[\mu_0/(1 + \mu_0)k_v] \cdot \ln [P_v(\mu_0)/(P_c(\mu_0) \cdot R_v(\mu_0))],$$

де k_v — значення монохроматичного коефіцієнта поглинання, μ_0 — косинус кута падіння світла.

В подальшому було показано, що такі спостереження світлих та темних поясів диску Юпітера, а також їхня спектрополяриметрія в УФ-променях ($\lambda < 450$ нм) дозволяють визначати різницю положення верхньої межі хмарових щарів над цими деталями (приблизно $0.8H_g$, де H_g — шкала висот газової складової атмосфери), та оптичної товщини газової складової в надхмаровому шарі, а отже, і значення тиску на верхніх межах хмарового шару (приблизно 40 кПа над Екваторіальною Зоною) [11].

3. Спектрополяриметрія світла від усього диску планети при близьких до нуля значеннях фазового кута дозволяє визначати наявність оптичної неоднорідності диску планети, яка може бути зумовлена багатьма факторами (різною концентрацією хмарових частинок або вертикальною структурою хмарового шару, різною природою частинок або їхніх розмірів для різних ділянок диску планети та інше) [11]. Це особливо важливо для вивчення планет, диски яких мають малі кутові розміри.

4. Вивчення причин зміни в часі оптичних характеристик планет. Прикладом цього можуть бути дослідження 4-добових варіацій ступеня поляризації Венери (рис. 4) та причин, які їх зумовлюють [12]. Зараз практично ні в кого не виникає сумнівів у наявності кореляції довгоперіодичних змін оптичних характеристик планет з циклом сонячної активності. Особливо разочі приклади довгоперіодичних змін показують фотометричні спостереження Юпітера [3, 4]. Про це свідчать визначення зіркової величини диску Юпітера у візуальних променях в період з 1860 до 1995 р. (рис. 5). На відміну від цього, чотирьохдобові зміни на Венері приписуються існуванню глобальної асиметрії основного хмарового шару [15] та зміні оптичної товщини надхмарового туману [12]. Після відкриття значних варіацій потужності сонячного випромінювання в далекій УФ-ділянці спектру [16] деякі дослідники стали пов'язувати ці зміни із впливом жорсткого УФ-випромінювання на поглинальні властивості аерозоля у верхніх шарах атмосфери. Поки що залишається відкритою і проблема так званих субмікронних часток Акселя [17] у верхніх шарах атмосфери.

5. Вважаємо за доцільне окремим пунктом винести проблеми глобальних змін потужності озоново-

го шару та теплового режиму на Землі. Всупереч загальноприйнятому допущенню, що зменшення концентрації стратосферного аерозолю зумовлене різноманітними фреонами, зараз переконливо [13] показано, що це можна пояснити збільшенням потужності аерозольного забруднення у верхніх шарах атмосфери. Більше того, зараз вже немає

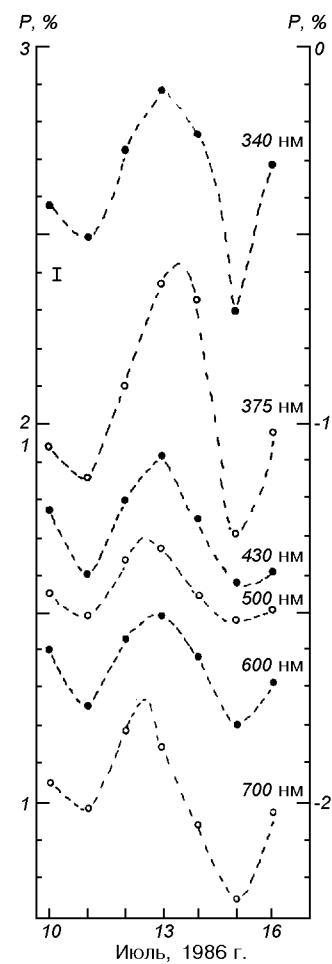


Рис. 4. 4-добові зміни ступеня поляризації світла всього диску Венери в різних довжинах хвиль

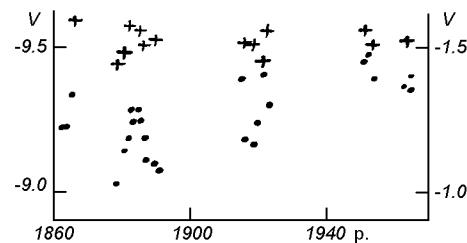


Рис. 5. Довгоперіодичні зміни бліску диску Юпітера (кружки) у візуальних променях в період з 1860 до 1963 р. і Марса (хрестики)

сумнівів, що варіації потужності стратосферного аерозолю впливають також і на тепловий режим Землі в глобальних масштабах. На жаль, на сьогодні зовсім немає інформації про спектральні значення комплексного показника заломлення та параметри функцій розподілу цих частинок за розмірами.

6. Спектрополяриметрія відіграє важливу роль і у вивчені безатмосферних небесних тіл. Найхарактернішим прикладом може бути виявлення оптичної неоднорідності поверхні цих тіл. Справа в тому, що на відміну від фотометричних досліджень, коли варіації близьку можуть бути зумовлені не лише наявністю на диску деталей з різними оптичними властивостями, але й несферичною формою тіла, — зміна ж поляризаційних властивостей зумовлена головним чином оптичною неоднорідністю диску [8].

Зараз непогано вивчені не лише поляризаційні властивості планет, але й накопичені численні дані багаторічних спостережень для видимої ділянки спектру. Що стосується далекого ультрафioletу, то тут лише для Венери космічним апаратом «Піонер-Венера» було отримано великий обсяг інформації [21, 22], але він обмежується однією довжиною хвилі в $\lambda = 268$ нм. Для Марса, наскільки нам відомо, зараз опубліковані лише два спостереження: в 1969 р. було виміряно ступінь поляризації на довжині хвилі $\lambda = 225$ нм при фазовому куті 25.4° [18], та в 1995 р. проведено спектрополяриметричні дослідження в діапазоні довжин хвиль $\lambda\lambda = 210-1020$ нм при фазовому куті 21.7° [19]. Для Юпітера та Сатурна, не говорячи вже про інші планети, таких досліджень зовсім немає. В той же час існує цілий ряд задач, які можуть бути розв'язані або лише на основі даних в УФ-ділянці спектру, або з обов'язковим їхнім долученням до відповідних експериментальних даних у видимій ділянці спектру. Така ж ситуація має місце і для Землі.

ЗАДАЧІ УФ-СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРІЇ ТА ВИСНОВКИ

Незважаючи на досягнуті значні успіхи у вивченні фізичних властивостей планетних атмосфер Сонячної системи, ще й зараз їх можна розглядати лише як перше наближення. Не претендуючи на повноту, нижче перерахуємо основні наукові задачі, для дослідження яких спектральний діапазон необхідно розширити в далеку УФ-області.

1. Визначення спектральних значень комплексного показника заломлення хмарових частинок.
2. Вивчення природи фотометричних деталей дисків планет з потужними атмосферами.
3. Моніторинг довгоперіодичних змін оптичних

характеристик планетних атмосфер та визначення можливого механізму їхньої появи.

4. Розв'язання проблеми сильно поглинаючих частинок Акселя, яким приписуються ефекти УФ-поглинання в планетних атмосферах.

5. Дослідження потужності водневої атмосфери комет.

6. Встановлення причин зміни потужності озонового шару та температурного режиму в глобальних масштабах Землі.

7. Уточнення даних про спектральні значення уявної частини показника заломлення марсіанського аерозолю, його оптичної товщини та ефективного радіуса частинок. Нагадаємо, що між оцінками цих параметрів, отриманими різними методами, зараз мають місце велике розбіжності, які інколи досягають 10—20 разів [5].

Для розв'язання цих задач необхідно отримати спостережні дані про спектральні залежності ступеня поляризації та відбивної здатності в контурах потужних смуг поглинання метану та в далекій УФ-ділянці спектру у максимально широкому інтервалі фазових кутів. Саме це і планується здійснити з борту Міжнародної космічної станції в рамках комплексної програми «Планетний моніторинг», який реалізує Інститут космічних досліджень АН Російської Федерації. За домовленостями між ІКД РАН та ГАО НАН України та погодженням з космічними агенствами Росії та України українська сторона розробляє та поставляє спектрополяриметр, який ввійде як одна зі складових згаданої космічної програми. На рис. 6 показано блок-схему спектрополяриметра, який мусить задоволь-

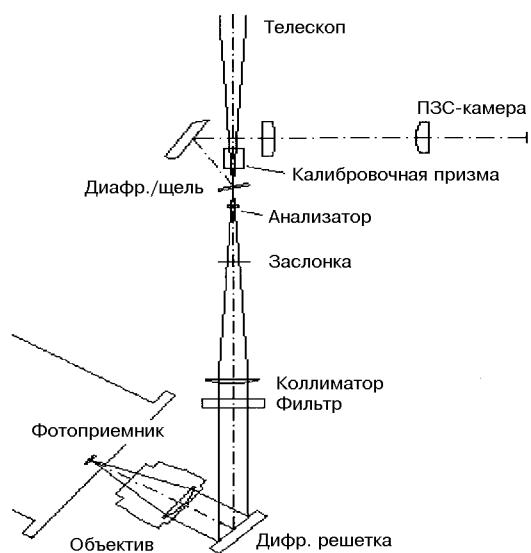


Рис. 6. Схема УФ-спектрополяриметра на борт МКС

Параметри зірок з майже нульовою поляризацією

| HD | Зірка | α | δ | V | P, % |
|--------|----------------|----------------------------------|----------|------------------|---------------|
| 432 | β Cas | 0 ^h 07.8 ^m | +59°01' | 2.2 | 0.009 ± 0.009 |
| 38396 | γ Lep A | 5 43.5 | -22 27 | 3.6 ^m | 005 ± 8 |
| 61421 | α Cmi | 7 38.1 | +5 19 | 0.3 | 005 ± 9 |
| 198149 | η Сер | 20 44.8 | +61 44 | 3.4 | 006 ± 5 |
| 210027 | ι Peg | 22 05.9 | +25 13 | 3.8 | 002 ± 6 |
| 216956 | α Ps A | 22 56.0 | -29 45 | 1.2 | 006 ± 9 |

няті наступні вимоги:

- світлосила 1/8;
- спектральний інтервал, в залежності від приймача випромінювання, знаходить у межах $\lambda\lambda = 220...300$ чи $220...450$ нм;
- спектральна роздільна здатність, в залежності від вибраного приймача випромінювання, буде становити від 1 до 20 нм;
- похибка визначення параметрів лінійної поляризації має бути не більшою 0.1 % (при наявності необхідного відношення сигнал/шум), а відбивної здатності — 5 %.

Для дослідження інструментальної поляризації системи «телескоп + спектрополяриметр» нічого кращого не залишається, як вважати, що світло зірок-стандартів з практично нульовою поляризацією у видимому діапазоні довжин хвиль неполяризоване також і в УФ-променях [26]. В таблиці наводимо перелік зірок з майже нульовою поляризацією.

Практично нульова лінійна поляризація властива також для Веги (α Lyr), яка поряд з α CMi є найзручнішою для дослідження інструментальної поляризації в режимі спектрополяриметра.

Значно складніша справа з метрологією великих значень поляризації, тому що часто використовуваний апроксимаційний вираз

$$P(\lambda)/P(\lambda_{\max}) \approx \exp[-1.15 \cdot \ln^2(\lambda/\lambda_{\max})]$$

для поляризованого міжзоряним середовищем світла навряд чи справедливий. Через це в склад спектрополяриметра в обов'язковому порядку має бути включене джерело з високою поляризацією (100 %-ї поляризатор чи щось інше).

1. Бугаенко О. И., Длугач Ж. М., Мороженко А. В., Яновицкий Э. Г. Об оптических свойствах облачного слоя Сатурна в видимом участке спектра // Астрон. вестн.—1975.—9, № 1.—С. 13—21.
2. Бугаенко О. И., Мороженко А. В. Ориентированные частицы в верхних слоях атмосферы Сатурна. Физика планетных атмосфер. — Киев: Наук. думка, 1981.—С. 108—112.
3. Видьмаченко А. П., Стеклов А. Ф., Миняйло Н. Ф. О возможном периоде активности на Юпитере. Сезоны? //

- Письма в Астрон. журн.—1984.—10, № 9.—С. 691—695.
4. Гаррис Д. Л. Интегральная фотометрия и колориметрия планет и спутников // Планеты и спутники / Под ред. Д. Койпер. — М.: Изд-во иностр. лит., 1963.—С. 241—305.
 5. Длугач Ж. М., Мороженко А. В. Аерозоль в марсіанській атмосфері // Кінематика і фізика небес. тел.—2000.—16, № 5.—С. 437—453.
 6. Дольфюс А., Длугач Ж. М., Мороженко А. В., Яновицкий Э. Г. Оптические параметры атмосферы и поверхности Марса. II. Пылевые бури // Астрон. вестн.—1974.—8, № 4.—С. 211—222.
 7. Кучеров В. А., Мищенко М. И., Мороженко А. В. Спектрополяриметрия в полосах поглощения метана и вертикальная структура планетных атмосфер // Письма в Астрон. журн.—1990.—14, № 9.—С. 835—839.
 8. Лупишко Д. Ф., Бельская Н. Н., Кварцхелия О. И. и др. Поляриметрия Весты в противостояние 1986 г. // Астрон. вестн.—1988.—22, № 1.—С. 142—146.
 9. Мороженко А. В. Поляриметрические исследования планет-гигантов. III. Юпитер // Астрон. журн.—1973.—50, № 1.—С. 163—166.
 10. Мороженко А. В. Оптические параметры атмосферы и поверхности Марса. I. Аэрозольная составляющая чистой атмосферы // Астрон. вестн.—1974.—8, № 3.—С. 121—127.
 11. Мороженко А. В. Зоны и полосы Юпитера. Надоблачный слой // Астрон. вестн.—1990.—24, № 3.—С. 211—220.
 12. Мороженко А. В. Короткопериодические изменения поляризационных свойств излучения Венеры. Кінематика і фізика небес. тел.—1992.—8, № 4.—С. 22—36.
 13. Мороженко О. В., Шаврина В. В., Велесь О. О. Роль стратосферного аерозоля у формировании озонового слоя // Кінематика і фізика небес. тел.—2000.—16, № 4.—С. 364—368.
 14. Соболев В. В. Исследование атмосферы Венеры. II // Астрон. журн.—1968.—45, № 1.—С. 169—176.
 15. Фомін Н. Н., Яновицкий Э. Г. Глобальные вариации оптической толщины атмосферы Венеры. II. Анализ поведения эквивалентных ширин линий CO₂ для модели неоднородной атмосферы // Кінематика і фізика небес. тел.—1993.—9, № 4.—С. 30—42.
 16. Хіт Д. Ф., Текаекара М. П. Солнечный спектр в области 1200—3000 ё // Поток енергии Сонця і його змінення / Под ред. О. Уайт. — М: Мир, 1980.—С. 212—232.
 17. Axel L. Inhomogenous models of the atmosphere of Jupiter // Astrophys. J.—1972.—173, N 2.—P. 451—468.
 18. Coffen D. L., Gehrels T. Ultraviolet polarimetry of planets // Planet. and Space Res.—1970.—10, N 1.—P. 1—7.
 19. Fox G. K., Code A. D., Anderson C. M., et al. Solar system observations by the Wisconsin Ultraviolet Photopolarimeter Experiment. I. The first ultraviolet linear spectropolarimetry of Mars // Astron. J.—1997.—113, N 3.—P. 1152—1157.
 20. Hansen J. E., Hovenier J. W. Interpretation of the polarization of Venus // J. Atmos. Sci.—1974.—31, N 4.—P. 1137—1160.

21. Kawabata K., Coffeen D. L., Hansen J. E., et al. Cloud and haze properties from Pioneer Venus polarimetry // *J. Geophys. Res.*—1980.—**85**, N A13.—P. 8129—8140.
22. Knibble W. J. J., de Haan J. F., Hovenier J. W. Analysis of temporal variations of the polarization of Venus observed by Pioneer Venus orbiter // *J. Geophys. Res.*—1998.—**10**, N E4.—P. 8557—8574.
23. Knollenberg R. G., Hunten D. M. The microphysics of the clouds of Venus: Results of the Pioneer Venus particle size spectrometer experiment // *J. Geophys. Res.*—1980.—**85**, N A13.—P. 8039—8058.
24. Lyot B. Recherches sur la polarization de la lumiere des planetes et de quelques substance terrestres // *Ann. Observ. Meudon*.—1929.—**8**.—P. 1—161.
25. Morozhenko A. V., Yanovitskij E. G. The optical properties of Venus and Jovian planets. I. The atmosphere of Jupiter according to polarimetric observations // *Icarus*.—18.—1971, N 4.—P. 583—592.
26. Serkovskii K. Polarimeters for optical astronomy // *Planets, Stars and Nebula with photopolarimetry / Ed. T. Gehrels*. —1974.—P. 135—174.

TASKS OF THE SPECTROPOLARIMETRIC EXPERIMENT ABOARD THE INTERNATIONAL SPACE STATION

O. V. Morozhenko and A. P. Vid'machenko

We list the main scientific tasks which can be solved aboard the ISS on the basis of UV-polarimetric observations. The tasks are the following: 1) the determination of spectral values of the complex refractive index of cloud particles; 2) the investigation of the nature of photometric details of discs of planets with thick atmospheres; 3) the monitoring of the long-period changes of optical properties of planetary atmospheres and the elucidation of the possible mechanism of the occurrence of the changes; 4) solving the problem of strong-absorbing Axel particles to which the effects of the UV-absorption in planetary atmospheres are attributed; 5) the investigation of the thickness of hydrogen atmospheres of comets; 6) the elucidation of the causes of variations of the ozone layer thickness and temperature conditions on a global scale; 7) the improvement of the spectral values of the imaginary part of the refractive index of the martian aerosol and its optical thickness, as well as the effective radius of particles.

А. П. Видъмаченко, Ю. С. Иванов,
А. В. Мороженко, М. Г. Сосонкин

Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ

Ультрафиолетовий спектрометр-поляриметр для планетного мониторинга на борту МКС

Формулюються основні вимоги до оптичної схеми спектрометра-поляриметра для планетних досліджень, призначеного для оснащення телескопа, розгортання якого ІКД РАН планує на борту Міжнародної космічної станції. Виходячи з поставлених завдань, розглянуті варіанти технічних рішень визначальних вузлів спектрометра-поляриметра. Запропоновано схему наведення телескопа на об'єкт і утримання об'єкта на діафрагмі кожного з приладів, що входять у комплект наукової апаратури телескопа.

Вынесение астрономических наблюдений за атмосферу имеет своей целью повышение их эффективности за счет расширения доступного спектрально-диапазона, увеличения пространственного разрешения, достижения большей регулярности и продолжительности рядов наблюдений.

Получение для планетных атмосфер и для безатмосферных тел Солнечной системы экспериментальных данных о спектральных зависимостях степени поляризации, отражательной способности и их временных изменениях в УФ-лучах с помощью внеатмосферных телескопов позволит определить спектральные значения комплексного показателя преломления аэрозольных частиц, параметров функций распределения их по размерам и относительного (по отношению к газовой составляющей атмосферы) содержания аэрозоля, а также изучить механизмы, которые обеспечивает корреляцию изменений оптических и тепловых свойств планет с солнечной активностью.

В рамках совместного российско-украинского эксперимента в Главной астрономической обсерватории НАН Украины совместно с Институтом космических исследований РАН разрабатывается спектрометр-поляриметр на спектральный диапазон 240—400 нм. Прибор предназначается для оснащения телескопа, развертывание которого ИКИ РАН планирует на борту Международной космической станции. Основной задачей этих проектов

будет изучение тел Солнечной системы.

Основные сложности на пути создания прибора — это необходимость регистрации малых значений поляризации приходящего излучения, а значит — требование высокой точности определения потоков в большом динамическом диапазоне (до 10^4) интенсивности в спектрах излучения исследуемых объектов. Эти проблемы выдвигают достаточно жесткие требования к приемникам излучения и анализирующими элементам оптической схемы. В ГАО НАНУ наработан значительный опыт расчета, изготовления и эксплуатации высокоточных анализаторов поляризации, что будет способствовать реализации проекта.

К настоящему времени разработаны и рассчитаны варианты оптических схем прибора, удовлетворяющие требованиям космического эксперимента.

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЕ СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРА

Основными особенностями поляризационных наблюдений являются требования высокого отношения сигнала к шуму и минимальных потерь света в приборе.

Измерения поляризации обычно проводятся или на многоканальных фильтровых поляриметрах, или на спектрополяриметрах на базе обычных спектро-

графов. Каждый из этих типов поляриметров имеет недостатки, снижающие его эффективность и существенно увеличивающие время измерения. Предлагаемый поляриметр свободен от недостатков обоих этих типов приборов. Основной особенностью этого инструмента является минимум оптических элементов, что резко снижает уровень энергетических потерь. Прибор позволяет одновременно измерять круговую и линейную поляризацию и яркость объекта в широком спектральном диапазоне.

При разработке прибора учитывались следующие требования к составу и компоновке поляризационного блока для установки его в инструментальном отсеке планетного телескопа (ПТ) МКС:

1. Спектрополяриметр должен быть автономным прибором с собственным панорамным светоприемником.

2. Материалы, работающие в заданном спектральном диапазоне, имеют пониженное пропускание в области до 230 нм. Поэтому для достижения высокой эффективности необходимо минимизировать как количество элементов, так и их толщины.

3. Для наблюдений протяженных объектов (планет) спектральный блок прибора должен содержать щель. Минимизация количества оптических элементов приводит к децентрировкам схемы; при этом преобладающие aberrации в изображении — астигматизм и кома — расширяют функцию рассеяния точки (ФРТ) до 40...50 мкм. Эти aberrации должны быть скорректированы (ФРТ не должна быть шире пикселя приемника).

4. Фазовая пластина в сходящихся пучках вносит все виды aberrаций. Эти aberrации также должны быть исправлены.

Из отмеченного ясно, что каждый оптический элемент поляриметра должен выполнять максимальное количество силовых, поляриметрических и коррекционных функций одновременно. Поскольку

число свободных коррекционных параметров невелико, их количество необходимо увеличивать не за счет наращивания числа элементов, а искусственно, путем введения наклонов и децентрировок [3].

Предлагается также использование суперахроматического фазосдвигателя В. Кучерова [2]. Это повысит эффективность поляризационного анализа во всей рабочей спектральной области прибора и исключит необходимость смены модуляторов для разных участков спектра и разных типов поляризации, как это делается в спектрополяриметре космического телескопа им. Хаббла (HST).

УСТАНОВКА ПРИБОРА НА ПТ МКС

Предварительные расчеты показали, что схема прибора определяется расположением анализирующего элемента, т. е. от схемы наведения и гидирования всего телескопа. На момент начала разработки эта схема не была определена. Были лишь сформулированы общие требования к расположению приборов (всего их четыре, включая спектрополяриметр). Поскольку эти приборы должны работать в различных диапазонах спектра, то входные блоки у них должны быть также различными, специфическими для каждого образца. Была предварительно проработана схема с общим входным отверстием и сложной механикой поочередного подключения каждого прибора. Однако вопросы наведения и гидирования решены не были.

Нами была предложена альтернативная схема наведения и гидирования (в том числе и оффсетного), которая позволяет оперативно переключать приборы без использования механических узлов (рис. 1).

В этой схеме основной пучок от объекта попадает в главную фокальную плоскость и далее — на один из приборов. Часть этого пучка (либо от вспомогательного наклонного зеркала, либо от прозрачных клиньев, установленных на срезе бленды) отклоняется и фокусируется на вспомогательной фокальной плоскости, расположенной вблизи задней крышки оправы главного зеркала (ГЗ). В этой плоскости установлены матрицы наведения. Расположив матрицы соответственно расположению входных отверстий, получим схему, в которой на каждый прибор можно устанавливать свое, специфическое, входное зеркало (блок).

На рис. 2 показаны: слева — вид на заднюю крышку оправы ГЗ со стороны ГЗ, справа — соответствующий разрез.

Расстояние D между осями входных отверстий (и между центрами соответствующих матриц) может

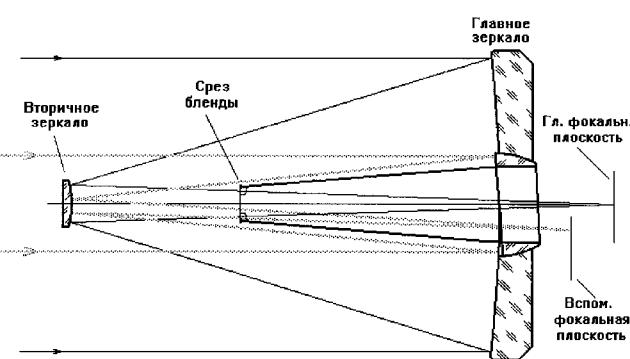


Рис. 1. Схема наведения и гидирования ПТ МКС с использованием части основного пучка

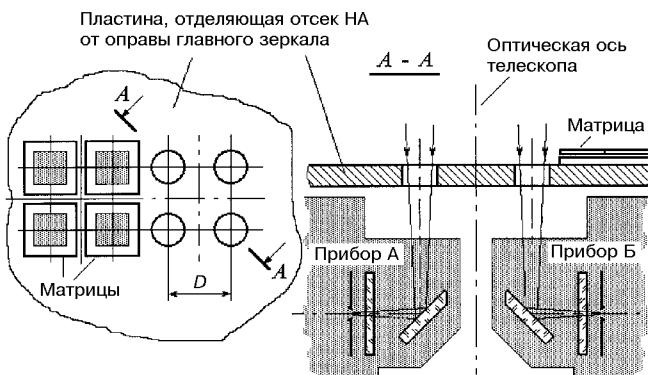


Рис. 2. Расположение матриц гидрования и входных отверстий ПТ МКС

составлять 30...35 мм, что соответствует максимальному отклонению от оси телескопа 10...11'.

Как показывают расчеты, такое отклонение от оптической оси не приводит к заметному ухудшению качества изображений. Даже для стандартной, некорректированной системы Ричи—Кретьена средний квадратичный радиус кружка рассеяния не превысит 3 мкм, т. е. меньше 0.1''. Незначительная коррекция зеркал уменьшит эту величину еще в несколько раз.

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИБОРА

Аналитатор. Наиболее удобным и универсальным способом анализа поляризации излучения является преобразование степени поляризации вращающейся фазовой пластинкой в интенсивности лучей с ортогональной поляризацией. Величина и фаза изменений интенсивности несет информацию о компонентах вектора Стокса. Известно, что эффективность этого преобразования

$$E_n = \cos^2(d - d_0), \quad (1)$$

где E_n — коэффициент преобразования, d — фазовый сдвиг, вносимый фазовой пластинкой, d_0 — номинальный фазовый сдвиг, соответствующий $E_n = E_{n\max}$.

Например, эффективность будет максимально возможной ($E_{n\max} = 1$) для лучей линейной поляризации при $d_0 = \pi/2$, а для лучей круговой поляризации — при $d_0 = \pi/4$. Для прибора, предназначенного для анализа излучения произвольной поляризации, необходим компромиссный вариант: $d_0 = 127^\circ$ с допустимым отклонением $\pm 5^\circ$ и $E_{n\max} = 0.71$, или раздельное использование полуволново-

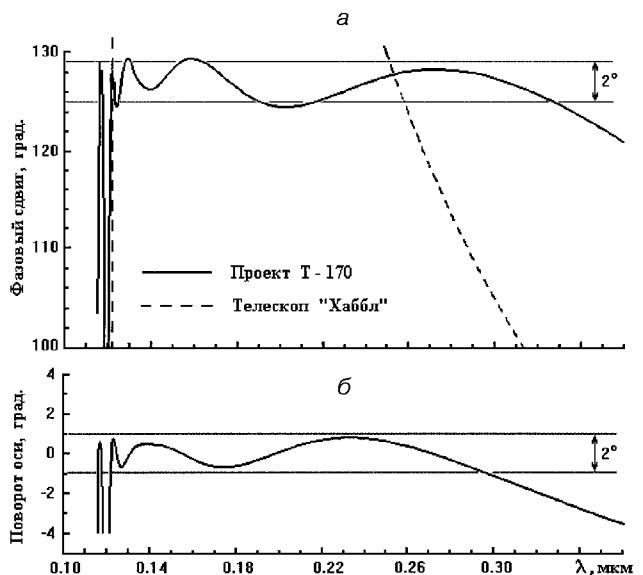


Рис. 3. Характеристики фазовых кристаллических суперхроматических пластины конструкции В. Кучерова

вой или четвертьволновой фазовой пластинки, которые обеспечивают более высокую эффективность ($E_n > 0.9$). Очевидно, высокоэффективный прибор должен иметь пластинку с малым значением $d - d_0$ во всем рабочем спектральном диапазоне.

Такие фазовые пластины были разработаны В. Кучеровым [2]. В своих пионерских работах В. Кучеров описал методику расчета и обосновал технологию изготовления суперхроматических термокомпенсированных фазовых пластины, обеспечивающих постоянство фазового сдвига с отклонением менее 3° в широком спектральном диапазоне.

Предлагаемый ахроматический элемент представляет собой многокомпонентную фазосдвигающую систему с определенными толщинами и ориентациями оптических осей кристаллических слоев. Конструктивные параметры такой системы выбираются из условий самокомпенсации, а именно: при отклонении фазовых сдвигов отдельных компонентов от заданного, например вследствие изменения длины волны излучения, фазовый сдвиг системы и ориентация ее эквивалентной оптической оси не должны изменяться.

Пример расчета такой АФП показан на рис. 3. Здесь же для сравнения пунктирной линией обозначена часть спектральной зависимости фазового сдвига для одной из пластин поляризатора в спектрографе космического телескопа HST (левая ветвь этой зависимости соответствует области аномальной дисперсии фтористого магния).

Такой элемент по эффективности преобразования многократно превосходит фазовую пластину FOS телескопа HST. Отметим, что аномальная дисперсия фтористого магния на длинах волн $\lambda < 130$ нм расширяет диапазон ахроматизации и приводит к появлению небольшой дополнительной рабочей зоны на длинах волн 116–118 нм, где кристалл превращается из положительного в отрицательный. Система легко пересчитывается на другие длины волн, и в требуемом диапазоне 200–400 нм отклонения фазового сдвига не превышают 2° , а отклонения ориентации оптической оси — 0.75° . Если принять приемлемыми допуски в два раза больше, то система будет успешно оптимизироваться в диапазоне 122–500 нм.

Поляризатор. В требуемом спектральном диапазоне поляризатор может быть только призменным. Из всего многообразия поляризационных призм по ряду причин могут быть использованы только призмы Волластона и Глана.

Поляриметр с призмой Волластона. Призма Волластона может быть установлена до входной щели или после нее. Она обладает собственной дисперсией и будет строить на щели (или прямо на приемнике, если она установлена после щели) два ортогонально поляризованных спектра, причем во втором варианте установки геометрические параметры расположения спектров в плоскости приемника, характер и масштаб дисперсии и величина aberrационных искажений могут регулироваться выбором конструктивных параметров призмы [1, 3]. Этот вариант имеет следующие преимущества:

- элементы имеют предельно малые толщины, и следовательно, малые энергетические потери;
- одновременно используются спектры в обычных и необыкновенных лучах, что не только способствует уменьшению погрешностей, но и позволяет ввести в процесс измерений самокалибровку прибора;
- призма имеет малые углы, что технологически облегчает деформацию ее поверхностей и позволяет упростить оптическую схему [1].

Поляриметр с призмой Глана. Призма Глана, в отличие от призмы Волластона, не диспергирует пучок, но, обладая намного большей толщиной по оси, вносит столь большие aberrации, что необходимо использование корректора-компенсатора (рис. 4).

Большая толщина и усложненная схема приводят к потерям энергии. Поэтому использование призмы Глана оправдано лишь в панорамных поляриметрах, в которых спектральную информацию получают путем смены фильтров, что приводит к необходимости использования сложных механических уз-

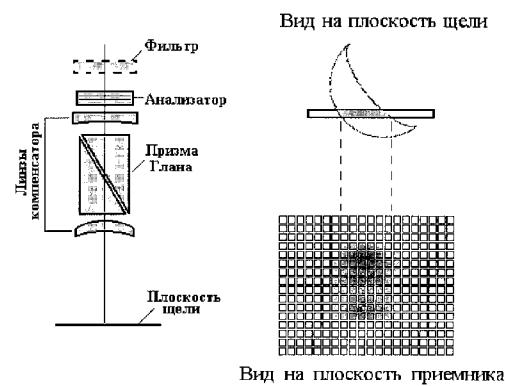


Рис. 4. Формирование спектра в поляриметре с призмой Глана

лов. Хотя потенциально такой прибор при ограниченном разрешении по спектру способен выдавать большие объемы информации (за счет панорамности), но с учетом усложнения оптики и механики, а также пониженной энергетической эффективности в бортовых приборах, работающих в УФ-диапазоне, использование таких схем нецелесообразно.

Приемник. В УФ-диапазоне могут работать следующие типы панорамных приемников: ПЗС-структуры, КМОП-структуры и многоанодные ФЭУ. Каждый из этих типов имеет свои преимущества и недостатки, и выбор типа приемника должен быть обоснован комплексным анализом их параметров.

Динамический диапазон. Характерной особенностью УФ-излучения несамосветящихся тел Солнечной системы является большой динамический диапазон, доходящий до 10^4 (рис. 5).

С учетом того, что для достижения необходимой точности измерений нужен еще по крайней мере такой же запас, ясно, что необходима установка фильтра, плавно гасящего избыток длинноволнового излучения. Однако даже после такой фильтрации динамический диапазон останется критически большим, и этот параметр будет во многом определять выбор конкретного приемника.

Квантовая эффективность и спектральная чувствительность. По этим параметрам выделяются два типа приемников: ПЗС-матрицы с обратной подсветкой и многоанодные ФЭУ (см. рис. 6, 7). Эти же типы приемников имеют динамический диапазон более 10^4 .

Хотя квантовая эффективность у ПЗС-матриц выше, но они обладают шумами переноса, а для ФЭУ характерно большое внутреннее усиление при практическом отсутствии шумов, так что эти типы приемников приблизительно равнозначны по соот-

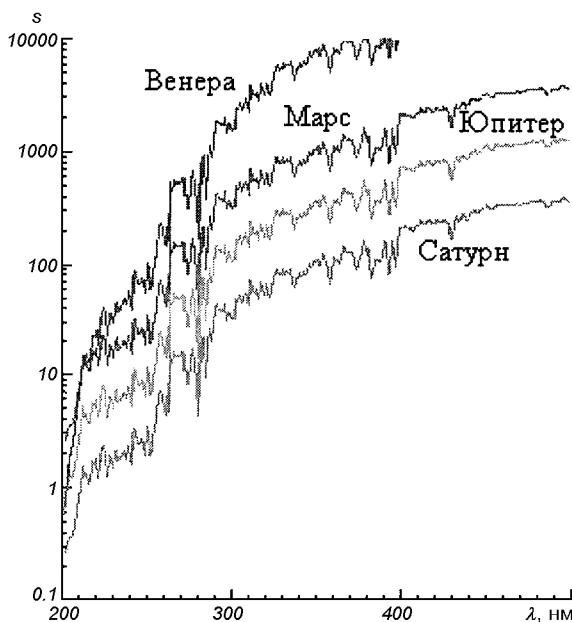


Рис. 5. Спектральная плотность s излучения планет на элемент разрешения в УФ-диапазоне

ношению сигнал/шум, и дальнейший выбор должен производиться по эксплуатационным характеристикам, подтвержденным результатами испытаний (термическим, механическим, радиационным и пр.), а также исходя из гарантированного ресурса.

Диспергирующий блок. В качестве диспергирующего элемента может быть использована либо дифрешетка, либо призма. Однако по энергетической эффективности решетки, даже голограммические, хуже призм (особенно на краях диапазона), и, что более существенно — разность их коэффициентов отражения в О- и Е-лучах велика (доходит до 50 %), неравномерна по спектру и нестабильна во времени. Даже частые калибровки, занимающие заметную часть наблюдательного времени, не смогут полностью компенсировать возникающие погрешности. Для призм эта разность также характерна, но она меньше, ее ход монотонен по спектру и стабилен во времени. Следовательно, с учетом невысокого требуемого разрешения по спектру в качестве диспергирующего элемента наиболее целесообразно использование призм.

Для призм характерна существенно неоднородная дисперсия по спектру — коротковолновый участок спектра, в котором и без того содержится мало энергии, будет растянут в несколько раз сильнее длинноволнового, что усугубляет проблему динамического диапазона приемника. Однако при невысоком разрешении по спектру, и следовательно, небольших углах призмы, возможна компенсация

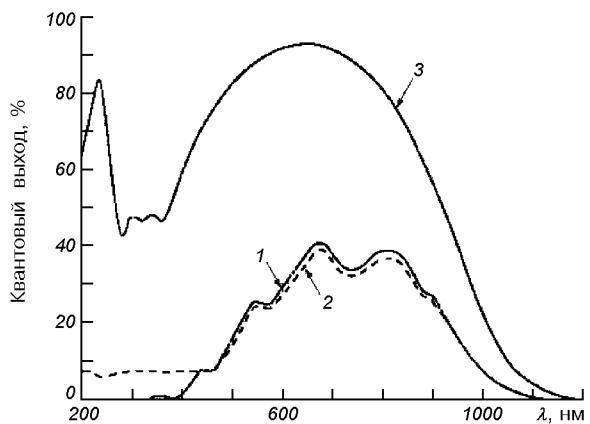


Рис. 6. Спектральные характеристики ПЗС-матриц

$\lg \alpha (\alpha, \text{ мкА/нВт})$

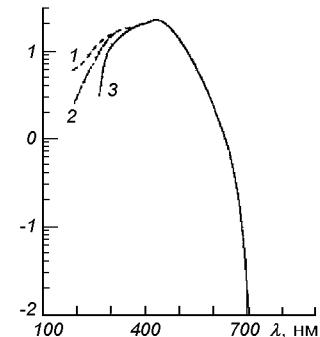


Рис. 7. Спектральные характеристики мультианодных ФЭУ

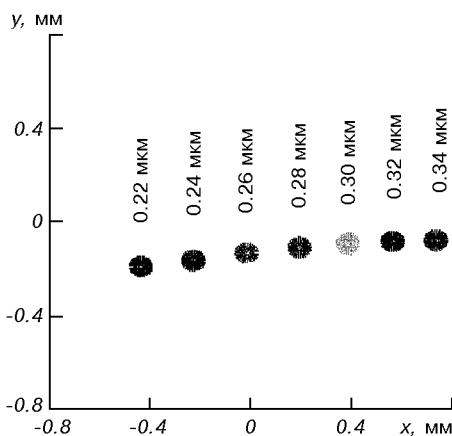


Рис. 8. Точечная в плоскости изображения диаграмма системы с композитной призмой MgF_2 — КУ1 для длин волн от 0.22 до 0.34 мкм

этой неравномерности подклейкой компенсирующего клина из материала с другой дисперсией [1]. Пример такого решения для УФ-диапазона (MgF_2 — кварцевое стекло КУ1) приведен на рис. 8.

Такой прием позволяет управлять дисперсией системы произвольным образом. Например, для

снижения нагрузки на динамический диапазон приемника можно растянуть «красный» участок спектра и сжать «синий», и с учетом спектральных характеристик приемника и фильтра осуществить дополнительное выравнивание спектральной чувствительности системы в целом.

Расчеты показывают, что предлагаемая схема обеспечивает высокое качество изображения. Почти для всего спектрального диапазона размеры пятен не превышают размеров пикселов матрицы (25×25 мкм). Спектральное разрешение может быть от нескольких единиц до сотен.

Ряд новых технических решений позволит преодолеть ограничения предыдущих космических инструментов для измерений поляризации в ультрафиолете, что делает этот прибор конкурентоспособным на годы вперед.

1. Гершберг Р. Е., Ефимов Ю. С., Иванов Ю. С. Высокоэффектививый УФ-спектрополяриметр // Ультрафиолетовая Вселенная. — М.: ГЕОС, 2001.—С. 47—55.

2. Кучеров В. А. Ахроматический фазосдвигатель для вакуумного ультрафиолета // Кинематика и физика небес. тел.—1996.—12, № 1.—С. 52—58.
3. Kucherov V. A., Ivanov Yu. S., Efimov Yu. S., et al. Ultraviolet low-resolution spectropolarimeter for the space mission Spectrum-UV // Space Science and Technology. Suppl.—1997.—3, N 5/6.—P. 3—27.

UV SPECTROMETER-POLARIMETER FOR PLANETARY MONITORING ABOARD THE ISS

A. P. Vid'machenko, Y. S. Ivanov, A. V. Morozhenko,
and M. G. Sosonkin

The basic requirement for the optical circuit of spectrometer-polarimeter for investigation of planets are stated. The spectrometer-polarimeter is intended for the equipment of the telescope which is planned to be placed aboard the International Space Station by the ISR of RAS. Based upon the formulated tasks, we discuss the variants for the technical decisions of the spectrometer-polarimeter determining units. We propose the circuit for setting the telescope on an object and following the object with the aperture of each devices included in the complete set of the telescope scientific equipment.

С. И. Гопасюк, О. С. Гопасюк

Науково-дослідний інститут «Кримська астрофізична обсерваторія», п. Науковий, Україна

Спектрополяриметр проекта СОТ

Дається опис оптических систем телескопа і спектрополяриметра експерименту СОТ. Експеримент СОТ дозволить проводити спостереження магнітних полів та стану плазми в УФ-лініях ($\lambda = 90—240$ нм) в різних утвореннях на Сонці з просторовим розділенням 0.1—0.2".

ВВЕДЕНИЕ

В современной физике Солнца можно выделить два приоритетных направления. Первое — исследование глобальных характеристик Солнца — проводится методами гелиосейсмологии и основывается на наблюдениях с низким пространственным разрешением (несколько секунд дуги и больше). Второе — это исследование тонкой структуры магнитных полей, движения и свечения плазмы различных образований в атмосфере Солнца. Исследования тонкой структуры требуют наблюдений с высоким пространственным разрешением (по крайней мере 0.1—0.2").

Наземные наблюдения далеко не полностью позволяют реализовать истинные возможности больших телескопов (0.1"), ибо предел разрешению, в лучшем случае 1", ставит атмосфера Земли.

Измерения даже с невысоким пространственным разрешением показывают быстрые изменения магнитных полей и электрических токов. Магнитный поток активной области (АО) за 1 час может измениться на 20 %. Средняя скорость изменения магнитного потока активной области составляет примерно 10^{10} Вб/с [2, 4, 13, 14]. Изменяются и электрические токи. Средняя скорость изменения электрических токов по АО достигает $8 \cdot 10^7$ А/с [10]. Быстрые изменения магнитных полей и электрических токов не совместимы ни с полученными из наблюдений поперечными размерами магнитных структур, ни с классическим значением электропроводности.

Источником энергии нестационарных процессов (вспышек и др. образований) является магнитная энергия электрических токов. Получение информации о магнитных полях в верхних слоях хромосфера и короне основывается пока что главным образом на экстраполяции фотосферных данных в потенциальной или бессиловой моделях, предполага-

ющих, что напряженность поля наибольшая в фотосфере, а с высотой уменьшается. Тем самым ставятся жесткие ограничения на величину и структуру электрических токов, текущих на этих же высотах.

Огромная величина накопленной энергии в виде энергии магнитного поля токов выделяется в последующем за короткое время, создавая нестационарные явления (вспышки и др.). Одно из довольно распространенных в настоящее время мнений, основанное на сравнении УФ- и рентгеновских изображений со структурой фотосферного магнитного поля, предполагает, что основная часть выделения энергии происходит в нижней короне и верхней хромосфере в процессе пересоединения силовых линий магнитного поля со встречным направлением [8]. Наряду с этим имеются данные, показывающие, что нагрев корональных петель и ускорение частиц происходит и в тех случаях, когда процесс пересоединения силовых линий невозможен [12].

Высокая плотность плазмы во вспышечных корональных петлях $10^{16}—10^{17}$ м⁻³ ограничивает возможности ускорения частиц. Совершенно не ясно, происходит ли реализация магнитной энергии по всему сечению магнитной петли, или же она сосредоточена в отдельных тонкоструктурных каналах. При механизме пересоединения силовых линий нагрев плазмы и ускорение частиц следует ожидать на периферии магнитных петель. В то же время, как показывают наблюдения, наиболее сильный нагрев плазмы и наибольшее число ускоренных электронов приходится на внутреннюю часть корональных петель [9, 15]. Недостаточные знания тонкой структуры магнитного поля, движения и свечения плазмы и генерации электрических токов в верхних слоях Солнца не позволяют изучать реальные условия, в которых происходят нестационарные процессы, и причины, приводящие к этим нестационарным процессам.

ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для понимания физической сути многих нестационарных явлений и солнечной активности в целом необходимы наблюдения с высоким пространственным разрешением (не хуже $0.2''$) магнитного поля, движений и свечения плазмы в различных образованиях солнечной атмосферы. В переходной области хромосфера—корона и в нижней короне образуются наиболее интенсивные спектральные линии. Они находятся в УФ-области спектра. Верхние слои атмосферы Солнца подвержены сильному воздействию процессов, связанных с ускорением частиц и нагревом плазмы во время вспышечных явлений.

Установление путем наблюдений истинных структур магнитного поля и плазмы в верхних слоях Солнца возможно только по наблюдениям из космоса, так как земная атмосфера ограничивает пространственное разрешение больших телескопов и не пропускает УФ-излучение. Наблюдения с пространственным разрешением 0.1 — $0.2''$ важны не только для понимания нестационарных процессов на Солнце, но и на тех звездах, где наблюдаются вспышки типа солнечных.

Все многообразие воздействия Солнца на Землю и околоземное пространство связано с нестационарными процессами, источником энергии которых является энергия магнитного поля токов, протекающих в атмосфере Солнца. Поэтому изучение структуры и динамики магнитного поля и электрических токов, а также физических процессов в нестационарных явлениях имеет не только научное, но и большое прикладное значение.

ТЕЛЕСКОП

Для продвижения в понимании сути нестационарных явлений и солнечной активности в целом был предложен проект СОТ (солнечно-ориентированный телескоп) для наблюдений в УФ-линиях магнитного поля, движений и свечения плазмы в различных образованиях на Солнце с пространственным разрешением 0.1 — $0.2''$ [11].

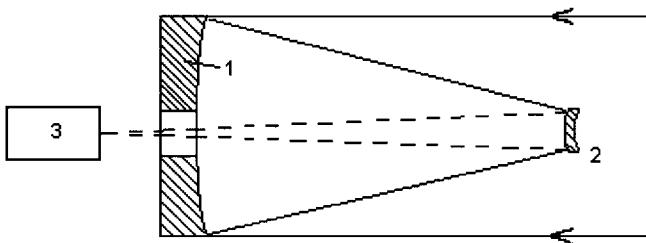


Рис. 1. Оптическая схема телескопа (система Кассегrena) 1 — главное зеркало; 2 — вторичное зеркало; 3 — спектрополяриметр

СОТ включает УФ-телескоп [3], спектрополяриметр, систему для обзора поверхности Солнца и гидирующую систему, систему сбора, предварительной обработки и хранения данных, систему передачи информации.

Чтобы иметь пространственное разрешение $0.2''$ в длинах волн $\lambda \approx 240$ нм диаметр объектива телескопа должен быть около 0.3 м. Телескоп предназначен в значительной степени для поляризационных наблюдений. При углах падения света на зеркало, отличных от нуля, коэффициенты отражения лучей, поляризованных в плоскости падения и в плоскости, перпендикулярной к ней, не одинаковы. В результате отражения отношение интенсивностей компонентов и степень поляризации изменяется. Вследствие косого падения лучей возможен переход круговой поляризации в линейную и наоборот [7]. Требование минимума инструментальной поляризации при отражении, а также минимума потери света и габаритов инструмента позволяют выбрать оптическую систему телескопа. Она должна быть системой Кассегrena. В ней вторичное выпуклое зеркало располагается перед главным, что приводит к центральному экранированию главного зеркала. Центральное экранирование не должно превышать 0.10 доли площади объектива [5]. Центральное экранирование в указанных пределах не уменьшает разрешающую силу телескопа, а даже несколько повышает ее, сужая поперечник центрального ядра дифракционной картины. Но при этом снижается контраст изображения протяженного объекта, так как увеличивается яркость колец, сопровождающих каждую точку изображения [6].

Телескоп двухзеркальный (рис. 1). Зеркала имеют специальное покрытие, обеспечивающее отражение значительной части падающего на них потока УФ-излучения. Главное вогнутое параболическое зеркало имеет центральное отверстие, через которое проходит отраженный от вторичного выпуклого зеркала свет. Вторичное зеркало располагается перед фокусом главного зеркала. Фокальная плоскость телескопа находится с тыльной стороны главного зеркала и совпадает с входной щелью спектрополяриметра. Эквивалентное фокусное расстояние телескопа составляет 11 м и обеспечивает пространственное разрешение $0.2''$ на щели спектрополяриметра при размере 10 мкм отдельного элемента ПЗС-приемников.

СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТР

Двухкамерный спектрополяриметр, оптическая схема которого показана на рис. 2, позволит проводить поляризационные и спектральные наблюдения. Спектрополяриметр включает в себя модуля-

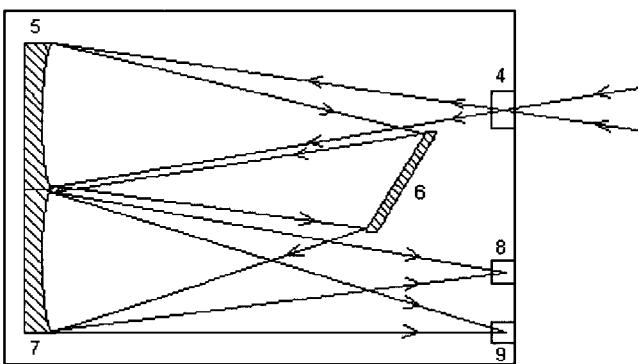


Рис. 2. Спектрополяриметр: 4 — модулятор; 5 — коллиматорное зеркало; 6 — дифракционная решетка; 7 — камерное зеркало; 8, 9 — приемники

тор (или поляриметр), который располагается непосредственно за его входной щелью, коллиматорное и камерное зеркала, плоскую дифракционную решетку (2400 штрихов/мм) и приемники на ПЗС-матрицах. Модулятор (поляриметр) съемный, он применяется при измерении магнитных полей. Фокусные расстояния коллиматорного и камерного зеркал — около 1.2 м.

Диаметр светового пучка на коллиматорном зеркале и дифракционной решете составит примерно 31 мм. Разрешающая сила спектрополяриметра при $\lambda \approx 150$ нм будет $1.5 \cdot 10^5$. При наблюдениях во втором порядке спектра спектральное разрешение прибора $\Delta\lambda \approx 1$ пм, линейная дисперсия — около 7 мм/нм.

Точность измерения магнитного поля зависит от нескольких факторов: от чувствительности и разрешающей способности ПЗС-приемника, от крутизны спектральной линии, от глубины модуляции светового пучка модулятором, времени накопления и от чувствительности линии к магнитному расщеплению. Однако при регистрации 0.1 % светового потока, падающего на приемник, точность измерения магнитного поля по линии С IV $\lambda 154.8$ нм (средневзвешенное по σ -компонентам значение фактора Ланде $g = 1.17$) составит 20—25 мТл.

Для исключения эффектов нагрева на качество изображений зеркала телескопа и спектрополяриметра должны быть изготовлены из ситалла, коэффициент линейного расширения которого меньше 10^{-7} 1/К в довольно широком диапазоне температур [1].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наблюдения с пространственным разрешением 0.1—0.2" магнитного поля и плазмы в линиях УФ-спектра дадут весомый вклад в развитие современной астрофизики.

Они позволят существенно продвинуть решение ряда основных проблем физики Солнца: генерации магнитного поля, его выхода на поверхность, генерации электрических токов в верхних слоях атмосферы, нестационарных процессов, сопровождающихся огромным энерговыделением, ускорения частиц до высоких энергий, солнечного ветра, формирование которого связано с процессами ускорения плазмы в магнитных полях, солнечно-земных связей и др.

1. Бужинский И. М., Даниленко В. А., Степанов С. Е. // Новая техника в астрономии.—1970.—Вып. 3.—С. 202—206.
2. Гопасюк С. И. Временные изменения магнитного поля в активных областях на Солнце // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1967.—36.—С. 56—68.
3. Гопасюк С. И., Гопасюк О. С., Яцкiv Я. С. УФ-телескоп проекта СОТ. Сборник тезисов Первой украинской конференции по перспективным космическим исследованиям, Киев (Украина), 2001, с. 30.
4. Зверева А. М. Северный А. Б. Магнитные поля и протонные вспышки 6 июля и 2 сентября 1966 года // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1970.—41—42.—С. 97—157.
5. Максутов Д. Д. Изготовление и исследование астрономической оптики, М.: Гостехиздат, 1948.
6. Михельсон Н. Н. Оптические телескопы. Теория и конструкция, М.: Наука, 1976.
7. Северный А. Б. Некоторые инструментальные вопросы измерения магнитных полей Солнца и звезд // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1977.—56.—С. 142—148.
8. Сомов Б. В. Проблемы физики солнечных вспышек. М.: 1983, № 1, С. 5—51.
9. Dennis B. R. Solar flare hard X-ray observations // Solar Phys.—1988.—118, № 1/2.—P. 49—94.
10. Gopasyuk S. I. The magnetic field structure in active regions on the Sun. 18th Symp on the physics of ionized gases Yugoslavia (Eds B. Vujićic, S. Djurović, J. Puric), 1997.—P. 457—466.
11. Gopasyuk S. I. SOT Experiment SOLAR-ORIENTED TELESCOPE // Space Science and Technology.—2000.—6, № 4.—P. 87.
12. Howard R., Svestka Z. Development of a complex of activity in the solar corona // Solar Phys.—1977.—54, № 1.—P. 65—105.
13. Mayfield E. B. Chapman G. A. Magnetic flux changes associated with the solar flares of August 1972 // Solar Phys.—1981.—70, № 2.—P. 351—362.
14. Simon G. W., Wilson P. R. Flux changes in small magnetic regions. II. Astrophys. J.—1985.—295, № 1, pt. 1.—P. 241—257.
15. Tanaka K. Impact X-ray observations from the Hinotori satellite on solar flare research // Publ. of the astron. soc. of Japan.—1987.—39, № 1.—P. 1—45.

THE SPECTROPOLARIMETER OF THE SOT PROJECT

S. I. Gopasyuk and O. S. Gopasyuk

We describe the optical systems of the telescope and spectropolarimeter for the SOT experiment. The SOT experiment will allow one to carry out observations of magnetic fields and the plasma state in UV lines ($\lambda = 90$ —240 nm) for various solar formations with a spatial resolution of 0.1—0.2".

Є. Л. Кордюм

Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного НАН України

Перспективи розвитку космічної та гравітаційної біології в Україні

Висвітлюються надбання українських вчених в галузі космічної та гравітаційної біології. Розглядається концепція та основні напрямки досліджень в наступні 2003—2007 роки.

Дослідження з космічної біології та медицини проводжують займати перше місце в космічних програмах різних країн світу через свою спрямованість на одержання принципово нових наукових знань відносно впливу факторів космічного польоту на живі істоти різного рівня їхньої організації. Такі знання вкрай необхідні для рішення прикладних завдань медичного забезпечення пілотуваних космічних польотів, створення контролюваних екологічних систем життєзабезпечення космонавтів та прогнозування їхньої надійності в тривалих космічних польотах, при відвіданні Місяця та Марса. Космонавтика також відкрила неочікувані можливості використання унікальних умов космічного польоту для рішення фундаментальних проблем біології, зокрема для з'ясування ролі сили тяжіння у функціонуванні біосфери Землі. Оскільки на Землі послабити силу тяжіння на тривалий час неможливо, вивчення її біологічної ролі та становлення «гравітаційної біології» розпочалися лише в космічну еру. Космічні кораблі стали експериментальними лабораторіями, де завдяки застосуванню бортової центрифуги можливо створити різні величини сили тяжіння та, нижче за 1g.

В Україні космічні експерименти з бактеріями, водоростями, вищими рослинами, культурами органів та тканин, запропоновані і підготовлені в наукових установах Національної академії наук України, почалися у 1974 р. та здійснювалися на біосупутниках серії «Космос», космічних кораблях та орбітальних станціях «Салют» та «Мир» (спільно з Інститутом медико-біологічних проблем та НПО «Енергія»). Хронологію польотних експериментів та їхні результати висвітлено в роботах [1, 5]. У 1997 р. на борту космічного корабля «Колумбія» з участю українського космонавта Л. К. Каденюка був проведений спільний українсько-американський експеримент з метою вивчення впливу мікрогравітації

на ріст та розвиток вищих рослин [2, 3]. З 1993 р. дослідження в галузі космічної біології та медицини, в яких беруть участь 27 установ Національної академії наук України, Академії медичних наук України та університети, ведуться за Національною космічною програмою України і фінансуються Національним космічним агентством України.

Найважливішими здобутками українських вчених є відкриття гравічувливості рослинної клітини та встановлення загальних закономірностей впливу мікрогравітації на живі істоти на клітинному та молекулярному рівнях [1—5]. На основі аналізу даних космічних та наземних (кліностатування та гравістимуляція) експериментів отримано ряд важливих результатів. 1. Виявлено наявність ендогенних факторів морфогенезу мохів, роль яких маскується гравітацією та світлом. 2. Встановлено, що плагіотропний ріст рослинних клітин з верхівковим ростом в гравітаційному полі забезпечується формуванням апікально-базального градієнта іонів кальцію та актинового цитоскелета. 3. Запропоновано нову модель сприйняття гравітаційного стимулу статоцитами (гравірецепторні клітини) кореневого чохлика, згідно з якою ядро статоцита є посередником в передачі сигналу від сенсорів гравітації — аміlopластів, що виконують статолітну функцію, до зони розтягу, де відбувається заключна фаза гравітропічної реакції, тобто згин органу — кореня або стебла.

Сьогодні Україна є одним із світових центрів комплексних досліджень в галузі клітинної біології. Прийняття України в квітні 2000 р. до Міжнародної робочої групи з космічної біології та медицини (International Space Life Sciences Working Group) є належною оцінкою її внеску в світову науку та визнанням її як гідного партнера у розвитку космічної біології та медицини в ХХІ столітті. Програма з космічної біології та медицини, яка планується



Основні напрямки досліджень гравічувствливості організмів

на 2003—2007 роки, спрямована на експериментальну перевірку висунутих українськими вченими оригінальних концепцій та гіпотез в цих галузях з урахуванням сучасних тенденцій світової науки, винайдення нових методологічних підходів до постановки наземних та космічних експериментів та обробки експериментального матеріалу, розв'язання певних прикладних завдань та створення нового покоління космічного обладнання. Визначено такі основні напрямки досліджень: 1) біологія клітини в умовах зміненої гравітації; 2) біологія розвитку та тривалість життя в умовах зміненої гравітації; 3) функціональний стан та динаміка популяцій бактерій, взаємовідношення патогенних організмів та вірусів з рослинами, тваринами та людиною в умовах зміненої гравітації, формування симбіотичних систем тощо; 4) компенсаторні біологічні можливості магнітного поля при відсутності гравітації та їхня природа, використання магнітних полів різної напруги для досліджень механізмів гравітропізму рослин; 5) пре-біотичний синтез; 6) біотехнологія; 7) космічна медицина. Напрямок з біології клітини в умовах мікрагравітації включає широке коло завдань (рисунок), спрямованих на пізнання клітинних та молекулярних механізмів гравічувствливості організмів. Для експериментальної

перевірки гіпотези гравітаційної декомпенсації, що визначає як первинне місце дії мікрагравітації цитоплазматичну мембрну клітини, від стану якої значною мірою залежить нормальнє функціонування організму, плануються дослідження структури, фізико-хімічних та функціональних властивостей біологічних мембрн з використанням модельних систем — ліпосом та препаратів цитоплазматичної мембрни, ендоплазматичного ретикулума, пресинаптичних мембрн тощо. Передбачається вивчення проліферативної активності та регуляції клітинного циклу в умовах зміненої гравітації, оскільки ці процеси лежать в основі росту та розвитку організмів, проте наявні літературні дані дуже обмежені та суперечливі. Особливий інтерес викликає дія гравітації на молекулярну організацію та динаміку перебудов актинових та тубулінових елементів цитоскелету, що виконує функції опорно-рухового апарату клітини, в процесах ділення, росту та диференціювання клітин, безпосередньо або через певні метаболічні шляхи, для з'ясування чого проводитимуться дослідження структури, топографії, динаміки та біохімічного складу цитоскелету в клітинах різного типу в умовах зміненої гравітації. Планується вивчення функціонування сигнальних систем в клітинах, зокрема метаболізму

кальцію як вторинного месенджера. Після завершення проекту «Геном людини» на провідні позиції вийшло вивчення «функціонального геному», чи протеому, що дозволяє пов'язати структуру генів з їхньою функцією, пізнавати механізми регуляції диференціальної експресії білків та їхніх посттрансляційних модифікацій та дослідити взаємодії білків, їхніх окремих структурних та функціональних доменів. Вивчення в цьому напрямку запрограмованої смерті клітин, чи апоптозу, в умовах зміненої гравітації є новим підходом до виявлення гравічувтивих та гравізалежних процесів у клітині. Для пошуку шляхів запобігання порушень хронобіологічного стану космонавтів пропонується дослідити вплив мікログравітації та циклічного освітлення на деякі ритмологічні характеристики організму людини із застосуванням культури лімфоцитів як адекватної клітинної моделі. Дослідження морфологічних та функціональних особливостей нервової, ендокринної та імунної систем на клітинному та молекулярному рівнях в умовах зміненої гравітації спрямовані на виявлення можливих змін у функціонуванні цих систем в таких умовах, що сприятиме розумінню небажаних змін здоров'я космонавтів у тривалих космічних польотах. Плануються комплексні дослідження феномену втрати кісткової маси в умовах гіпокінезії та космічному польоті, що є ситуацією максимального дефіциту механічного навантаження при дії малих доз радіації та адекватною моделлю для з'ясування закономірностей розвитку остеопорозу. В основі виникнення остеопоротичних змін лежать структурні та метаболічні перебудови в клітинах та міжклітинні речовині кісткової тканини, які на даний час вивчені мало. Виявлені зміни ростових та морфогенетичних процесів в кістках в умовах мікログравітації [7] відображають один з механізмів розвитку остеопорозу при зниженні опорного навантаження на скелет. Як відомо, остеопороз — системне захворювання скелета, що призводить до підвищення ризику переломів, сьогодні є одним з основних захворювань, обумовлених малорухливим способом життя (гіпокінезія) і несприятливими екологічними факторами, та розглядається як «хвороба цивілізації».

Одними з основних завдань досліджень з біології розвитку організмів в умовах зміненої гравітації є визначення характеру детермінації процесів онтогенезу рослин в умовах мікログравітації та інтенсивності фотосинтезу — процесу, безпосередньо пов'язаного з продуктивністю рослин; зокрема встановлення зв'язку між інтенсивністю та спектральним складом світла та ефективністю фотосинтетичного перетворення енергії в умовах мікログравітації, що необхідно для створення технологій космічного рослинництва. Дослідження структурно-

функціональної організації генеративних органів вищих рослин на послідовних етапах їхнього формування, зокрема регуляції процесу утворення насіння та плодів в умовах зміненої гравітації, а також органів вегетативного розмноження (цибулини, бульби та туріони), спрямовані на з'ясування можливостей вегетативного та насінневого розмноження рослин, сільськогосподарських та дикорослих; при відсутності сили тяжіння та на розробку рекомендацій для їхнього вирощування в космічних оранжереях. Продовжуватиметься вивчення ростових рухів та морфогенезу мохів в умовах зміненої гравітації для розуміння природи взаємоз'язків фото- і гравітропізмів у ростових та формотворчих процесах мохів. Значна увага приділятиметься також дослідженням структури органів та фізіологічно-біохімічних процесів у тварин в умовах гіпер gravітації, зокрема дослідженням співвідношння інтенсивності газообміну, терморегуляції та активності ключових антиоксидантних ферментів, експресії стрес-білків та апоптозу у миші та щурів різного віку під впливом хронічних сеансів гіперgravітації, та пошукам засобів усунення негативних наслідків гіперgravітаційних навантажень за допомогою інгібіторів апоптозу та індукторів шаперонів.

На основі концепції щодо змін імунітету живих істот та агресивності патогенних організмів в умовах мікログравітації [6] досліджуватимуться взаємовідношення рослини-хазяїна з патогенними бактеріями в умовах зміненої гравітації, аналізуватимуться рівень індукції помірного вірусу лізогенної культури ціанобактерій, фізіологічні та молекулярно-біологічні властивості вірусів, індуковані в умовах зміненої гравітації як основи для рекомендації цієї уніфікованої модельної системи для вивчення впливу мікログравітації на індукції ДНК-геномних вірусів. Оскільки важливим для космічного рослинництва є з'ясування особливостей впливу корисних для рослин ендофітних бактерій, в тому числі генетично модифікованих, на розвиток рослин в умовах космічного польоту у порівнянні з наземним контролем, планується вивчення молекулярно-генетичних процесів (утворення транспозонних мутантів, перебудови ДНК, експресія генів, що «мовчат»), які відбудуватимуться у модельних бактерій в умовах зміненої гравітації. Одержані результати створять основу для розробки моделі, за допомогою якої можна буде прогнозувати утворення та поширення модифікованих бактерій в умовах мікログравітації. Передбачається також вивчення особливостей репродукції аденоівірусів в епітеліальних та лімфобластоїдних клітинах різної чутливості в умовах зміненої гравітації. Дослідження впливу факторів космічного польоту на біологічні властивості резидентної мікрофлори людини *in vitro* та *in vivo* мають на меті оцінку здатності бактерій

до реалізації потенційних патогенних властивостей в екстремальних умовах.

У напрямку «Біотехнологія» плануються наступні завдання: 1) удосконалення сорбційних методів детоксикації та корекції гомеостазу організмів космонавтів під час польоту (профілактика, лікування) та після повернення на Землю (лікування, реабілітація); 2) дослідження життєдіяльності та метаболізму олігохет (червоний каліфорнійський черв'як) в умовах зміненої гравітації з метою розробки рекомендацій для його використання у ланці утилізації відходів в екологічних системах життезабезпечення космонавтів; 3) розробка конструктивних підходів для керування фізичними, хімічними та біохімічними характеристиками замінників ґрунту для формування закритих біосистем та їхнього використання для вирощування рослин в космічному польоті; 4) створення технологій «зеленого конвеєра» для пілотованих космічних апаратів, який має бути необхідною ланкою системи життезабезпечення космонавтів, оскільки тривале перебування людини у замкненому просторі є додатковим психологічним навантаженням, усунення якого потребує наявність зеленого куточка із звичними рослинами, які до того ж можна використовувати в їжу як смакові та вітамінні додатки.

Основна увага за напрямком «Космічна медицина» приділятиметься дослідженням ролі ендотеліальної дисфункції у порушенні стану мікроциркуляції крові в умовах космічного польоту та впливу факторів космічного польоту на процеси утворення та руйнування тромбів у крові людини, а також методам оптимізації функціонування імунної та антиоксидантної систем людини в умовах космічного польоту; обґрунтуванню та математичній розробці алгоритму побудови психофізіологічної моделі для оцінки поточнотої працездатності людини та створенню моніторингової системи для реалізації цього алгоритму.

Розділ «Приладобудування» включає розробку та створення нового космічного обладнання для проведення біологічних та біотехнологічних експериментів на борту Міжнародної космічної станції, зокрема: 1) установка «Мікроколонка» для проведення в умовах космічного польоту оцінки сорбційної здатності вуглецевих афінних матеріалів по відношенню до антитіл, інсуліну, вільного гемоглобіну та ліпопротеїдів, при контакті з біологічними рідкими середовищами, такими як сиворотка та плазма крові, кровозамінники та модельні розчини в мікроколоночному проточному експерименті «Біосорбент» з метою створення біоспецифічних вуглецевих сорбентів та їхнього використання в медицині та біотехнології на Землі та в космічному польоті; 2) система «Біолабораторія»

для проведення космічних експериментів з культурами органів, тканин та клітин рослин, тварин та людини, бактеріями, проростками рослин, найпростішими та комахами. Система забезпечує контрольовані температурні умови, створення штучної гравітації за допомогою центрифуги (контроль), спостереження за об'єктами за допомогою мікроскопа та їхня відеозйомку, фіксацію експериментального матеріалу та збереження фіксованих та живих об'єктів у відповідних умовах після закінчення експерименту до повернення їх на Землю та 3) «Оранжерея» для проведення космічних біологічних та біотехнологічних експериментів з нижчими та вищими рослинами в контролюваних умовах та вирощування зеленої маси овочевих культур, які швидко ростуть, для раціону космонавтів. Принципи побудови такої багатоцільової оранжерей змінної геометрії наступні: а) модульність функціональних блоків, б) уніфікація основних елементів та в) можливість оперативного формування різних технологічних конфігурацій. Передбачається проведення фенологічних спостережень та моніторинг основних фізіологічних процесів у рослин під час росту в умовах космічного польоту.

Програма виконуватиметься у співробітництві з Росією, США, Францією, Німеччиною та, можливо, іншими країнами, які входять до Європейського космічного агентства.

1. Кордюм Е. Л. Космічна біологія: сучасний стан в світі та Україні // Космічна наука і технологія.—1997.—3, № 3-4.—С. 5—15.
2. Кордюм Е. Л. Дослідження у космосі — для земних потреб // Вісник НАН України.—2000.—№ 8.—С. 40—43.
3. Кордюм Е. Л. Космічна біологія і медицина в Україні: концепції та експериментальні дані. Космічні дослідження в Україні, 2000—2002, НКАУ, Київ, 2002, С. 55—66.
4. Kordyum E. L. Biology of plant cells in microgravity and under clinostating // International Review of Cytology.—1997.—171.—P. 1—78.
5. Kordyum E. L. Space biology and medicine in Ukraine. Space Research in Ukraine, 1998—2000, NSAU, Kyiv, 2001, P. 42—51.
6. Leach J., Ryba-White M., Sun Q., et al. Plants, plant pathogens, and microgravity — a deadly trio // Gravitational Space Biology Bulletin.—2001.—14, № 2.—P. 15—23.
7. Rodionova N. V., Shevel I. M., Oganov V. S. Bone ultrastructural changes in Bion-11 Rhesus monkeys // Journal of Gravitational Physiology.—2000.—7.—№ 1.—P. 157—159.

PROSPECTS OF THE DEVELOPMENT OF SPACE AND GRAVITATIONAL BIOLOGY IN UKRAINE

E. L. Kordym

The achievements of Ukrainian scientists in the field of space and gravitational biology as well as the concept and main directions of future research in 2003—2007 are considered.

В. В. Цетлин¹, Е. А. Дешевая¹, Н. Д. Новикова¹,
Н. А. Поликарпов¹, Е. А. Грачев², О. Р. Григорян²,
О. А. Заворина², Л. Л. Лазутин², О. Ю. Нечаев²,
И. В. Чурило³

¹ГНЦ РФ Інститут медико-біологічних проблем РАН, Москва, Російська Федерація

²Науково-дослідний інститут ядерної фізики МДУ, Москва, Російська Федерація

³Ракетно-космічна корпорація «Енергія», м. Корольов МО, Російська Федерація

Влияние низких доз радиации на микробное сообщество космических станций

Описаны проблемы изучения микробного сообщества внутри МКС в эксперименте «Скорпион-1».

Важнейшую роль в обеспечении безопасной работы экипажей играет среда обитания в отсеках орбитальных космических станций [1, 2, 5].

Помимо существования микробного компонента в воздушной среде отсеков, особую опасность для конструкционных материалов и жизненно важных систем управления станции могут представлять продукты жизнедеятельности микромицетов. Не исключено, что наблюдавшиеся на станции «Мир» повреждения электрических контактов, оплетки кабелей и трубопроводов для теплоносителя были вызваны процессами биодеструкции [2].

Среди ряда факторов среды обитания, влияющих на процесс развития микроорганизмов в космических объектах, можно выделить хроническое облучение низкими дозами космического ионизирующего излучения, при этом мощность поглощенной дозы (МПД) ионизирующего излучения в отсеках станции испытывает значительные вариации [5, 6].

Анализ данных по динамике суммарной МПД на станции МИР в течение 22 цикла солнечной активности как в слабо защищенных (непосредственно под оболочкой), так и в сильно защищенных отсеках станции показал, что МПД модулируется солнечным излучением. При этом в зависимости от защищенности мест мощность дозы по отсекам может отличаться в 2—4 раза. Во время минимума солнечной активности различие достигает 10 раз. Так, например, во время фазы минимума солнечной активности, длившейся обычно 2-3 года, МПД может достигать 1000 мкГр/сут, тогда как во время

фазы максимума мощность дозы много меньше и может составлять 150 мкГр/сут.

Указанный диапазон МПД относят к области низких доз, действие которых на биообъекты может вызывать радиационный гормезис [4]. Представляло интерес исследовать возможное влияние низких доз космического излучения на развитие микроорганизмов в отсеках станции «Мир». Дело в том, что во время многолетней эксплуатации станции, в ее отсеках происходила естественная контаминация микроорганизмами — микробами и микромицетами. И хотя микробиологическое загрязнение не превышало предельно допустимые нормативы, распространенность микроорганизмов была заметной и испытывала временные вариации не только во времени, но и по отсекам модулей орбитального комплекса [2].

На рис. 1 представлена динамика содержания микробного сообщества, грибов и бактерий (до проведения санитарно-гигиенических мероприятий), на поверхностях декоративно-отделочных и конструкционных материалов на протяжении 14 лет эксплуатации ОК «Мир». Имеющийся разрыв в данных обусловлен досадным перерывом в регулярной доставке бортовых проб в лабораторию в Москве. Видно, что динамика численности колонииобразующих единиц (КОЕ) грибов и бактерий носила волнообразный характер и отражала временную зависимость микроэволюционных циклов, соответствующих элементарным потокам жизни микробного сообщества в замкнутом пространстве космического

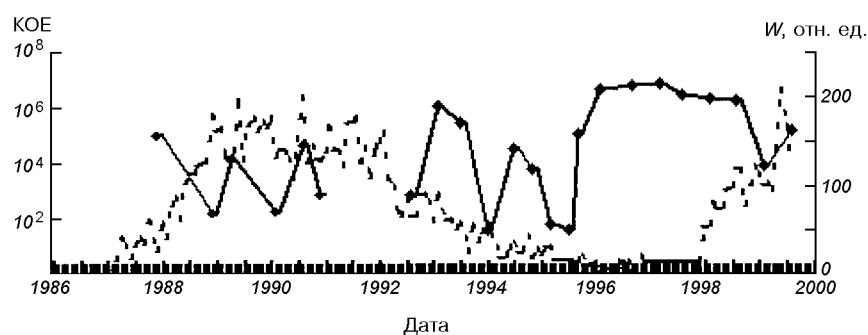
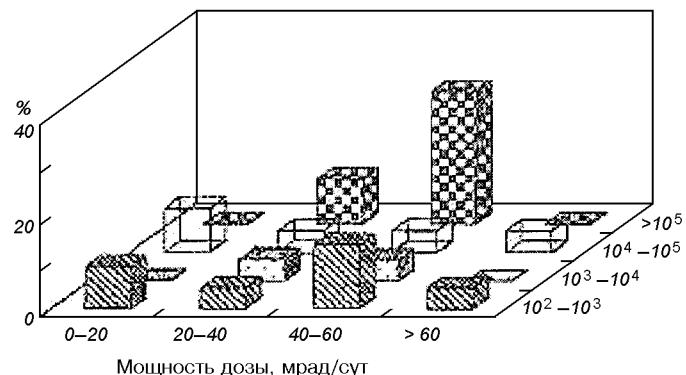


Рис. 1. Динамика развития в отсеках ОК МИР микробного сообщества в зависимости от показателя солнечной активности *W*



ческого комплекса. Так, например, при полете станции в период минимума солнечной активности отмечалось увеличение численности жизнеспособных фрагментов микроорганизмов до 10^6 КОЕ на 100 см^2 поверхности (при средней величине 1000 КОЕ на 100 см^2). Несмотря на то, что поддержание в космическом объекте среды обитания, адекватной потребностям человека, неминуемо обеспечивало благоприятные условия для жизнедеятельности многочисленных бактерий и грибов-сапрофитов, условия жизни микробного сообщества в отсеках ОК «Мир» отличались от земных рядом особенностей. Кроме того, взаимодействия микроорганизмов с искусственными субстратами — материалами силовых конструкций, поверхностей интерьера оснащения и оборудования, осуществляемые в среде, отличались исключительным своеобразием. Эти обстоятельства не могли не отразиться на протекании жизнедеятельности микроорганизмов.

Как показали длительные наблюдения, проводимые в течение всего периода эксплуатации ОК «Мир», активность микромицетов может не только сильно изменяться в различные отрезки времени полета (вплоть до пяти порядков величины), но и быть неодинаково распространенной по объему станции. Например, особенно активными являются колонии некоторых видов плесневых микромицетов вблизи оболочки за декоративными панелями, т. е.

в местах, труднодоступных для применения санитарных и профилактических анткоррозийных и защитных мероприятий.

Отличие радиационных условий обитания микрофлоры в различных точках станции может приводить к различию в заселенности отсеков станции и, как следствие, — к различию в интенсивности биодеструкционных процессов. Следовательно, можно ожидать, что различие дозовых нагрузок в отсеках модулей, особенно в запанельном пространстве, где мощность дозы наибольшая при любом цикле солнечной активности, должно сказываться на заселенности биообъектами, например микромицетами, отсеков станции. Установлено, что наибольшее количество проб, взятых с поверхностей интерьера и оборудования, имеющих высокое содержание КОЕ на 100 см^2 ($> 100\ 000$), приходится на период минимума солнечной активности ($W < 50$). Именно в это время мощность поглощенной дозы на станции «Мир» была максимальной. Для установления картины взаимосвязи между вариациями численности КОЕ грибов в пробах и мощностью дозы построена двухмерная гистограмма распределения количественного уровня микроорганизмов на поверхностях интерьера и оборудования от мощности дозы (рис. 2).

В свою очередь, можно ожидать, что будет различной и биодеструкционная активность таких ор-

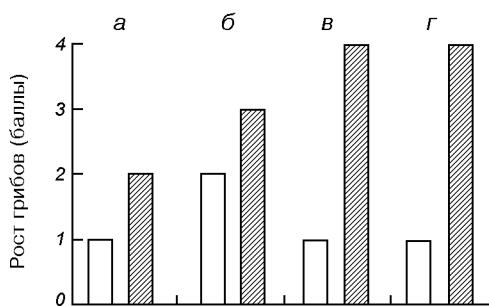


Рис. 3. Агрессивность (рост) штаммов грибов, выделенных в ОК «Мир» (заштрихованные столбики), в сравнении с эталонными (музейными) культурами (светлые столбики): а — *Penicillium chrysogenum*, б — *Aspergillus niger*, в — *Penicillium expansum*, г — *Aspergillus sp.*

ганизмов, поскольку под воздействием космической радиации агрессивность некоторых видов микромицетов может увеличиваться более чем в два раза. На рис. 3 приведены результаты оценки изменения «агрессивности» у полетных штаммов грибов по сравнению с эталонными штаммами [3].

Наземные лабораторные исследования показали зависимость развития некоторых представителей микробного сообщества от МПД. Влияние ионизирующего излучения характеризовалось усилением метаболических процессов в клетках бактерий и грибов при малых значениях доз.

В результате лабораторных исследований выявлено проявление радиационного гормезиса в развитии микромицетов полетных и коллекционных штаммов при воздействии различных компонентов корпускулярного и гамма-излучения. В диапазоне поглощенных доз, характерных для космического полета, определены морфологические, популяционные и другие изменения в колониях микроорганизмов при воздействии жесткого электромагнитного и нейтронного излучений на развитие отдельных представителей грибного компонента микробного сообщества в космических объектах.

Выявлено проявление радиационного воздействия на развитие полетных штаммов, например вида *Aspergillus niger*, под действием различных компонентов излучения: гамма- и нейтронного (рис. 4). В диапазоне поглощенных доз, присущих космическому полету, отмечены морфологические изменения полетного штамма микромицета, выделенного из среды обитания в период работы на станции «Мир» 20-й основной экспедиции, при воздействии вышеуказанного излучения. При этом показано, что на характер развития полетного штамма гриба оказывает существенное влияние вид ионизирующего излучения. Обнаружено, что действие нейт-

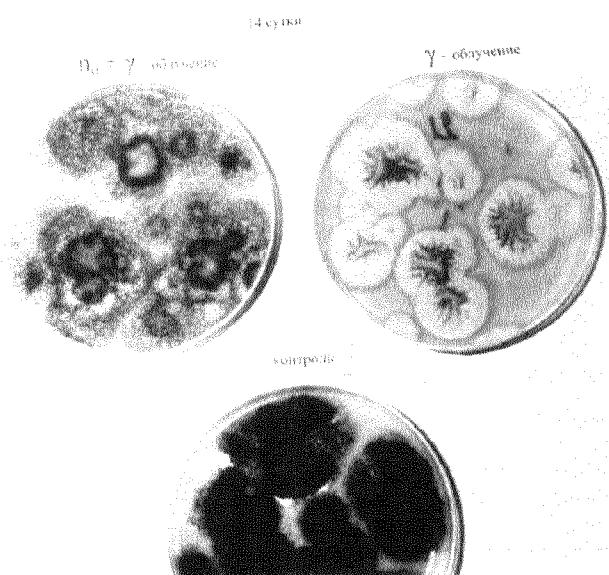


Рис. 4. Результат воздействия различных компонентов излучения на полетный штамм гриба *Aspergillus niger*

ронных потоков создает морфологические изменения в фенотипе колоний полетных штаммов, существенно отличающихся от аналогичных эффектов, вызываемых только гамма-излучением. В условиях гамма-излучения от источника Cs^{137} отмечено усиление вегетативного мицелия и некоторое снижение спорообразования, тогда как нейтронное излучение и сопутствующее ему гамма-излучение от Ри-Ве-источника вызывает изменения другого рода. У контрольного штамма (штамм Всероссийской коллекции микроорганизмов — 1119) при действии низких доз различных ионизирующих излучений не отмечалось морфологических отклонений в характере развития.

С января 2002 г. в рамках космического эксперимента «Скорпион» проводится экспонирование образцов широко используемых материалов и покрытий с целью изучения их динамики обрастания различными микромицетами с одновременным проведением комплексных радиометрических, волновых, вибрационных и климатических измерений внутри гермоотсека российского сегмента (РС) Международной космической станции.

Поскольку одной из основных задач, решаемых в эксперименте с аппаратурой «Скорпион-1», является изучение поведения микробного сообщества внутри РС МКС, в состав оборудования включены пластины с образцами материалов, широко используемых во внутренней отделке отсеков станции и

элементах бортового оборудования. Пластины с образцами снабжены дозиметрическими сборками для детального изучения радиационных условий, действующих на микроорганизмы в разных местах станции. Наборы пластин размещены в трех различных точках гермоотсека РС МКС в запанельном пространстве. Для оценки динамики обрастания различных материалов ассоциациями микромицетов и бактерий пластины каждого набора экспонируются в течение определенного времени с последующим возвращением на Землю для анализа видового состава и численности микроорганизмов, контактирующих поверхность образцов.

После завершения работы 3-й основной экспедиции на борту МКС первые пластины с образцами были возвращены на Землю для лабораторного анализа после экспозиции на борту станции с января по май 2002 года. В результате микробиологических исследований была получена информация о численности жизнеспособных колониеобразующих единиц и видовом составе микробных ассоциаций, контактирующих поверхность образцов полимерных материалов. Первые результаты подтвердили тенденцию к увеличению численности микробных ассоциаций с увеличением мощности поглощенной дозы, что ранее было выявлено при анализе данных по радиационной и микробиологической обстановке в отсеках станции «Мир».

1. Викторов А. Н., Новикова Н. Д. и др. Актуальные проблемы микробиологической безопасности среды обитания орбитальных станций в условиях многолетней эксплуатации // Авиакосм. и экологическая медицина.—1995.—№ 5.—С. 51—55.
2. Викторов А. Н., Новикова Н. Д., Дешевая Е. А. Микрофлора кабин пилотируемых космических объектов и проблема биоповреждений, используемых в них конструкционных материалов // Авиакосм. и экологическая медицина.—1992.—№ 3, С. 41—48.
3. Викторов А. Н., Новикова Н. Д., Дешевая Е. А. и др. Результаты микробиологических исследований // Орбитальная станция «Мир», Москва, 2001 г., Т. 1, С. 121—151.
4. Кузин А. М. Идеи радиационного гормезиса в атомном веке // М.: Наука., 1995.—С. 120.
5. Митрикас В. Г., Цетлин В. В. Проблемы обеспечения радиационного контроля на ОК МИР в 22-м цикле солнечной активности // Косм. исслед.—2000.—№ 2.
6. Цетлин В. В., Митрикас В. Г., Бондаренко В. А. База данных о радиационной обстановке на станции «Мир» за период с 08.02.87 по 28.08.99. ГНЦ РФ ИМБП. № 2000620017. Официальная регистрация в «Роспатент» 27.01.2000 г.

EFFECT OF LOW RADIATION DOSES ON MICROBE POPULATION IN SPACE STATIONS

V. V. Tsetlin, E. A. Deshevaya, N. D. Novikova, N. A. Polikarpov, E. A. Grachev, O. R. Grigoryan, O. A. Zavorina, L. L. Lazutin, O. Yu. Nechaev, and I. V. Churilo

We describe the problems arising in the study of the microbe population inside the International Space Station.

Т. А. Борисова, Н. В. Крысанова, Н. Г. Гиммельрейх

Інститут біохімії ім. О. В. Палладіна НАН України, Київ

Моделированная гравитация и глутаматергическая передача в больших полушариях мозга

Вивчено вплив моделюваної гіпер gravітації на процес звільнення L-[¹⁴C] глутамату із синаптосом (відділені від аксонів нервові закінчення) великих півкуль головного мозку щурів. Гіперgravітаційний стрес у статевозрілих самців щурів Wistar моделювали центрифугуванням (діаметр центрифуги 50 см) в спеціальних контейнерах протягом 1 год при 10g. Показано, що в умовах моделюваної гіперgravітації спостерігалось значне зменшення Ca²⁺-залежного звільнення L-[¹⁴C] глутамату із синаптосом великих півкуль при деполяризації пресинаптичної мембрани. Кількість звільненого із синаптосом L-[¹⁴C] глутамату зменилася з 14.4 ± 0.7 % у контрольних тварин до 6.2 ± 1.9 % у тварин після гіперgravітаційного стресу ($P \leq 0.05$). При дослідженні Ca²⁺-незалежного звільнення L-[¹⁴C] глутамату із синаптосом було виявлено лише тенденцію до його збільшення після гравітаціонного навантаження. Можливо, що в результаті впливу стресу гравітаційної природи відбуваються зміни розподілу нейромедіатора між везикульованим і цитоплазматичним пулами.

Нарушение гравитационных условий индуцирует различного рода изменения в нервной ткани млекопитающих. Биохимическая природа нарушения процесса передачи нервного импульса продолжает оставаться невыясненной. Неизвестно также, модуляция каких этапов передачи нервного импульса приводит к нарушению процесса в целом. Изучение этих вопросов ведет к определению роли отдельов головного мозга и вклада различных этапов процесса нейросекреции в функциональную пластичность нервной системы [1, 4—6, 8, 9, 12—14].

В настоящее время известно, что одним из основных возбуждающих нейромедиаторов в организме животных является L-глутаминовая кислота. Ткань мозга обладает значительной способностью аккумулировать глутамат. Мозг содержит большое количество глутамата, однако лишь незначительная его часть в норме находится во внеклеточном пространстве. За счет работы глутаматных транспортеров, локализованных в плазматической мемbrane нейронов и глиальных клеток, происходит удаление глутамата из внеклеточного пространства и осуществляется длительное поддержание низкой нетоксичной концентрации нейромедиатора [7, 11, 15, 16].

Известно, что при нарушениях регуляции концентрации глутамата в синаптической щели возникает хроническое возбуждение нейрона. Глутама-

тэргическая сверхстимуляция может разрушать нейроны. Недавно введен в обращение термин «глутаматная нейротоксичность». Причиной глутаматной нейротоксичности является связывание глутамата с его рецепторами, результатом чего является значительное массированное увеличение концентрации свободного цитоплазматического кальция. Нарушения, возникающие в процессе как поглощения, так и освобождения глутамата, могут быть вовлечены в патогенез нейродегенеративных болезней, таких как болезнь Паркинсона и болезнь Алзгеймера, шизофрения, эпилепсия и др. При мозговых травмах и ишемии также наблюдаются нарушения трансмиссии глутамата [7].

Настоящее исследование посвящено анализу влияния моделюваної гравітації на процес освобождения L-глутамата синаптосомами великих полушарій головного мозга кріс.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Гиперgravітаційний стрес у половозрелых самцов кріс Wistar весом 100—120 г моделювали центрифугуванням (діаметр центрифуги 50 см) в спеціальних контейнерах в течіє 1 ч при 10g. Синаптосоми із великих полушарій головного мозга кріс виделяли сразу після окончания грави-

тационной нагрузки. В качестве контроля использовали животных, содержащихся в обычных земных условиях.

Получение синаптосом. В опытах использовали синаптосомы, выделенные из больших полушарий (одно животное на опыт) декапитированных крыс дифференциальным центрифугированием и центрифугированием в градиенте плотности фиколла-400, применяя метод Котмана [3] с небольшими модификациями: раствор сахарозы для приготовления градиента фиколла содержал 5 мМ Нерес-NaOH и 0.2 мМ ЭДТА, pH 7.4. Синаптосомы, полученные при фракционировании в градиенте фиколла, разводили 10 объемами 0.32 М сахарозы, 5 мМ Нерес-NaOH, pH 7.4 и центрифугировали при 20000g в течение 20 мин. Осадок ресуспензировали на льду в стандартном солевом растворе следующего состава: 126 мМ NaCl, 5 мМ KCl, 2 мМ MgCl₂, 1.0 мМ NaH₂PO₄, 20 мМ Нерес, pH 7.4, 10 мМ d-глюкоза. Полученную суспензию синаптосом (концентрация белка 4 мг/мл) использовали в экспериментах в течение 2-4 ч после получения. Ca²⁺-содержащая среда состояла из стандартного солевого раствора и 2 мМ CaCl₂. Бескальциевая среда не содержала кальция и в нее добавляли 1 мМ ЭДТА. Все процедуры проводили при 0 °C. Концентрацию белка определяли согласно описанию [10].

Освобождение L-глутамата. Для определения уровня освобождения L-[¹⁴C]глутамата из синаптосом, суспензию (концентрация белка 4 мг/мл) в стандартном Ca²⁺-содержащем буфере преинкубировали 10 мин при 37 °C, затем добавляли 500 нМ L-[¹⁴C]глутамата и инкубировали еще 10 мин при 37 °C. После инкубирования с L-[¹⁴C]глутаматом суспензию разводили 10 объемами охлажденного стандартного солевого раствора, центрифугировали 10 мин при 4000g, затем осадок ресуспензировали в том же буфере при 0 °C и использовали в эксперименте (концентрация белка 4 мг/мл). Суспензию синаптосом разводили стандартным Ca²⁺-содержащим буфером из расчета 250 мкг белка синаптосом в 250 мкл суспензии на каждое измерение, преинкубировали 10 мин при 37 °C. Аликвоты суспензии синаптосом отбирали через различные промежутки времени и фильтровали на фильтрах Whatman GF/C (Англия). Фильтры быстро промывали охлажденным солевым раствором, помещали на 1 ч во флаконы со 100 мкл 10 % SDS и измеряли радиоактивность в сцинтилляционной жидкости ЖС-103 на счетчике радиоактивности Tracor Analytic DELTA 300.

Результаты представлены как среднее значение ± квадратичная ошибка среднего значения.

В экспериментах были использованы фиколл-400 (Serva), Hepes (Sigma), ЭДТА (Calbiochem), d-глюкоза (Sigma), L-глутамат (Sigma), L-[¹⁴C]-глутамат (Amersham), SDS (Fluka), NaCl, KCl, MgCl₂, NaH₂PO₄, CaCl₂ (о.с.ч. Реахим), сцинтилляционная жидкость ЖС-103 (Реахим).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Синаптосомы (отделенные от аксонов нервные окончания) обладают всеми характеристиками интактного нервного окончания: мембранным потенциалом, способностью к активному накоплению нейромедиаторов и освобождению нейромедиаторов при деполяризации мембранны. Основная задача исследования состояла в сравнительном анализе процесса освобождения глутамата, протекающего в обычных земных условиях (К-контроль) и в условиях моделированной гипергравитации (ГГ).

Необходимо отметить, что спонтанный выход L-[¹⁴C]глутамата из синаптосом характеризует состояние их плазматической мембрany. На рис. 1 представлена зависимость нестимулированного освобождения L-[¹⁴C]глутамата из К- и ГГ-синаптосом от времени инкубации. Суспензия синаптосом оставалась стабильной в течение исследуемого временного интервала как в случае контрольных, так и ГГ-синаптосом. За 6 мин наблюдалось нестимулированное освобождение 12.0 ± 2.3 % (К) и 12.5 ± 2.7 % (ГГ) накопленного L-[¹⁴C]глутамата синаптосомами больших полушарий (рис. 2). ГГ-стресс не приводил к изменению уровня базального вытекания L-[¹⁴C]глутамата из синаптосом.

Было исследовано освобождение L-[¹⁴C]глутамата из синаптосом при деполяризации плазматической мембрany 35 мМ хлористым калием в Ca²⁺-содержащей среде. Деполяризация плазматической

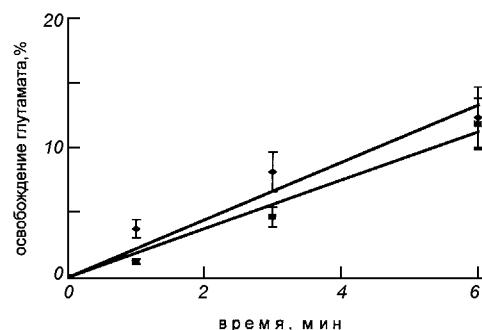


Рис. 1. Зависимость нестимулированного освобождения L-[¹⁴C]глутамата из К- и ГГ-синаптосом от времени: ромбики — контрольные синаптосомы, квадратики — ГГ-синаптосомы. График построен по результатам 12 экспериментов

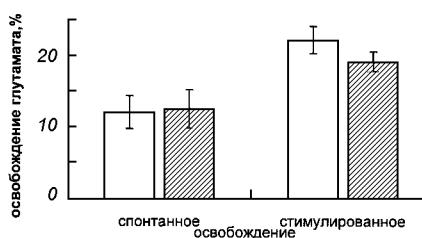


Рис. 2. Спонтанное и стимулированное 35 мМ KCl освобождение L-[¹⁴C]глутамата за 6 мин инкубации в Ca²⁺-содержащей среде из синаптосом контрольных и подвергнутых гипергравитационному стрессу животных. График построен по результатам 8 экспериментов

мембранны в таких условиях приводит к активизации двух механизмов освобождения нейромедиатора из синаптосом. Один механизм является Ca²⁺-зависимым — это экзоцитоз синаптических везикул, другой — Ca²⁺-независимый, Na⁺-зависимый, когда освобождение глутамата происходит посредством глутаматных транспортеров плазматической мембранны. Экспериментальные данные, представленные на рис. 2, свидетельствуют об отсутствии влияния моделированной гравитации на уровень освобождения глутамата. В контрольных синаптосомах деполяризация 35 мМ хлористым калием в Ca²⁺-содержащей среде в течение 6 мин приводила к освобождению 22.1 ± 1.9 %, а в условиях моделированной гипергравитации — 19.1 ± 1.4 % L-[¹⁴C]глутамата. Разница не являлась статистически значимой.

Для определения Ca²⁺-независимого освобождения нейромедиатора из синаптосом деполяризация хлористым калием проводилась в бескальциевой среде инкубации. Ca²⁺-зависимое освобождение может быть получено путем вычитания Ca²⁺-независимого освобождения из данных, полученных при деполяризации в Ca²⁺-содержащей среде. При анализе данных деполяризации синаптосом в течение 30 мин в Ca²⁺-содержащей и бескальциевой средах инкубации можно сделать вывод об уменьшении Ca²⁺- зависимого освобождения нейромедиатора. За 6 мин Ca²⁺- зависимое освобождение (экзоцитоз) уменьшилось с 14.4 ± 0.7 % у контрольных животных до 6.2 ± 1.9 % у животных после гипергравитационного стресса ($P \leq 0.05$) (рис. 3).

Таким образом, основываясь на полученных экспериментальных данных, можно сделать вывод о перераспределении нейромедиатора между цитоплазматическим и везикулированным пулами после гипергравитационной нагрузки. При этом цитоплазматический пул (Ca²⁺-независимое освобождение) имел тенденцию к увеличению, а везикулиро-

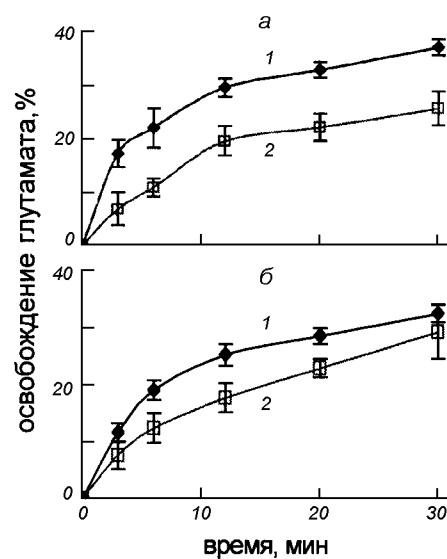


Рис. 3. Зависимость освобождения L-[¹⁴C]глутамата из синаптосом контрольных животных (а) и животных после гипергравитационной нагрузки (б) от времени. Освобождение L-[¹⁴C]глутамата стимулировали добавлением 35 мМ KCl в: 1 — Ca²⁺-содержащей (2 мМ) и 2 — бескальциевой среде (1 мМ ЭГТА). График построен по результатам 3 экспериментов

ванный (Ca²⁺- зависимое освобождение), наоборот, значительно уменьшался. Результаты наших исследований свидетельствуют о том, что гипергравитационная нагрузка влияет на процесс освобождения глутамата, одного из основных возбуждающих нейромедиаторов в организме животных, из изолированных нервных окончаний головного мозга. Эти исследования позволяют оценить вклад этого этапа нейросекреции в синаптическую пластичность.

- Газенко О. Г., Генин А. М., Ильин Е. А. и др. Адаптация к невесомости и ее физиологические механизмы // Изв. АН СССР.—1980.—1.—Р. 5—18.
- Черниговский В. Н. Проблемы космической биологии. — М.: Наука, 1971.—15.—355 с.
- Cotman C. W. Isolation of synaptosomal and synaptic plasma membrane fractions // Methods Enzymol.—1974.—31.—Р. 445—452.
- D'Amelio F., Fox R. A., Wu L. C., et al. Quantitative changes of GABA-immunoreactive cells in the hindlimb representation of the rat somatosensory cortex after 14-day hindlimb unloading by tail suspension // J. Neurosci. Res.—1996.—44, N 6.—Р. 532—539.
- D'Amelio F., Wu L. C., Fox R. A., Daunton N. G., et al. Hypergravity exposure decreases gamma-aminobutyric acid immunoreactivity in axon terminals contacting pyramidal cells in the rat somatosensory cortex: a quantitative immunocytochemical image analysis // J. Neurosci. Res.—1998.—15, N 53.—Р. 135—142.
- Fox R. A. Effects of Artificial Gravity: Central Nervous System Neurochemical Studies // NASA Taskbook, 1997.—Р. 619—620.

7. Gegelashvili G., Schousboe A. Cellular distribution and kinetic properties of affinity glutamate transporters // Brain Res. Bull.—1998.—45, N 3.—P. 233—238.
8. Hughes-Fulford M. Altered cell function in microgravity // Exp. Gerontol.—1991.—26, N 2-3.—P. 247—256.
9. Krasnov I. B. Gravitational neuromorphology // Adv. Space Biol. Med.—1994.—4.—P. 85—110.
10. Larson E., Howlett B., Jagendorf A. Artificial reductant enhancement of the Lowry method for protein determination // Analytical Biochemistry.—1986.—155.—P. 243—248.
11. Lipton S. A., Rosenberg P. A. Excitatory amino acids as a final common pathway for neurologic disorders // New Engl. J. Med.—1994.—330.—P. 613—662.
12. Paschenko P. S., Sukhoterin A. F. The structural organization of the normal rat area postrema and under conditions of chronic exposure to gravitational loads // Morfologiya.—2000.—117.—P. 36—41.
13. Rao V. L., Murthy C. R. K. Uptake, release and metabolism of glutamate and aspartate by rat cerebellar subcellular preparations // Biochem. Mol. Biol. Int.—1993.—29.—P. 711—717.
14. Savina E. A., Alekseev E. I. Functional state of the posterior lobe of rats exposed aboard the biosatellite «Cosmos-936» // Arkh. Anat. Gistol. Embriol.—1980.—78, N 1.—P. 62—68.
15. Siesjo B. K. Basic mechanisms of traumatic brain damage // Ann. Emergency Med.—1993.—22.—P. 959—969.
16. Vatassery G. T., Lai J. C. K., Smith W. E., Quach H. T. Aging is associated with a decrease in synaptosomal glutamate uptake and an increase in the susceptibility of synaptosomal vitamine E to oxidative stress // Neurochem. Res.—1998.—23.—P. 121—125.

ARTIFICIAL GRAVITY AND GLUTAMATERGIC TRANSMISSION IN CEREBRAL HEMISPHERES

T. Borisova, N. Krysanova, N. Himmelreich

We investigated the effect of hypergravity stress (created by centrifugation of rats at 10g over the course of 1 hour) on the L-[¹⁴C]glutamate release from isolated rat brain cerebral hemispheres nerve terminals. It is shown that the hypergravity stress exerted a different influence on the Ca²⁺-dependent and the Ca²⁺-independent components of L-[¹⁴C]glutamate release. The Ca²⁺-dependent L-[¹⁴C]glutamate release stimulated with a standard stimulus, 35 mM KCl, was decreased by more than one half as a result of the hypergravity stress and was equal to 14.4±0.7 % for control animals and 6.2±1.9 % for animals exposed to hypergravity ($P \leq 0.05$). At the same time we observed no statistically significant difference in the Ca²⁺-independent component of L-[¹⁴C]glutamate release. Our data allows us to make a suggestion that the redistribution of the neurotransmitter between cytosolic and vesicular pools in nerve terminals occurs in altered gravity conditions.

Л. Т. Мищенко

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Влияние на ростовые процессы и аппарат растений *Triticum aestivum L.*, инфицированных вирусом мозаики пшеницы микрогравитации

Вивчались ростові процеси і фотосинтетичний апарат різних здорових і вірусінфікованих сортів пшениці при вирощуванні в умовах змодельованих факторів мікргравітації на універсальному кліностаті. Кліностат реалізує протягом вегетаційного періоду кілька схем переорієнтації рослин відносно вектора сили земного тяжіння. Висока специфічність вірусу смугастої мозайки пшениці дозволяє рекомендувати сорт Апогей для вирощування в космічних оранжереях, оскільки інші яри сорти Саратівська-29, Колективна-3 не виколошувались. Фотосинтетичний апарат суперкарликового сорту Апогей має високий адаптаційний потенціал і зможе виконувати свою основну функцію — життєзабезпечення і формування рослинами зерен.

Создание космических летательных аппаратов, на которых длительное время работают космонавты, дали толчок развитию новых разделов космической биологии, в том числе космической фитофизиологии, фитопатологии, фитовирусологии [1].

Проведены исследования гравичувствительности клеток, процессов роста и развития здоровых растений, в том числе *Triticum aestivum L.*, в условиях космического полета [2, 5]. Однако будут ли жизнеспособными вирусифицированные растения пшеницы различных сортов в условиях микрогравитации? Состояние растений, пораженных вирусной инфекцией, в условиях космического полета не изучено. Высока вероятность того, что в стрессовых условиях космоса у растительных организмов может проявиться вирусная инфекция, которая в земных условиях находилась в латентной форме.

Для жизнеобеспечения космонавтов создаются космические оранжереи. Одной из культур растительного сообщества будущей космической оранжереи может быть пшеница [2, 6]. При долгосрочных полетах пшеница — белковый и витаминный компонент еды космонавтов, регенерат кислорода. Данные исследования невозможно проводить без первоначального скрининга сортов в условиях моделированной микрогравитации. Наша работа посвящена выяснению устойчивости различных сортов пшеницы к вирусной инфекции и условиям микрогравитации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Изучался рост пшеницы в условиях моделированной микрогравитации на универсальном клиностате «Цикл-2», который реализует несколько схем переориентации растений относительно вектора силы земного тяготения. Клиностаты такого типа широко используются в исследованиях гравитропической реакции и в космической биологии [3, 7]. Растения инфицировали вирусом полосатой мозаики пшеницы (ВПМП).

Выбор ВПМП обусловлен тем, что он поражает озимую и яровую пшеницу, другие злаковые — ячмень, кукурузу, просо. Этот вирус недостаточно изучается в Украине и в обычных земных условиях, хотя вредоносность его чрезвычайно высока. В условиях клиностатирования исследовались сорта пшеницы различного экологического происхождения: Чайка, Альбатрос одесский, Донская полукарликовая, Саратовская-29 (степная зона Украины и России), Коллективная-3 (лесостепная зона Украины), Апогей (селекция США).

ВПМП накапливали в лабораторных условиях на растениях ячменя Рось и овса Скаун. Схема выращивания опытных растений: 1-суточные на克莱нувшиеся проростки помещали в контейнеры с искусственным субстратом. Вначале субстрат увлажняли дистиллированной водой, а в процессе

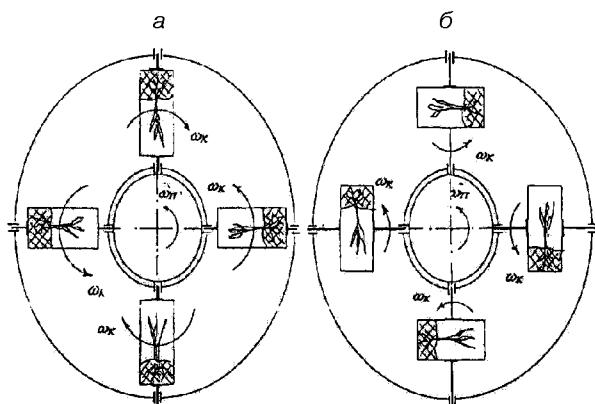


Рис. 1. Схема вращения контейнеров клиностата «Цикл-2»: а — горизонтальное вращение, б — вертикальное вращение, ω_k — угловая скорость вращения контейнеров в плоскости, параллельной вектору силы тяжести, ω_p — угловая скорость вращения платформы в плоскости, перпендикулярной к вектору силы тяжести

вегетации растений — поливали специальным питательным раствором, содержащим комплекс макро- и микроэлементов. Растения выращивали в условиях горизонтального и вертикального клиностатирования (для контейнеров $v_{\text{кон}} = 2-4$ об/мин, для платформы — $v_{\text{пл}} = 1$ об/мин). На рис. 1 представлена схема вращения контейнеров: а) контейнеры размещены горизонтально и вращаются вокруг своих осей, перпендикулярно к оси платформы; б) растения вращаются в вертикальной плоскости, параллельно вектору силы земного тяготения. При этом два контейнера находились ближе к оси вращения платформы, условно $R = 1$, а два других — на 60 % дальше, $R = 1.6$. В таких условиях постоянно происходит изменение угла между вектором силы земного тяготения и осью роста растений. Контролем служили растения, выращиваемые в неподвижных контейнерах и в открытых вегетационных сосудах. Условия микро-

климата и водно-минерального питания клиностатированных и контрольных растений были идентичны. Через 10—12 сут, в фазе трех листьев половину растений механически инокулировали вирусом ВПМП, используя карборунд и фосфатный буфер. Здоровые растения обрабатывали лишь буфером без ВПМП. Эксперимент длился 30—45 сут. Световой день составлял 16 ч при освещенности 5—6 тыс. люкс, температура 21 ± 1 °С. Передачу вирусной инфекции и репликацию ВПМП в клетке контролировали разными методами: капельной агглютинации, иммунофлуоресценции и иммуноферментного анализа, а также электронной микроскопии. Ростовые процессы изучали методами морфо- и биометрии. Фотосинтетические пигменты определяли спектрофотометрически [4]. Математическая обработка результатов проведена методом дисперсионного анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ проведенных опытов свидетельствует о том, что ростовая реакция растений пшеницы в условиях клиностатирования изменялись неоднозначно. Эта зависимость связана с сортовыми особенностями (озимые, яровые), от наличия и концентрации вирусной инфекции, которая проявлялась в симптомах; от условий клиностатирования.

Данные табл. 1 свидетельствуют о том, что яровая пшеница сорта Саратовская-29 (русская селекция) накапливала биомассы надземной части на 32.3 % и корней на 46.6 % больше у неподвижных вирусифицированных растений, по сравнению со здоровыми (варианты 7 и 8). Такая же закономерность отмечена и при горизонтальном клиностатировании (вариант 1 и 2). А при вертикальном клиностатировании наблюдалось снижение биомассы надземной части у ВПМП-инфицированных растений — варианты 3, 4 и 5, 6. Реакция же корней

Таблица 1. Влияние клиностатирования на биометрические показатели растений пшеницы сорта Саратовская-29 (34 сут, $v_{\text{пл}} = 1$ об/мин, $v_{\text{кон}} = 4$ об/мин)

| № | Варианты | Тип клиностатирования | Масса 1 растения, мг | | Длина, см | |
|----|----------------|------------------------------|----------------------|--------|-----------------|--------|
| | | | Надземная часть | Корень | Надземная часть | Корень |
| 1 | Здоровые | Горизонтальное | 263 | 42.9 | 32 | 7 |
| 2 | Инфицированные | Горизонтальное | 294 | 53.1 | 22 | 7.5 |
| 3 | Здоровые | Вертикальное, $R = 1.0$ | 318 | 65 | 31 | 10.5 |
| 4 | Инфицированные | Вертикальное, $R = 1.0$ | 187 | 57 | 26 | 8.5 |
| 5 | Здоровые | Вертикальное, $R = 1.6$ | 276 | 42 | 27.5 | 6 |
| 6 | Инфицированные | Вертикальное, $R = 1.6$ | 199 | 77 | 24 | 3.8 |
| 7 | Здоровые | Неподвижный контейнер | 363 | 45 | 30.6 | 13 |
| 8 | Инфицированные | Неподвижный контейнер | 480 | 66 | 34.7 | 14 |
| 9 | Здоровые | Неподвижный, без контейнеров | 645 | 95 | 34.8 | 14.6 |
| 10 | Инфицированные | Неподвижный, без контейнеров | 567 | 99 | 32.4 | 13 |
| | | НСР0.05 | 18 | 8.7 | 3.9 | 1.5 |

Таблица 2. Влияние клиностатирования (34 сут) на содержание хлорофиллов в листьях пшеницы сорта Чайка, мг/% на сырое вещество ($v_{пл} = 1$ об/мин, $v_{кон} = 2$ об/мин)

| № | Варианты | Тип клиностатирования | Хлорофиллы, мг/100г сырого вещества | | | | |
|---|----------------|--------------------------------|-------------------------------------|------|-------|------|-------------|
| | | | a | b | a + b | a/b | Каротиноиды |
| 1 | Здоровые | Горизонтальное | 135.3 | 64.8 | 200.1 | 2.09 | 41.5 |
| 2 | Инфицированные | Горизонтальное | 118.1 | 59.2 | 177.3 | 1.99 | 38.7 |
| 3 | Здоровые | Вертикальное | 129.4 | 71.9 | 207.3 | 1.80 | 38.8 |
| 4 | Инфицированные | Вертикальное | 121.0 | 55.7 | 176.7 | 2.17 | 39.0 |
| 5 | Здоровые | Неподвижный контейнер | 103.2 | 47.6 | 150.8 | 2.17 | 37.3 |
| 6 | Инфицированные | Неподвижный контейнер | 115.4 | 54.6 | 170.0 | 2.11 | 38.5 |
| 7 | Здоровые | Неподвижный открытый контейнер | 108.2 | 51.8 | 160.0 | 2.08 | 37.9 |
| 8 | Инфицированные | Неподвижный открытый контейнер | 123.7 | 58.9 | 182.6 | 2.07 | 43.8 |
| | | HCP _{0.05} | 10.1 | 6.2 | 11.8 | 0.02 | 0.9 |

была противоположной — большее накопление биомассы при четком отрицательном геотропизме — варианты 5, 6; $R = 1.6$. Такое явление можно объяснить усилением защитной реакции растений на начальной стадии вирусной инфекции. Это подтверждается результатами по содержанию фотосинтетических пигментов у озимого сорта Чайка (одесская селекция), табл. 2.

У вирусифицированных растений в неподвижных контейнерах (и без них) отмечено достоверное повышение пигментов a , b , каротиноидов (варианты 6, 5 и 8, 7). У здоровых растений при клиностатировании наблюдалось возрастание хлорофиллов a , b , $a + b$ по сравнению с неподвижным контролем (варианты 1, 3 и 5, 7). У вирусифицированных — снижение по сравнению со здоровыми, (варианты 2, 1 и 4, 3), но повышение по сравнению с неподвижным контролем (варианты 2, 4 и 5, 7).

Таким образом, повышенное содержание хлорофиллов у сорта Чайка с длинным периодом вегетации может быть адаптивной реакцией на вирусную инфекцию при клиностатировании. Наличие вирусной инфекции было подтверждено методом выделения и очистки ВПМП с последующим просмотром препаратов в электронном микроскопе ЭМ-125. На электронограммах хорошо видны изогнутые нити ВПМП длиной около 700 нм и шириной 12-13 нм (рис. 2). Из всех исследованных нами сортов пшеницы влияние вирусной инфекции как при клиностатировании, так и в неподвижных вариантах отчетливо проявилось у раннеспелого суперкарликового сорта Апогей (рис. 3). Кстати, этот сорт и создан специально для космических полетов селекционером Б. Бакби из университета штата Юта (США).

Здоровые клиностатированные растения были более тurgесцентными, имели интенсивную зеленую окраску, образовали больше колосков. Это подтверждает биометрическими характеристиками (табл. 3), так и данными по содержанию пигментов (рис. 4). Анализируя табл. 3, мы видим, что клиностатирование существенно влияет на репродуктивную

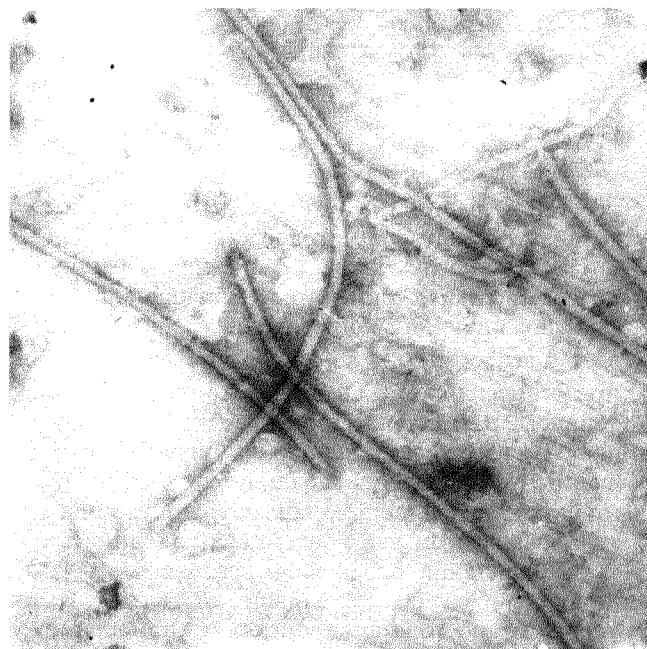


Рис. 2. Электроннограмма очищенного препарата ВПМП, инструментальное увеличение 40000

функцию растений пшеницы: количество колосков у здоровых растений уменьшается в 4-5 раз по сравнению с неподвижным контролем. Это согласуется с данными об угнетении развития генеративных органов разных растений в условиях микрогравитации [4]. Вирусная инфекция является дополнительным лимитирующим фактором: она в два раза уменьшает образование колосков в неподвижных вариантах и в пять раз — в условиях клиностатирования. Биомасса растений также является достаточно чувствительной к действию обоих факторов. Масса надземной части здоровых растений в зависимости от типа клиностатирования уменьшается в 1.2—1.8 раза, для корневой системы наблюдается ее снижение в 1.3—2.4 раза. Влияние вирус-

Таблица 3. Влияние 35-суточного клиностатирования на биометрические характеристики растений пшеницы сорта Апогей ($\nu_{\text{пл}} = 1$ об/мин, $\nu_{\text{кон}} = 2$ об/мин)

| № | Варианты | Тип клиностатирования | Количество растений | Количество колосков | Масса 1 растения, мг | |
|----|----------------|---|---------------------|---------------------|----------------------|------------------|
| | | | | | Надземная часть | Корневая система |
| 1 | Здоровые | Горизонтальное | 29 | 5 | 167.9 | 35.6 |
| 2 | Инфицированные | Горизонтальное | 29 | 1 | 118.1 | 26.1 |
| 3 | Здоровые | Вертикальное, $R = 1.0$ | 28 | 0 | 191.5 | 48.5 |
| 4 | Инфицированные | Вертикальное, $R = 1.0$ | 26 | 1 | 214.8 | 45.2 |
| 5 | Здоровые | Вертикальное, $R = 1.6$ | 26 | 5 | 286.5 | 40.2 |
| 6 | Инфицированные | Вертикальное, $R = 1.6$ | 22 | 1 | 155.2 | 47.0 |
| 7 | Здоровые | Неподвижный контейнер | 29 | 19 | 315.5 | 61.1 |
| 8 | Инфицированные | Неподвижный контейнер | 30 | 9 | 174.0 | 52.3 |
| 9 | Здоровые | Неподвижный, без контейнеров | 29 | 25 | 343.2 | 85.2 |
| 10 | Инфицированные | Неподвижный, без контейнеров HCP0.05 | 28 | 18 | 274.8 | 40.4 |
| | | | | | 15.2 | 2.8 |



Рис. 3. Рост пшеницы Апогей в клиностате «Цикл-2»: *a* — вертикальное клиностатирование $R = 1.6$. Корни растут вверх по субстрату (отрицательный геотропизм), стебли дезориентированы; *б* — выколосившиеся растения в неподвижном контроле; *в* — вертикальное клиностатирование $R = 1.0$. Корни растут вверх по субстрату; стебли — под наклоном в 45°

ной инфекции на неподвижные растения приводит к уменьшению массы в 1.2—1.8 раза для надземной части и в 1.2—2.1 раза для корневой системы. В условиях горизонтального клиностатирования вирусная инфекция дополнительно снижает массу обеих частей приблизительно на 40 %, тогда как при вертикальном клиностатировании наблюдается смена обеих знаков: как уменьшение, так и некоторые увеличение биомассы. Подобные результаты были получены и в опыте с 39-суточным выращиванием растений сорта Апогей.

Поскольку зеленые пигменты (хлорофиллы *a* и *b*) выполняют фотосинтетические функции и участвуют в процессе накопления органической массы, их содержание в листьях растений, выращиваемых при воздействии различных экологических факторов (в т. ч. в условиях невесомости), является одним из основных показателей продуктивности растений.

Анализ результатов содержания пигментов в листьях здоровых растений показал, что все типы клиностатирования приводили к уменьшению фотосинтетических пигментов по сравнению с неподвижными контролями (рис. 4). Вирусная инфекция снижала содержание пигментов как в условиях

клиностатирования, так и в неподвижных растениях. Такая реакция фотосинтетических пигментов здоровых и вирусноинфицированных растений сорта «Апогей» на условия клиностатирования и обусловила дальнейшее формирование продуктивности растений.

Полученные результаты могут быть интерпретированы с точки зрения концепции «источник—сток» [9]. Уменьшение продуктивности неподвижных растений пшеницы сорта Апогей при вирусной инфекции обусловлено появлением дополнительного потребителя метаболитов. Клиностатирование, особенно вертикальное, нарушает скоординированное функционирование всего звена метаболизма, транспортировки и использования метаболитов, погавая противоречивые сигналы на датчики авторегуляции (хлоропласти и гравирецепторы).

ВЫВОДЫ

Условия клиностатирования существенно влияют на процессы роста, развитие и репродукции растений, фотосинтетическую продуктивность. Вирусная инфекция дополнительно вмешивается в эти про-

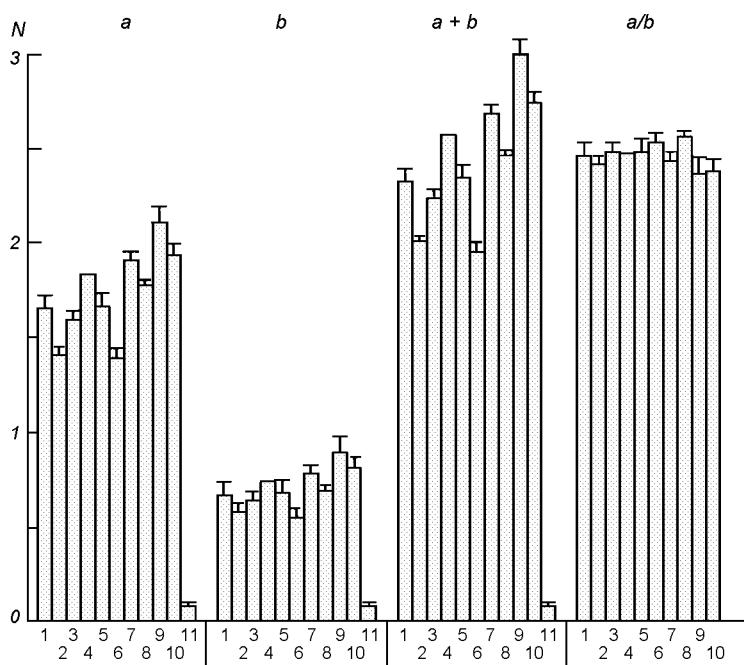


Рис. 4. Влияние 35-сут клиностатирования на содержание пигментов в листьях пшеницы «Апогей» ($v_{\text{пп}} = 1$ об/мин, $v_{\text{кон}} = 2$ об/мин). Номера столбцов соответствуют номерам вариантов в табл. 3

цессы. Фотосинтетический аппарат суперкарликового сорта Апогей имеет высокий адаптационный потенциал, который обеспечивает нормальную жизнедеятельность растительного организма в условиях моделированной микрогравитации, которая находит свое выражение в формировании генеративного органа — колоса. Сорт Апогей является перспективным для выращивания в космических оранжереях, так как другие яровые сорта (Саратовская-29, Коллективная-3) не выколяшивались за этот период выращивания. Таким образом, в условиях космических оранжерей можно выращивать пшеницу сорта Апогей, даже и ВПМП-инфицированную, которая из-за высокой специфичности вируса будет безопасна для других растений, экипажа, самих летательных аппаратов и сможет выполнить свою основную функцию — жизнеобеспечение и формирование растениями зерновой продукции.

- Кордюм Е. Л. Космічна біологія в Україні: концепція та експериментальні дані // Космічні дослідження в Україні 2000—2002. — Київ, 2002.—С. 55—66.
- Левинских М. А. Онтогенез, размножение и метаболизм высших растений в условиях космического полета: Автoref. д-ра биол. наук. — М, 2002.—49 с.
- Меркис А. И. Сила тяжести в процессе роста растений. — М., 1990.—184 с.
- Kordym E. L. Plant reproduction systems in microgravity: experimental data and hypotheses // Adv. Space Res.—1998.—21, N 8/9.—P. 1111—1120.
- Kordym E. Gravinsensitivity of Plant Cells // 23rd Annual Int. Gravitational Physiology Meeting. Abstracts. — Stockholm, Sweeden, 2002.—P. 174.

- Maffei M., et al. Plant in Space: Physiological and Biotechnological Considerations // 23rd Annual Int. Gravitational Physiology Meeting. Abstracts. — Stockholm, Sweden, 2002.—P. 119.
- Shen-Miller J., Hinchman R., Gordon S.A. Thresholds for Georesponse to Acceleration in Gravity-Compensated Avena Seedlings // Plant Physiol.—1968.—43, N 13.—P. 338—344.
- von Wettstein D. Chlorophyll-tetale und der submikroskopische Formwechsel der Plastiden // Exp. Cell Res.—1957.—12, N 3.—P. 497—506.
- Wardlow I. F. Translocation and source-sink relationship // The Biology of Crop Productivity. — New York: Acad. Press, 1980.—P. 297—339.

THE EFFECT OF ARTIFICIAL GRAVITY ON GROWTH PROCESSES AND PHOTOSYNTHETIC APPARATUS OF TRITICUM AESTIVUM L. INFECTED BY THE WHEAT STREAK MOSAIC VIRUS

L.T. Mishchenko

We studied growth processes and photosynthetic apparatus of different healthy and virus infected wheat plants under the conditions of simulating some factors of microgravity on universal clinostat. The clinostat realizes some schemes of reorientation of plants relative to the force of gravity over a vegetative period. A high specificity of wheat streak mosaic virus allows us to recommend the Apogee wheat variety for cultivation in space greenhouses because other spring varieties, Saratovska-29 and Colectivna-3, did not ear, in contrast to Apogee, over the same period of cultivation. The photosynthetic apparatus of the superdwarf Apogee wheat variety has a high adaptable potential and can carry out its basic function that is life-support and formation of grains by plants.

N. V. Rodionova¹, V. S. Oganov²

¹Shmalhausen Institute of Zoology NAS of Ukraine. Kiev, Ukraine

²Institute of Biomedical problems RAN, Moscow, Russia

Cytological mechanisms of gravity-dependent changes in a bone tissue

The study was made of main changes in the osteoblasts and osteocytes ultrastructure in bone tissue cells of monkeys (*Macaca mulatta*), flown for two weeks aboard the biosatellite BION-11. By the use of methods of electron microscopy, cytochemistry and morphometry we researched biopsy material of an iliac bone. It was established by ultrastructural indexes that under microgravity conditions in the osteoblasts population little active forms (4th morphofunctional type) prevail. Also we discovered osteoblasts of a fibroblastic type and local zones of fibrosis. In the osteocytes population we found not only typical cells but also octecytes with developed RER. Processes of osteocytic osteolysis increased.

INTRODUCTION

Medical and biological investigations aboard space satellites and stations, have shown, that bone tissue is one of the most important targets of microgravity influence on human and animal organisms. Growth and osteoplastic processes in bones are reduced and mineral filling, especially, Ca containing, and mechanical strength of bone tissue decrease. It is noted general decreasing of bone mineral mass and the tendency to redistribution of mineral substances to high districts of skeleton [3, 10].

The loss of bone substance and osteopenia make worse the mechanical properties of bones, carrying the supporting load lead to reducing of their strength and is the risk factor of bone-joint system breaches. It was established in experiments on monkeys that osteoplastic processes in skeleton bones, especially in zones with metabolically active spongiote decreases. The bone structure undergoes destruction. The spongiote in long bones reduces [3].

Structural and metabolic reconstructions in the bone tissue cells, which are still unclear, underlie these changes. The slowing of osteoplastic processes under microgravity conditions is still connected with a decrease of functional active osteoblast number, and the development of resorptive reconstructions — with osteoclast quantity increasing [3, 4]. However, the question about correlation of these processes and mechanisms of bone substance loss still remains unclear. In evaluation of cytological mechanisms of

microgravity effects developing in the bone skeleton, we don't take into account morpho-functional heterogeneity of osteoblast, osteoclast and osteocyte population [11].

The purpose of our investigation is to study cytological mechanisms of gravity-dependent changes in a bone skeleton under space flight conditions and also the clearing-up of a role of gravity in bone tissue formation.

The research task was to study ultrastructural changes in bone tissue cells of monkeys (*Macaca mulatta*), flown for two weeks aboard the biosatellite BION-11.

MATERIAL AND METHODS

Material for research (by the way of biopsia with the use of isofluorethane anesthesia) taken from a crest of an iliac bone, was fixed in 2 % glutaraldehyde on the phosphate buffer with paraformol addition (1.5 %), postfixed in 1 % osmic acid on the phosphate buffer, dehydrated in alcohols and embedded in araldite. The activity of acid phosphomonoesterase was demonstrated with the using of sodium beta -glicero-phosphate according to the Gomori method. The ultrathin sections were studied in the electron microscope «Tesla BS-500». Biosamples of monkey bones from the flight experiment, as well as ground and synchronous controls were studied. The morphometric analysis of on electron microphotograph were per-

formed by point counts with the use of Student criteria.

RESULTS AND DISCUSSION

Osteoblasts. We can judge about the intensity and peculiarities of osteogenesis in weightlessness only on the basis of the ultrastructural study of the morpho-functional cell alterations in the osteogenic zones. It is known, that the collagen and protein components of the proteoglycans are synthesized in the rough endoplasmic reticulum (RER) polysomes. The synthesis of the alkaline phosphatase occurs there too. Golgy complex (GC) participates in the sulphated glycosaminoglycans synthesis. It plays a leading role in the accumulation and transport of the proteins and polysaccharide substances, alkaline phosphatase, Ca and P compounds. The accumulation P and Ca ions took place on the RER membranes. The degree of the development and state of these organelles are important indices of differentiation and specific functional activity in the bone cells.

Our investigation demonstrated that the normal osteogenic cell population is not homogenous. Osteoblasts are distinguished by the shape, ultrastructure, biosynthetic activity and topographic relation with the mineralization zone. We distinguish four morpho-functional types (or stages) among them. In the zones of active osteogenesis there are young osteoblasts (1st type) with narrow RER channels and well-developed GC, the mature functional active osteoblasts with enlarged RER channels and cisterns (2nd type). Osteoblasts with hypertrophic RER are revealed too (3rd type). They serve for the secret accumulation. In the zones of the osteoplastic process fading osteoblasts turned into non-active state (4th type). These cells do not participate in the specific biosynthesis and have narrow RER channels, a great number of the autophagolysosomes (ATL). They lie parallel to the calcified matrix.

Using radionuclides (^3H -glycin, ^{35}S -sulphate, ^{45}Ca) we demonstrate, that the presence of osteoblasts of the different functional states is conditioned by some asynchrony in the bone matrix synthesis in the different cells. It was established, that proteoglycans and alkaline phosphatase biosynthesis, calcium compound accumulation and secretion are predominates in the 1st type osteoblasts. The synthesis of collagen proteins predominants in the 2nd type osteoblasts. The 3rd type osteoblasts secrete proteins and glycosaminoglycans. These cells are characteristic for the intensive osteogenic zones.

In the bone of animals from the flight group the

osteoblasts population is more uniform. It does not consist of the osteoblasts of different functional states, as it is characteristic for the normal osteogenesis in the ground and synchronous control. Intensive osteogenesis takes place only in some areas of the bone trabecules.

Osteoblasts like 4th-type ones are predominant in the population (See Fig. 1). They have oval or elongated forms and lie parallel to the mineralization zone, near the trabecule surface in 1-2 layers or separately. They have low nuclei-to-cytoplasm ratio and well developed RER with the narrow (0.1—0.2 mkm) channels. The state of the endoplasmic reticulum suggested about relatively low level of the bone matrix biosynthesis. Mitochondria have the dense matrix and sometimes crystalline inclusions, which demonstrate disturbance of the calcium metabolism. The nuclear chromatin is arranged on the perimeter and in the small aggregations.

The cytoplasm borders, attached to the bone matrix, have sharp countures. The narrow or slightly expanded RER channels lie compactly. In the GC the vesicles and vacuoles are predominant. There are autophagolysosomes with the RER membrane fragments. This ultrastructure picture testifies to a low biosynthetic activity in comparison with the 2nd and 3rd type osteoblasts. In the norm the collagen proteins of 4th type osteoblasts are transferred from the RER polysomes to the GC where they become bound with glycosaminoglycans and are transported to the intercellular space by vesicles. In the osteoblasts of all types the alkaline phosphatase, phosphates and calcium compounds are excreted by exocytosis, as a result of separation of the vesicles from the cytolem, and destruction of the cell surface areas. The vesicles are registered as the mineralization centres in the mineralization zone. In the flight group the mineralization zones are narrower than in the control. Functionally active 2-type osteoblasts are rare (1 per 5-10 of the 4-type osteoblasts). Osteoblasts of the 3rd type with hypertrophic endoplasmic reticulum are single cells. Table 1 presents data about the changes of the specific volume of cell organelles in osteoblasts of the animals from flight and control groups.

In the flight group the morphological pattern of the osteogenic cells shows a lower level of the growth and synthetic processes in comparison with the control. This effect is conditioned by the disturbance of the optimal balance of the bone matrix compounds biosynthesis by osteoblasts. A relatively small number of the 2 and 3 type osteoblasts in the osteogenic cells population among the predominant 4 type osteoblasts reflects a decrease of the collagen synthesis and secretion intensity in comparison with the control. It

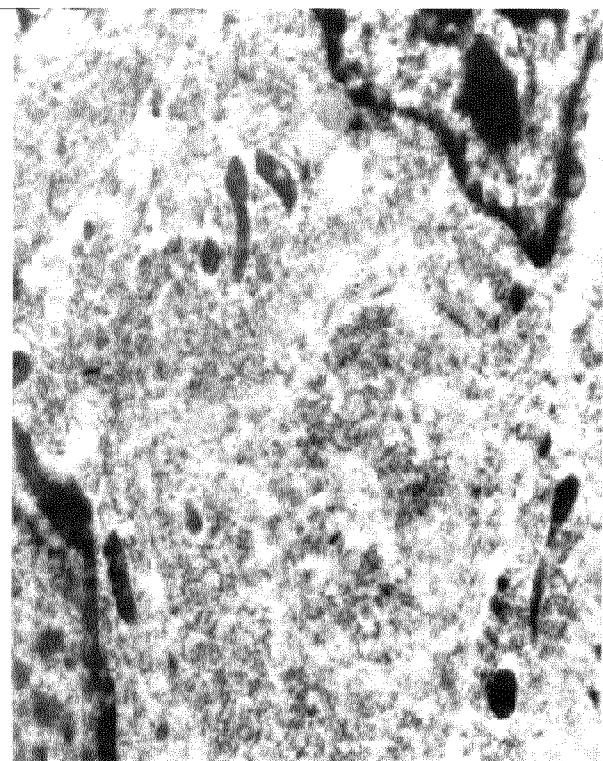


Fig. 1. The fragment of osteoblast. Flight. N — nucleus; M — mineral matrix; RER — rough endoplasmatic reticulum; GC — Golgy Complex. Electron microphotography X3000

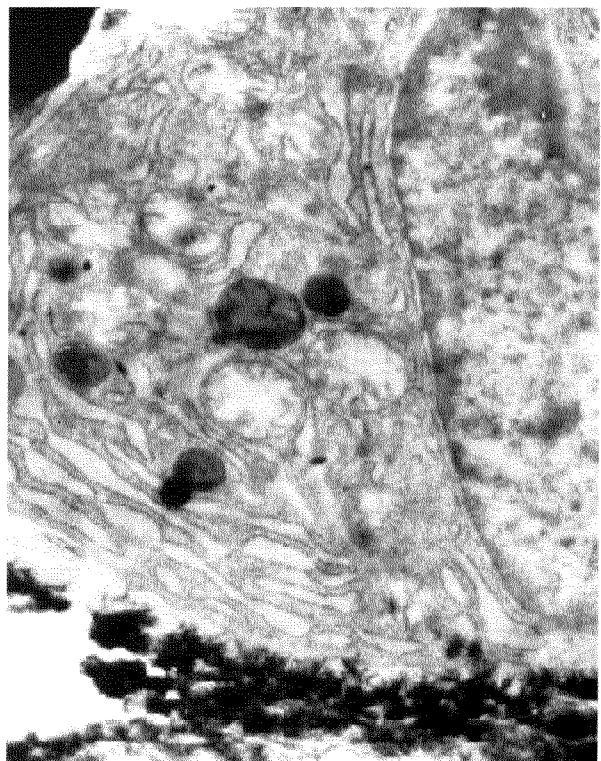


Fig. 3. The fragment of osteocyte with developed RER. Flight. See Fig. 1 for designations. Electron microphotography X15500

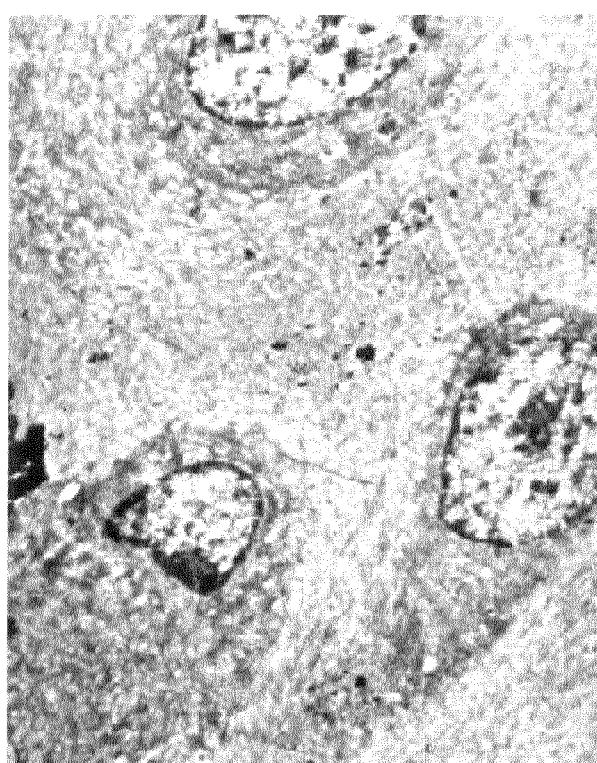


Fig. 2. The osteoblast of fibroblastic type. Flight. See Fig. 1 for designations. Electron microphotography X3500

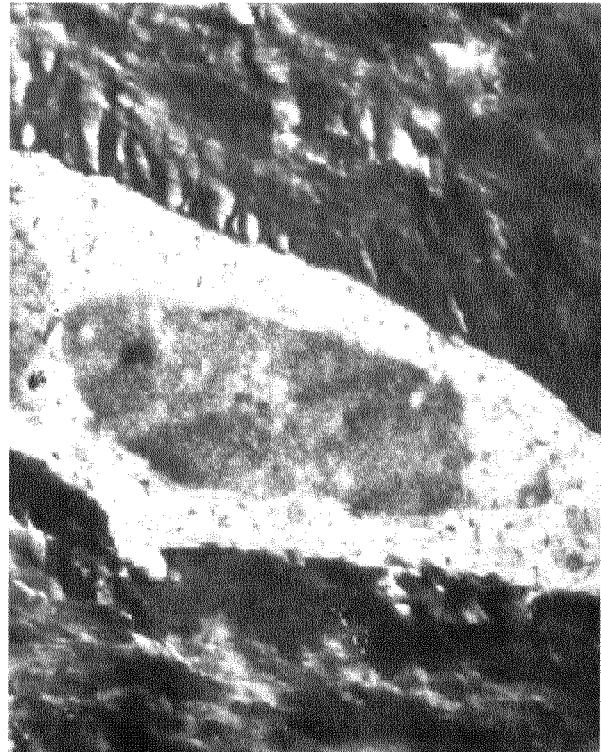


Fig. 4. Destroyed osteocyte with the picnotic nucleus. Flight. See Fig. 1 for designations. Electron microphotography X5800

seams that there are no asynchrony of the specific biosynthesis, a part of it is disconnection of the collagen proteins synthesis and glycosaminoglycans synthesis, which is characteristic for the intensive osteogenic zones.

We obtained the similar data during our investigation a microgravity influence on osteogenesis, which was conducted on the rat metaphyses and epiphyses from biosattelite «Cosmos-2044 and SLS-2. The study of the biochemical peculiarities of the osteoporosis development under the microgravity action is demonstrated alterations in the collagen and glycosaminoglycans metabolism: deceleration of the synthesis and intensification of catabolism. The comparison of these alterations with the bone structure damages (such as reduction of the Ca and P content and increase of their excretion with the biological fluids) permits to suggest the interrelation between the disturbance of the glycosaminoglycans synthesis and the mineralization state [10].

In some bone zones around the osteoblasts the large areas with collagen fibrils are revealed in biosamples from the flight group. This is evidence of the destruction of the osteogenic function in the cells and exhibits a tendency to cells conversion into the fibroblastic ones (Fig. 2). Table 2 shows data about the changes of the specific volume of cell organelles in the typical for flight osteoblasts and osteoblasts of the fibrotic type of the animals from flight and control groups.

We can suppose, that disappearance of the gravitation overload induces osteoblasts to synthesize the collagen proteins that are characteristic for the fibroblastic phenotype. In some studies the possibility of the new forms of the collagen synthesis in the bone tissue and of the specific gene expression inhibition (e.g. the osteocalcin-producing gene) is postulated under microgravity condition [9]. It leads to the disturbances of the osteoid mineralization processes and to the appearance of fibrosis zones. These phenomena may be considered as a pattern of the phenotypic diversity that reflects the adaptive processes.

Osteocytes. In the flight group, the osteocytes from animal bone samples generally preserve a typical structure similar to that of the control. Osteocytes of superficial zones of bone trabeculae are mostly oval and have short processes. The chromatin in nuclei is concentrated as granular accumulations in whole nuclei and at their periphery. However, there are differences compared to the control: some osteocytes differ in RER and GC development.

In some osteocytes, RER is well-developed, containing a net of channels and small cisterns that occupy a considerable part of the cytoplasm volume.

The GC in these osteocytes is not well-developed and its structures exhibit a compact localization. These osteocytes lie in large lacunae filled with collagen fibrils (Fig. 3). No mineralization places are observed. Such osteocytes can be destroyed during secretion of collagen proteins. This can be the result of slowing down of the transformation of osteoblasts into osteocytes in adaptive remodeling zones of bone under reduced functional loading due to flight conditions.

We can also see here the slowing down or cessation of mineralization processes of bone matrix formation. This happens probably because of the intensification of collagen protein biosynthesis of the in young osteocytes with a subsequent disturbance of the formation processes in osteocytic lacunae.

Such osteocytes are usually observed in bone tissue areas, where there is osteoblast reorganization (osteoblasts acquire a fibroblastic phenotype) and are surrounded by collagen fibrils without mineralization. We noticed this during osteoblast investigation in these biosamples. We assume that reduction of a gravity load causes some osteoblasts to synthesize proteins, typical for fibroblasts. They can synthesize new collagen isoforms in bone tissue, and inhibit specific expression of genes in microgravity conditions. This may lead to a disturbance of mineralization processes and to the appearance of zones of fibrosis [12].

Such processes, we believe, also affect the formation of osteocytes in the bone-remodeling zone under microgravity. As a result, a fibroblastic tissue is formed instead of a mineralized bone tissue in zones of adaptive remodeling.

For mature osteocytes, which are in the depth-middle of bone trabeculas, the specific volume of structures of GC, lysosome-like bodies and autophagosomes typically increases compared to the control (Fig. 4). Table 3 demonstrates data about the changes of a specific volume of the cell organelles in the mature osteocytes of the animals from flight and control groups.

The GC vesicular component is especially well-developed. It is composed of primary lysosomes ($d = 0.1\text{--}0.2 \text{ mkm}$), containing hydrolytic enzymes. Our view of this is presented below. First, the intensity autolytic processes increases in the cells, due to destruction of protein-synthesized organelles. Second, cells participate in the biosynthesis of glycosaminoglycans, which are secreted into the osteocytic lacunae space. This conclusion is confirmed by our the cytochemical and autoradiographical data: osteocytes incorporate ^{35}S -sulphate through out 30 min after its injection [11]. Third, the latter is observed: in octocytic processes, related with an increased resorption of mineralized bone matrix (osteolysis).

Table 1. A specific volume of cells organelles in osteoblasts of the crest of iliac bone of monkeys (flight and controls)

| Cell organelles | Ground-control, n = 5 | Synchronous control, n = 3 | Flight experiment, n = 2 |
|------------------|--------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| RER | 0.370 ± 0.018 | 0.367 ± 0.017 | 0.331 ± 0.011* |
| GC | 0.230 ± 0.010 | 0.221 ± 0.008 | 0.172 ± 0.021* |
| AFL | 0.007 ± 0.001 | 0.006 ± 0.002 | 0.026 ± 0.002* |
| Other structures | 0.491 ± 0.030 | 0.403 ± 0.010 | 0.469 ± 0.002 |

* The distinctions are authentic as contrasted to control ($P < 0.05$)

Table 2. A specific volume of cells organelles in typical osteoblasts and osteoblasts of fibroblastic type of crest of iliac bone of monkeys (flight)

| Cell organelles | Typical osteoblasts (4th type) | Osteoblasts of fibroblastic type |
|------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| RER | 0.331 ± 0.011 | 0.372 ± 0.019* |
| GC | 0.172 ± 0.021 | 0.215 ± 0.008* |
| AFL | 0.026 ± 0.002 | 0.012 ± 0.001* |
| Other structures | 0.469 ± 0.002 | 0.597 ± 0.010 |

* The distinctions are authentic ($P < 0.05$)

Table 3. A specific volume of cells organelles in mature osteocytes of the crest of iliac bone of monkeys (flight and controls)

| Cell organelles | Ground-control, n = 5 | Synchronous control, n = 3 | Flight experiment, n = 2 |
|------------------|--------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| GER | 0.167 ± 0.013 | 0.159 ± 0.010 | 0.143 ± 0.011* |
| GC | 0.034 ± 0.006 | 0.036 ± 0.005 | 0.052 ± 0.004* |
| AFL | 0.018 ± 0.002 | 0.019 ± 0.003 | 0.032 ± 0.003* |
| Other structures | 0.779 ± 0.003 | 0.783 ± 0.004 | 0.772 ± 0.004 |

* — the distinctions are authentic as contrasted to control ($P < 0.05$)

We also confirmed this from pictures of the destroyed mineralized matrix in periosteocytic lacunae. The bone matrix disintegrated into conglomerates. Resorption is facilitated by the lysosomal hydrolytic enzymes. We demonstrated of acid phosphatase in osteocytes and their lacunae with the help of electron cytochemistry. The lysosomal enzymes are secreted into lacunae by exocytosis. Sometimes we observe the osteoclastic resorption (fragments of the osteoclasts brush border in bone lacunae). Some of the osteocytes are destroyed in state of functional activity. Nuclei are subject to picnosis and the cytoplasm is destroyed (Fig. 4). Destroyed osteocytes also perform an osteolytic function, releasing lysosomal enzymes [7].

In flight conditions, the number of empty osteocytic lacunae and their volume increase in bone samples compared to the control. Therefore, the number of

destroyed osteocytes increases. The quantity of empty lacunae located in a histosection area increases from 5 to 7 % compared to control. Osteocytic and osteoclastic osteolysis can be considered as physiological hormone-dependant mechanisms of the regulation of mineral homeostasis [1]. This is why we suppose, that osteocytes can switch over from the osteolysis to the osteoplastic function (production of organic bone matrix) [11].

The removal of mechanical load is known to stimulate bone resorption, obviously due to cytokines production. In certain circumstances the conditions in the complex hierarchy of fluid- and ions regulation can initiate mobilization of Ca from bones. There exist morphological signs of activation of bone resorption, as one of the background of osteogenesis inhibition that has been shown mainly in experiments with animals, and in recent manned flights [8]. The metabolic hypothesis is also supported by the distinct specific topography of changes mostly observed in metabolically active trabecular bone structures. At present, wide recognition and experimental evidence receives the opinion according to which the reaction of bone tissue in space flight is to a considerable extent determined by local factors of bone metabolism [14]. In particular, there are data suggesting possible local inhibition *ex vivo* of the transformation of osteoprogenitors in preosteoblasts and differentiation of adult osteoblasts [13].

Data on changes in the bone cells activity *ex vivo* have been supported by results of the *in vitro* culture studies with a subsequent exposure to microgravity. Investigations of cultures of embryonic mice bone showed reduction of osteoid mineralization rate and glucose consumption by the culture and simultaneous increase in mineral resorption after space flight [15]. Syntheses of type-1 — collagen and alkaline phosphatase was also found to slow down in the culture of preosteoblast-like cells (line MN-7) under the influence of microgravity [2]. Culture studies of cartilaginous cells on the MIR station demonstrated shrinking of colonies, degradation of mechanical stability of the cultural structure and suppression of glucosaminoglycanes syntheses [5].

The microgravity effect is realized on a tissue level, with the involvement of local factors (peptides, as well TGF beta 2, IGF and others).

The role of gravity strain grasping structures in osteoblasts can play: mechanosensitive cationic channels; mechanochemical influences with the next remodeling of cytoskeleton as a gravity sensor [2].

In our researches we obtained data, that reflect some mechanisms, which lead to the local osteopenia (or osteoporosis) development in trabecular bone

structures of the lower part of the skeleton, increases a bone breaches risk under the space flight conditions.

1. Belanger L. F. Osteolysis: an outlook of its mechanism and causation // The Parathyroid Glands. — Chicago, Chicago Univ. Press, 1965.—P. 137—143.
2. Berezovskaya O. P., Rodionova N. V. The influence of microgravity on osteogenic cells in culture // Cytology and Genetics.—1998.—32, N 4.—P. 3—8.
3. Doty S. B., Morey-Holton E. R., Durnova G. N., Kaplansky A. S. Cosmos-1887: morphology, histochemistry and vasculature of the growing rat tibia // FASEB J.—1990.—4.—P. 16—23.
4. Duke P. J., Durnova G. N. and Montufar-Solis D. Histomorphometric and electron microscopic analyses of tibial epiphyseal plates from Cosmos 1887 rats // FASEB J.—1990.—4.—P. 29—30.
5. Freed Lisa E., Langer R., Martin I., et al. Tissue engineering of cartilage in space // Proc. Nat. Acad. Sci. USA.—1998.—94.—P. 13885—13890.
6. Grigoriev A. I., Volozin A. I., Stupakov G. P. Human mineral metabolism in weightlessness // Problems of Space Biology. — M.: Nauka, 1994.—Vol. 74.—214 p.
7. Luk S., Nopajaroonski C., Simon G. T. The ultrastructure of Cortial bone in young adult rabbits // J. Ultrastruct. Res.—1974.—46.—P. 184—205.
8. Morukov B. V., Larina I. M., Grigoriev A. I. Changes of calcium metabolism and that regulation in human during long term space flight // Human Psychology.—1998.—24, N 2.—P. 102—107.
9. Oganov V. S. Manifestation of adaptation in structural-functional changes of bone-muscle system of mammals in the space flight // Space Biology and Aerospace Medicine: Tez. of reports from X Conf. — M., Slovo, 1994.—P. 14—15.
10. Oganov V. S., Shneider V. The skeletal system // Space Biology and Medicine III. Humans in Spaceflight. — Washington. D. C., 1996.—P. 247—266.
11. Rodionova N. V. Functional morphology of cells in osteogenesis. — Kyiv, Naukova Dumka, 1989.—192 p.
12. Rodionova N. V., Shevel I. M., Oganov V. S., et al. Bone ultrastructural changes in BION-11 rhesus monkeys // J. Grav. Physiol.—2000.—7, N 1.—P. 157—162.
13. Veldhuijzen J. P., van Loon J. J. W. A. Mineral metabolism in isolated mouse long bone: opposite effect of microgravity on mineralization and resorption // Life sci. res. in Space. V Europe Symp., Proceedings. — Arcachon, France, 1994.—P. 19—24.
14. Vico L., Lafage-Proust M.-H., Alexandre C. Effects of gravitational changes on the bone system in vitro and in vivo. Summary of research issues in biomechanics and mechanical sensing // Bone.—1998.—5.—P. 95—100.
15. Zerath E. The G-factor as a tool to learn more about bone structure and function // J. Gravitat. Physiol.—1999.—6, N 1.—P. 77—80.

ЦИТОЛОГІЧНІ МЕХАНІЗМИ ГРАВІТАЦІЙНО-ЗАЛЕЖНИХ ЗМІН У КІСТКОВІЙ ТКАНИНІ

Н. В. Родіонова, В. С. Оганов

З використанням методів електронної мікроскопії, цитохімії та морфометрії проведено дослідження основних змін в остеобластах та остеоцитах клубової кістки у мавп (*Macaca mulatta*), що перебували в космосі на борту біосупутника БІОН-11 протягом двох тижнів. Біоматеріал було взято шляхом біопсії. За ультраструктурними показниками стану органел клітин було встановлено, що в умовах мікрогравітації в популяції остеобластів переважають малоактивні форми. Також нами виявлені остеобласти фібробластичного типу та локальні зони фіброзу в губчастій кістці. В популяції остеоцитів нами знайдені типові клітини, а також остеоцити з розвиненим ГЕР. В кістці посилені процеси остеоцитарного остеолізису.

Д. О. Климчук, Г. М. Мартин

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

Застосування модельних систем — рослинних клітин *in vitro* — в дослідженні гравічувтиливості організмів на клітинному рівні

Наведено результати експериментів з культурами клітин та протопластів вищих рослин, проведених в умовах мікрогравітації та в модельних умовах з використанням горизонтальних кліностатів. Показано, що рослинні клітини, виведені з-під контролю цілісного організму, чутливі до зміни сили тяжіння. Відповіді клітин на зміну сили тяжіння відбуваються, насамперед, за участю процесів росту клітин розтягом.

ВСТУП

Клітини вищих рослин в культурі *in vitro*, які позбавлені корелятивних зв'язків цілісного організму, використовуються як модельні системи для дослідження впливу різноманітних фізичних та хімічних чинників. Дослідження на рослинних клітинах *in vitro* дозволяють диференційовано підходити до оцінки значення сили тяжіння в процесах, що відбуваються безпосередньо на клітинному рівні, та її ролі в координації ростових процесів на рівні окремих тканин та органів. Клітини вищих рослин в умовах *in vitro*, зберігаючи здебільшого фізіологічні ознаки, характерні для клітин *in vivo*, залежать від фізико-хімічних умов вирощування, тому можуть змінювати рівень синтетичних процесів та набувати ознаки не властиві клітинам інтактного організму [2]. Ці особливості дають можливість використовувати їх як джерело цінних для людини речовин та відкривають перспективи для використання в космічних біотехнологіях. Тому знання закономірностей функціонування рослинних клітин *in vitro* в умовах зміненої сили тяжіння є важливим для їхнього практичного використання.

ЕКСПЕРИМЕНТИ З РОСЛИННИМИ КЛІТИНАМИ *IN VITRO*, ПРОВЕДЕНИ В УМОВАХ МІКРОГРАВІТАЦІЇ

Калусні та суспензійні культури. Незважаючи на те, що рослинні культури були об'єктами досліджень з середини 80-х років минулого століття, до

цього часу проведена обмежена кількість експериментів в умовах мікрогравітації. В одному з перших експериментів на борту космічного корабля «Союз-22» калусна культура гаплопапусу *Haplopappus gracilis* (Nutt.) A. Gray вирощувалася впродовж 9 діб в умовах температури кабіни корабля (18—22 °C при оптимальній для даного клону 28 °C), що ускладнювало інтерпретацію відставання в рості та відсутності клітин в стані проліферації, виявлених після приземлення корабля [7].

Експонування культури ізольованих клітин моркви *Daucus carota L.* впродовж 20 діб на борту біосупутника «Космос-782» показало, що соматичний ембріогенез в умовах мікрогравітації відбувається подібно до наземних. Спостерігалося лише формування більш довгих коренів у дослідних зародків. Автори на підставі чого допускають, що умови мікрогравітації індукують більш прискорене формування та розвиток органів [3, 14].

В експериментах з культурами пухлинних тканин *Daucus carota L.*, проведених на борту біосупутника «Космос-782» та «Космос-1129», було відмічено збільшення кількості клітин в радіусі меристемного осередка [1], зміни у складі ізоферментів [4], зниження інтенсивності дихання та посилення вивільнення з клітин електролітів іонів K⁺ та Na⁺, що свідчить про підвищення проникності клітинних мембран в умовах мікрогравітації [10].

В експерименті з культурою клітин томату *Lycopersicon esculentum Mill.* на борту «Космос-1667» не було відмічено суттєвих відмінностей в процесах диференціювання клітин та формування колоній,

хоча дослідні зразки характеризувалися затримкою зазначених процесів та підвищеним поліморфізмом [8]. В сусpenзійній культурі анісу *Pimpinela anisum L.*, що експонувалася впродовж 7 діб в умовах мікрогравітації, відзначалося інтенсивніше накопичення біомаси в порівнянні, ніж у наземному контролі [20]. В культурі арабідопсису *Arabidopsis thaliana (l.) Heynh.* після довготривалого (63 доби) експонування в умовах мікрогравітації відмічалося зниження кількості меристемних осередків та проліферативної активності, а також зменшення розмірів клітин у порівнянні з наземним контролем [15].

Аналіз ростових параметрів калусних культур гаплопапусу та гороху, що експонувалися впродовж 12 та 25 діб на борту «Союз-ТМ» та «Біон-10» відповідно, показав тенденцію до зниження накопичення біомаси та вмісту сухої маси. Суттєвіші відмінності спостерігались в 25-добовому експерименті з культурою гаплопапусу. Вміст біомаси та маси сухої речовини в дослідних зразках в середньому складав відповідно 57 % та 78 % від наземних контролів. Відомо, що швидкість росту калусу залежить від маси експлантанту. Оскільки суттєве зменшення оптимальної маси експлантанту може привести до зупинки росту калусу (без цілеспрямованого підбору складу поживного середовища), при плануванні експерименту з культурою гаплопапусу припускалося, що калуси з субоптимальною масою будуть уразливіші до дії будь-якого несприятливого фактору. Отримані дані підтвердили таке припущення: дослідні зразки з масою трансплантантів 200 мг більше відрізнялися від відповідних наземних контролів, ніж зразки з масою 300 мг [5].

Приріст біомаси та вміст сухої маси калусів в 12-добовому експерименті з культурою гороху складали 76 % та 84 % від контрольних відповідно. Індекс росту культури в умовах мікрогравітації та наземного контролю становив 2.2 та 2.9 відповідно [5]. Очевидно, що відмінності між варіантами в експериментах з культурами гаплопапусу та гороху в більшій мірі стосуються показників приросту біомаси і в менший — накопичення сухої маси. Зіставлення цих даних дозволяє визначати, за рахунок яких процесів відбуваються зміни їхнього росту: інтенсивність проліферації чи інтенсивність росту розтягом. В обох експериментах дослідні зразки відзначалися зниженням відносного вмісту води у порівнянні з наземними контролями, що може бути зумовлено зниженням інтенсивності росту клітин розтягом.

За даними електронно-мікроскопічних досліджень клітини гаплопапусу та гороху дослідних популяцій порівняно з наземними контролями ха-

рактеризувалися нижчим вмістом рибосом в гіалоплазмі. У стромі частини аміlopластів клітин гаплопапусу відмічалися проламелярні тіла та скучення фітоферетину, які не виявлялися в органелах клітин наземних контролів. Особливістю структурної організації пластидного апарату клітин гороху була наявність в стромі лейкопластів запасного крохмалю, який за даними морфометричного аналізу виявлявся у 42.9 % органел дослідних клітин порівняно з 90.5 % — для контрольних клітин [5].

Експерименти з протопластами вищих рослин. Відсутність у протопластах клітинної оболонки дозволяє вивчати біохімічні процеси, пов'язані з її регенерацією. З цією метою на борту біосупутника «Космос-2044» впродовж 14 діб проводився експеримент «Протодин». Протопласти виділялися із 8-добових проростків рапсу *Brassica napus L.* та культури клітин *Daucus carota L.* Проведений через 12 год після приземлення біосупутника аналіз показав, що життєздатність клітин (визначалася за допомогою флуоресцентної мікроскопії та добавленого до середовища інкубації протопластів флуоресциндиацетату) в середньому становила 63 % в дослідних варіантах та 68 % в наземних контролях. 75 % протопластів дослідних варіантів та 80 % контрольних регенерували клітинну оболонку. Об'єм клітин після їх осадження становив 66 % та 80 % від контрольних для рапсу та моркви відповідно. Кількісний аналіз складу основних компонентів клітинної оболонки за допомогою радіоізотопного методу показав, що загальний вміст целюлози в 2.2 рази, а геміцелюлози — у три рази був нижчим в порівнянні з наземними контролями. Вміст білку та активність пероксидаз становили також приблизно 50 % від контрольних [11, 13, 19].

Згідно з проведеним ультраструктурним аналізом переважна частина протопластів дослідних та контрольних варіантів регенерувала клітинну оболонку. Оболонки клітин в умовах мікрогравітації були вдвічі тоншими, ніж у наземних контролях. Дослідні зразки характеризувалися також нижчим вмістом цистерн ендоплазматичного ретикулуму, зменшенням кількості крист в мітохондріях та збільшенням об'єму ліпідних крапель в цитоплазмі клітин [13]. Разом з тим при подальшому субкультуруванні спостерігався нормальний ріст культур, хоча інтенсивність росту культур обох наземних варіантів була вищою порівняно з культурами, які експонувалися в умовах мікрогравітації. На підставі отриманих даних автори вважають, що фактори космічного польоту, в першу чергу мікрогравітація, можуть спричинювати зміни основних морфофункциональних характеристик рослинних клітин [9].

В наступному експерименті, проведенному з протопластами проростків рапсу та культури клітин моркви в умовах мікрогравітації, зразки експонувалися на бортовій центрифузі при навантаженні 1g, фіксувалися на орбіті. Проведений аналіз показав, що популяція клітин у дослідних зразках характеризувалася меншим об'ємом після осадження клітин, меншою кількістю клітин в клітинних агрегатах, зниженнем активності пероксидази. Клітини в умовах мікрогравітації були більшими за розміром, більш вакуолізовані та характеризувалися нижчим вмістом крохмалю в пластидах, ніж клітини у бортовій центрифузі чи наземному контролі [18].

МОДЕЛЬНІ ЕКСПЕРИМЕНТИ

В численних модельних експериментах, що проводилися в Інституті ботаніки ім. Н. Г. Холодного НАН України, застосовувалися горизонтальні кліностати зі швидкістю обертання від 2 до 50 об/хв та центрифуги. Об'єктами дослідження були калусні культури гаплопапусу, гороху, квасолі, сої та культура ізольованих клітин гаплопапусу, які вирощувалися на агаризованих середовищах. Дослідження проводилися в динаміці розвитку субкультур з 7 по 35 добу через 7-добовий інтервал з визначенням показників приросту сирої маси, вмісту сухої маси, відносного вмісту води в клітинах, кількості клітин на грам біомаси, міtotичної активності, кількості хромосом та ультраструктурної організації клітин тощо [6].

В умовах повільного (2 об/хв) кліностатування ростові показники калусної культури гаплопапусу в динаміці розвитку були близькими до контрольних. В умовах кліностатування зі швидкістю 50 об/хв накопичення біомаси в динаміці пасажу в середньому на 20 % переважало контрольне. Нагромадження сухої маси при цьому залишалося близьким до контрольних показників. Інтенсивніше накопичення біомаси супроводжувалося відносно вищим вмістом води в клітинах. Кількість клітин на грам біомаси в динаміці пасажу в умовах кліностатування з швидкістю 50 об/хв була меншою порівняно з іншими варіантами [6]. Останні дані свідчать про те, що розміри клітин в умовах кліностатування (50 об/хв) збільшувалися порівняно з контрольними, та інтенсифікація приросту біомаси була зумовлена більш інтенсивним ростом клітин розтягом.

У зв'язку з тим, що біологічна дія кліностата залежить від швидкості обертання та від просторового положення біологічного об'єкта [12], поряд з кліностатуванням, при якому пробірки з калусною

Залежність реакції клітин калусної культури гаплопапусу від їхнього просторового положення на кліностаті (50 об/хв)

| Варіант | Сира маса, мг | Суха маса, мг | Сира маса/суха маса |
|---------------------------|---------------|---------------|---------------------|
| Кліностатування I | 641 ± 52 | 21 ± 2 | 31, 0 ± 0,6, |
| Кліностатування II | 491 ± 57 | 19 ± 2 | 25, 4 ± 0,9, |
| Контроль (горизонтальний) | 605 ± 59 | 21 ± 2 | 29, 3 ± 0,6, |
| Контроль (вертикальний) | 542 ± 48 | 19 ± 2 | 28, 6 ± 0,5 |

Примітка: кліностатування I — пробірки розташовані паралельно осі обертання кліностата; кліностатування II — пробірки розташовані перпендикулярно до осі обертання кліностата

тканиною орієнтуються паралельно осі обертання кліностата, нами проводилося кліностатування з перпендикулярним розташуванням пробірок до осі обертання кліностата. Калусна тканина вирощувалася впродовж 14 діб в темряві в культиваторів пробірках 110×12 мм. Реакція клітин, пробірки яких орієнтувалися перпендикулярно до осі обертання кліностата, відрізнялася від реакції клітин, пробірки яких орієнтувалися паралельно осі обертання кліностата. Накопичення біомаси при цьому було нижчим, ніж у контролях, а вміст сухої маси залишався в межах контрольних значень (таблиця). Видно, що реакції клітин на просторову орієнтацію в умовах кліностатування стосуються переважно накопичення біомаси, варіації якого вказують на зв'язок з процесами, які контролюють ріст клітин розтягом. Ці дані ілюструють важливість просторового положення клітин, ростові реакції яких можуть бути зумовлені їхньою фізіологічною полярністю.

Наведені експериментальні дані, отримані на культурах тканин, клітин та протопластів вищих рослин в умовах мікрогравітації та кліностатування, показують, що метаболізм клітин, позбавлених контролю цілісного організму, чутливий до зміни сили тяжіння. Ці дані спонукають до розгляду можливих гравірецепторних механізмів клітин, виведених з-під контролю цілісного організму, що могли сформуватися в процесі еволюційного розвитку. Один із таких механізмів може асоціюватися зі структурною неоднорідністю цитоплазматичної мембрани рослинних клітин [16, 17], зміни просторового положення яких супроводжуються ростовими реакціями, насамперед змінами інтенсивності росту клітин розтягом.

ПЕРСПЕКТИВНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для поглиблення уявлень про механізми гравічувтивості рослинних клітин заплановано експери-

мент «Мембрана», який входить в перелік експериментів, що проводитимуться на установці «Біолабораторія» на російському сегменті Міжнародної космічної станції. В ролі модельних систем запропоновані культури поодиноких клітин та протопластів, що вирощуються plating-методом. Ці моделі дозволяють вивчати функціонування рослинних клітин в «чистому вигляді», оскільки позбавлені як координаційних зв'язків цілісного організму, так і зв'язків розглянутих вище тканинних культур. Культивування клітин та протопластів в тонкому (≈ 1 мм) шарі агарового середовища робить можливим їхні мікроскопічні спостереження при незначних збільшеннях інвертованого мікроскопа. Однією з переваг цього методу є можливість аналізу та реєстрації поведінки індивідуальних клітин та протопластів на початкових етапах росту культури, можливість одержати кількісні характеристики таких важливих процесів, як інтенсивність формування клітинної стінки, проліферації, росту розтягом, диференціювання клітин, формування клітинних агрегатів тощо.

1. Бейкер Р., Бейкер Б., Слиют Л. Развитие и анатомия опухоли. Биологические исследования на биоспутнике «Космос». — М.: Наука, 1979.—С. 137—142.
2. Бутенко Р. Г., Воробьев А. С., Носов А. М., Князьков И. Е. Синтез, накопление и локализация стероидных гликозидов в клетках разных штаммов *Dioscorea deltoidea* Wall // Физиология растений.—1992.—39.—С. 907—912.
3. Бутенко Р. Г. Дмитриева Н. Н., Онгко В. и др. Влияние невесомости на соматический эмбриогенез // Биологические исследования на биоспутниках «Космос». — М.: Наука, 1979.—С. 118—125.
4. Клайншустер Л., Магон К. Активность глутаминсингтазы. Биологические исследования на биоспутнике «Космос». — М.: Наука, 1979.—С. 147—148.
5. Климчук Д. А., Таирбеков М. Г., Мартын Г. М. Рост и ультраструктурная организация клеток растений *in vitro* в условиях микрогравитации // Цитология и генетика.—1995.—29, № 4.—С. 15—21.
6. Кордюм Е. Л., Сытник К. М., Беляевская Н. Л. и др. Современные проблемы космической клеточной фитобиологии. — М.: Наука, 1994.—73.—С. 54—71.
7. Сидоренко П. Г., Машинский А. Л. Влияние условий космического полета на клетки высших растений в культуре *in vitro* // Космич. исследования на Украине.—1978.—С. 39—42.

8. Таирбеков М. Г. Исследования с культурой клеток растений в космосе // Биоспутники «Космос»: Тез. докл. междунар. симпоз. — М., 1991.—С. 119—120.
9. Таирбеков М. Г. Гравитационная биология клетки. — М.: ISBN, 1997.—127 с.
10. Таирбеков М. Г., Воронков Л. А., Гужова Н. В. Некоторые физиолого-биохимические характеристики галловой опухоли моркови, развившейся в невесомости // Космич. биол. и авиакосм. мед.—1982.—№ 2.—С. 45—48.
11. Таирбеков М. Г., Кордюм Е. Л., Климчук Д. А. и др. Развитие изолированных растительных клеток в условиях космического полета (эксперимент «Протопласт») // Изв. РАН. Сер. В.—1992.—№ 1.—С. 5—17.
12. Brown A. H., Dahl A. O., Chapman D. K. Limitation on the use of the horizontal clinostat as gravity compensatory // Plant Physiol.—1976.—58, N 2.—P. 127—130.
13. Klimchuk D. A., Kordyum E. L., Danelvich L. A., et al. Structural and functional organization of regenerated plant protoplasts exposed to microgravity on Biokosmos 9 // Adv. Space Res.—1992.—12.—P. 133—140.
14. Krikorian A. D., Steward F. C. Morphogenetic response of cultured totipotent cells of carrot (*Daucus carota* var. *carota*) and zero gravity // Science.—1978.—200.—P. 67—68.
15. Merkys A., Laurinavichus R., Kenstaviciene P., Nechitailo G. S. The study of the role of gravity on the processes of dedifferentiation of plant cells // 27th COSPAR Plenary Meet. — Helsinki, 1988.—P. 368.
16. Moore R., Evans M. How roots perceive and respond to gravity // Amer. J. Bot.—1986.—73.—P. 574—587.
17. Pickard B. G. Early events in geotropism of seedling shoots // Annu. Rev. Plant Physiol.—1985.—36.—P. 55—75.
18. Rasmussen O., Baggerud C., Larsen H., et al. The effect of 8 days of microgravity on regeneration of intact plants from protoplasts // Physiol. Plantarum.—1994.—92.—P. 404—411.
19. Rasmussen O., Klimchuk D. A., Kordyum E. L., et al. The effect of exposure to microgravity on the development and structural organization of plant protoplasts flown on Biokosmos 9 // Physiol. Plantarum.—1992.—84.—P. 162—170.
20. Theimer R. R., Kudielka R. A., Rosch I. Induction of somatic embryogenesis in anise in microgravity // Naturwissenschaften.—1986.—73, N 7.—P. 442—443.

THE USE OF THE MODEL SYSTEMS, PLANT CELLS IN VITRO, IN STUDYING GRAVISENSITIVITY OF ORGANISMS AT CELLULAR LEVEL

D. O. Klymchuk, G. M. Martyn

The results of the experiments with cell and protoplast cultures under spaceflight and clinorotation conditions are presented. It is shown that the metabolism of plant cells *in vitro* is sensitive to altered gravity. Mainly, the response of the cells to altered gravity is accompanied by changes in cell expansion growth.

**N. O. Kozyrovska, G. L. Kovtunovych, O. V. Lar,
M. V. Kovalchuk, V. V. Negruska, O. S. Korniichuk,
I. S. Rogutskyi, A. P. Alpatov, V. A. Kordyum**

Institute of Molecular Biology & Genetics of the National Academy of Sciences

Modeling molecular plant-bacteria interactions for flight experiment

The ability to grow plants in space self-perpetuating gardens is an actual for providing an advanced life support system for humans during extended missions. However, space factors affect expression of the genes regulated by the systems, sensing environmental signals. In space a risk of genetic rearrangements is increased, and some changes in bacterial DNA expected. As a consequence, bacteria may exhibit novel characters, e.g., pathogenicity. During the previous our experience we have determined an increase of internal colonization of the rice roots with bacteria in space flight. To understand the data and to predict acquisition of increased aggressiveness towards the plant-host by bacteria, molecular-genetic plant-bacteria interactions affected with physical factors will be simulated. Genes coding for bacterial pectinases provide a suitable model for studies of well-integrated objectives, concerning plant-bacteria interactions.

INTRODUCTION

Data from flight experiments show that future astronauts can grow multiple generations of plants in space [24]. Such self-perpetuating gardens will be a practical necessity for humans as they explore and colonize the solar system. Hardy space plants could provide fresh food, oxygen, and even clean water for explorers living for long stretches aboard orbiting outposts. Nevertheless, many questions remain how cosmic factors may influence plant growth and development, on the one hand, and microorganisms that are always present both on the surface and in plant interior, on the other hand. Peculiarity of growth and development of bacteria in microgravity being investigated within many years by Ukrainian researchers at the USSR spaceships and stations [11, 12, 18, 25]. Our data exhibited the unusual interrelationships between eu- and cyanobacteria and a plant host in space flight [12, 25]. The increased accessibility of plants to microorganisms may mean that the plants are not only more susceptible to recognized pathogens, but they may also be susceptible to pathogenic colonization by opportunistic pathogens, i.e., orga-

nisms that are not normally pathogens to the plant [17]. However, previous experiments concerned to physiology of microorganisms, and molecular mechanisms of their nonstandard functioning under cosmic factors have not been investigated. In the space environment living organisms are under the stress conditions, and there is a risk of genomic alterations [2] and changes in gene expression [1, 31]. Cosmic conditions affect cell microenvironment and signal transduction through membranes [26], and it may result in induction of some genes regulated by the systems, sensing environmental signals, and, as a consequence, bacteria may exhibit novel characters, e.g. phytopathogenicity. It seems to be important to study molecular plant-bacteria interactions in a context of growing plants in space greenhouses for providing an advanced life support system for humans during extended missions away from earth.

The purpose of this research is a theoretical substantiation and experimental examination of a model that can be used for studying some bacterial molecular genetic processes in a confined system (microcosm) in following integrated tasks: (1) a mode of expression of genes encoding pectinolysis in bacteria;

(2) a putative variation of pectinase genes in a response to cosmic factors; (3) a transfer of plasmid/transposon in bacterial populations colonizing a plant. Additional objectives might be incorporated in the same model system.

MODELING MOLECULAR PLANT-BACTERIA INTERACTIONS IN GROUND EXPERIMENTS

Examining a mode of expression of pectinase genes of a plant-associated bacterium in microcosm experiments. Our previous data exhibited the unusual interrelationships between endophytic enterobacteria and a plant host (rice) in a short-term space flight on the Mir Orbital Station [25]. The enlarged intercellular spaces in the plant roots packed by bacteria have been revealed, and it could be a result of the induction of genes, coding for plant cell wall degrading enzymes. It was supposed that plant-cell-wall-degrading enzymes of experimental bacteria were developing activity during space flight. Pectinolytic activity of the bacterium used in the experiment, *Klebsiella oxytoca* [15, 19], was being screened. *K. oxytoca* was able to depolymerize a polymer of polygalacturonic acid pectin, however, the level of activity was low [13]. The mode of expression of the pectinase encoding genes may be different in earth and in flight experiments.

The *pelX* and *pehX* genes from bacterium *K. oxytoca* VN13, encoding a pectate lyase and polygalacturonase, respectively, were isolated by expression in *E. coli* [14, 16]. Nucleotide sequence analysis of the regions containing *pelX* and *pehX* indicated no homology with the other bacterial sequences deposited in public gene banks. Analysis of the deduced PelX polypeptide revealed 77 % of identity to exopolygalacturonate lyase of *Erwinia chrysanthemi* and *Pectobacterium chrysanthemi*, 46 % of *Bacillus halodurans* and 49 % of identity to putative polysaccharide lyase of *Streptomyces coelicolor* A3. PehX disclosed homology to exopolygalacturonases of *Yersinia enterocolitica*, *Erwinia chrysanthemi* and *Pectobacterium chrysanthemi* with a 52, 50 and 48 % of identity, respectively.

A reporter gene fusion technology will be used to monitor pectate lyase or polygalacturonase gene expression by the quantitative image analysis [3]. We have constructed the translation fusion of the *pelX* promoter with the coding part of the *lacZ* reporter gene derived from pDK5 [10] (Fig. 1). Comparative studies of expression of the *pelX-lacZ* fusion in *E. coli* and *K. oxytoca* VN13, using such inducers as a plant extract or polygalacturonate, showed a low consti-

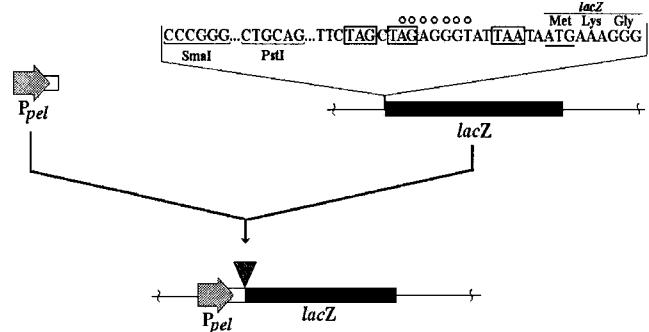


Fig. 1. Scheme of the *pelX* gene promoter with the *lacZ* gene coding part fusion. Stop codons that terminate translation marked with frames, the ribosome binding site — with circles. The beginning of the *lacZ* gene and the translated amino acid sequence is displayed.

tutive level of the *pelX* expression in *K. oxytoca* VN13 as well incomplete derepression effected by inducers. It may be feasible to monitor changes in gene expression after low-dose radiation exposure and other physiological stresses in ground experiments. For flight experiments the fluorescent proteins (encoding green or red fluorescent proteins, *gfp* and *rfp*, correspondingly) are the advantageous reporters because leave information about the tagged gene (and organism, accordingly) even the organism is dead, so this reporter system is a suitable for a study of impact of cosmic factors on gene expression after returning experimental material back on earth.

Detection of putative variation in the model *pelX* and *pehX* genes. The numbers of space flight experiments exhibit the impact of space radiation on living organisms. The experiments performed on board of satellites indicate that the space conditions may enhance the mutation frequency of certain genes in bacteria [7, 8, 30]. The experience of Space Station Mir within 1992—1999 exhibited increase in an overpatching of physiological characters of bacteria and micromycetes that resulted in destroying materials and constructions [27]. Among factors influenced this was permanent low dose cosmic ionizing irradiation. It is difficult to compare ground studies with space experiments because of complexity of the space radiation environment, however, it was concluded that neutrons caused stronger effect on microorganisms than gamma-rays. The short-term Space Shuttle experiments did not reveal a difference between the space and control bacterial samples [6]. The objective of this study is to establish effect of low dose radiation on genetic diversity of endophytic bacterium *K. oxytoca* in a context of its behavior on/in the plant roots. The idea is to assess genetic

heterogeneity of the *pehX* and *pelX* genes, as well repetitive sequences. For molecular analyses of the assumed changes in the mentioned genes of *K. oxytoca* total DNA will be isolated from flight and ground (control) microcosm. A thermal gradient gel electrophoresis (TGGE) analysis of the *pehX* and *pelX* genes, as well ERIC (enterobacterial repetitive intergenic consensus) elements directly amplified from total DNA, to determine changes in composition of known gene sequences will be used. TGGE is based on the separation of gene sequences directly amplified from DNA by using conserved primers in a denaturing gel according to their melting point [21]. The amplified DNA will be also subjected to PCR-RFLP (restriction fragment-length polymorphism) analysis with primers designed for the pectinase genes.

Simulating the genetic exchange between bacteria in the wheat rhizosphere. Conjugation is an important gene transfer mechanism for bacteria in the rhizosphere [29], and the genes responsible for mating-aggregate formation and DNA transfer are often carried by self-transmissible plasmids. Such conjugative plasmids are known to be capable of recruiting chromosomal genes as well as mobilizing non-self-transmissible plasmids and hence can provide genetic plasticity to bacterial populations. Plasmid transfer between introduced bacteria via conjugation in soil has been unequivocally shown in numerous microcosm ground experiments with different mating combinations, including taxonomically diverse ones. In particular, rhizospheres of crop plants, such as wheat, provide conditions conducive to conjugal plasmid transfer between bacterial inhabitants [28]. However, there is a paucity of knowledge concerning an impact of cosmic factors on conjugation. Exchange of genetic elements and gene transfer between bacteria in confined systems has to be taken into account, and risks for genetically modified organisms (GMO) evaluated. In such systems there is no normal competition for survival, and risk of GMO to populate appropriate niche without selective pressure is a high. Transposon migration between bacteria in the plant rhizosphere of orbital greenhouses may be higher than in the natural environment. Experiments on simulating of plasmid/transposon transfer between bacteria in microcosm and evaluation its migration will be performed, using the model system.

The natural conjugal gene flow in gram-negative bacterial pairs in the wheat rhizosphere in different substrates will be studied in ground experiments. The plasmids were constructed in this study for long-term microcosm experiments. Scheme of the plasmid construction is represented on Fig. 2. Transfer of plasmids pSUP2021 [23] and pSUPARS from *E. coli* to

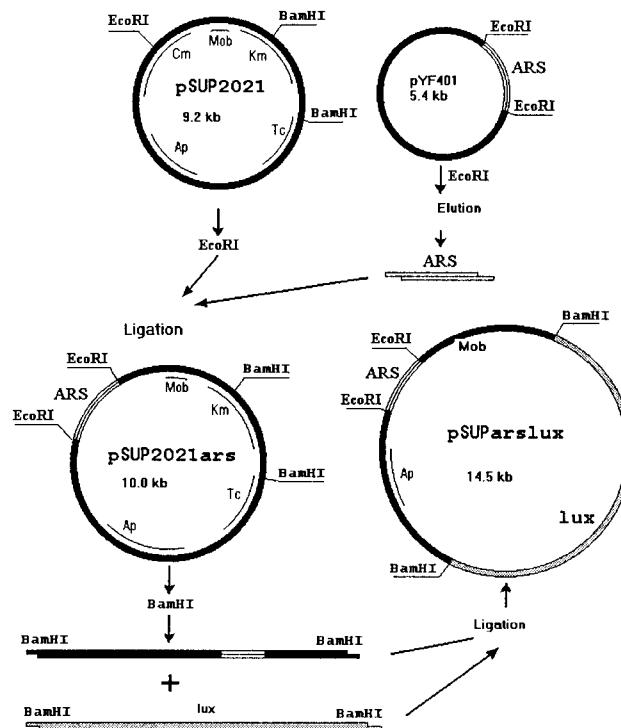


Fig. 2. Scheme of the plasmids pSUPARS and pSUPLux construction. A 1.2 kb fragment of autonomously replicative sequences (ARS) of maize (pYF401, [22]) was inserted into pSUP2021. The resulted plasmid pSUPARS ligated with the *lux* operon of *Photobacterium leiognathi*.

K. oxytoca, *Agrobacterium radiobacter*, *Pseudomonas fluorescens* bacteria varied at frequencies of 2×10^{-3} — 2.0×10^{-7} transconjugant per donor. A stability of the plasmids after 100 generations in *A. radiobacter* was for pSUPARS — 99 %, pARSLux — 67 %. pSUP2021 segregated from *A. radiobacter* after 20 generations. This data exhibited a high stability of the recombinant plasmids conferring the ARS fragment. In microcosm experiments the plasmids were transferred within a day with frequency (1 — 3×10^{-5} CFU g⁻¹). Transposon migration will be simulated among bacteria of the rhizosphere population, using a suicide vectors pCAM120 [32] and pUT/Km [4]. Two-parental matings between *E. coli*, conferring mTn5SsgusA20 or Tn5/Km, and two strains of bacteria — *K. oxytoca* and *P. fluorescens* have been performed on plates. Frequency of transposition of mTn5SsgusA20 and Tn5/Km was evaluated in recipient strains as 10^{-6} CFU/ml.

Analysis of endophytic bacterial communities of the plant. Analysis of literature cited revealed data concerning a location of bacteria inside of potato tissue [5, 20] and agronomic crops [33]. Endophytic

bacteria populated interior of roots and stems belong to known already bacterial species as well to nonidentified on a reason of unculturability. Some of isolates have high homology with human pathogens *Staphylococcus* and *Mycobacterium* [33]. Such an unexpected finding has to be taken into account in monitoring bacterial populations in space gardens. On the other hand, endophytes as competitive bacteria can be used for growing plants as probiotics and biofertilizer. For example, the *Azoarcus* grass endophytes contribute fixed nitrogen to the plant in an unculturable state [9]. The use of such a bacterium for plant fertilizing is a profitable in a contrast to mineral fertilizers that weigh and occupy space for storage.

Our data show that composition of the endophytic isolates derived from axenically grown plantlets from tissue culture is likely influenced by the plant inoculation with bacterial component. Since the incidence of endophytic bacteria composition is affected by ecological factors, the impact of microgravity and other cosmic factors on the endophytic bacterial community composition must be studied. The diversity of endophytic bacterial populations of potato is planned to be assessed using a combination of dilution plating of plant macerates and direct PCR-TGGE on the basis of DNA extracted from plants.

Detection of bacteria on/into the plant. Detection of bacteria on/into the plant and estimation of survival of experimental bacteria in the rhizosphere can be performed with PCR DNA fingerprinting, histochemical GUS assay or fluorescent microscopy of infected roots. For ground experiments we used bioluminescence method for estimation of colonization pattern and survival of bacteria in the rhizosphere when colonization pattern of the plant in microcosms can be visualized by naked eyes. Our data exhibited that *K. oxytoca* (pSUPPLux) colonized roots of a non-inoculated wheat within 10–12 days (mineral substrate) or 18 days (the agar medium), being introduced into the microcosm with inoculated seeds of a wheat mixed in 1 : 1 with noninoculated ones. The *gus* reporter gene gives information about location of bacteria on/in the plant-host. Transposon mTn5SsgusA20 was used to tag the model bacterial strains. The transposon-conferring *K. oxytoca* and *P. fluorescens* have been selected as indicator bacteria to monitor its behavior under cosmic conditions. Transposon-induced derivatives have been estimated in relations with the plant as described in [32]. On the base of data obtained conclusion has been made that in microcosm in aseptic conditions transposants of *K. oxytoca* and *P. fluorescens* were able to enter the plant roots. Transposants were primarily observed in junctures between epidermal cells, how-

ever, very often bacteria could be seen in the central part of the root and also in vessels.

We are grateful to Tamara Voznyuk and Vladimir Andrienko for technical assistance. The work is supported by grant N 16 of Science &Technology Center in Ukraine.

1. Amundson S. A., Bittner M., Meltzer P., Trent J., Fornace A. Induction of gene expression as a monitor of exposure to ionizing radiation // Radiat. Res.—2001.—156.—P. 657—661.
2. Bridges B. A. Radiation and germline mutation at repeat sequences: are we in the middle of a paradigm shift? // Radiat. Res.—2001.—156.—P. 631—641.
3. Chalfie M., Tu Y., Euckirchen G., et al. Green fluorescent protein as a marker of gene expression // Science.—1994.—263.—P. 802—805.
4. de Lorenzo V., Herrero M., Jakubzik U., et al. Mini-Tn5 transposon derivatives for insertion mutagenesis, promoter probing, and chromosomal insertion of cloned DNA in gram-negative Eubacteria // J. Bacteriol.—1990.—172.—P. 6568—6572.
5. Garbeva P., van Overbeek L. S., van Vuurd W. L., van Elsas J. D. Analysis of endophytic bacterial communities of potato and denaturing gradient gel electrophoresis (DGGE) of 16S rDNA based PCR fragments // Microb. Ecol.—2001.—41.—P. 369—383.
6. Harada K., Sugahara T., Ohnishi T., et al. Inhibition in a microgravity environment of the recovery of *Escherichia coli* cells damaged by heavy ion beams during the NASDA ISS phase I program of NASA Shuttle/Mir mission no. 6 // Int. J. Mol. Med.—1998.—1.—P. 817—822.
7. Horneck G. Impact of microgravity on radiobiological processes and efficiency of DNA repair // Mutat. Res.—1999.—6.—P. 221—228.
8. Horneck G., Schafer M., Baltschukat K., et al. Cell inactivation, repair and mutation induction in bacteria after heavy ion exposure: results from experiments at accelerators and in space // Adv. Space Res.—1989.—9.—P. 105—116.
9. Hurek T., Handley L. L., Reinhold-Hurek B., Piche Y. *Azoarcus* grass endophytes contribute fixed nitrogen to the plant in an unculturable state // Molec. Plant-Microbe Interactions.—2002.—15.—P. 233—242.
10. Kleiner D., Wyatt P., Merrick M. Construction of multicopy expression vectors for regulated overproduction of proteins in *Klebsiella pneumoniae* and other enteric bacteria // J. Gen. Microbiol.—1988.—134.—P. 1779—1784.
11. Kordyum V. A., Man'ko V. G., Popova A. F., et al. Changes in symbiotic and associative interrelations in a higher plant-bacterial system during flight // Adv. Space Res.—1983.—3.—P. 265—268, (In Russian).
12. Kordyum V. A., Polivoda L. V., Mashinsky A. L., Kon'shyn N. I. Impact of space flight on developing organisms, in Growth of microorganisms out of Earth / Ed. by V. A. Kordyum. — Kiev: Naukova dumka, 1978.—P. 64—114 (In Russian).
13. Kovtunovych G., Lar O., Kamalova S., et al. Correlation between pectate lyase activity and ability to penetrate into plant tissues by diazotrophic *Klebsiella oxytoca* VN 13 // Plant and Soil.—1999.—260.—P. 1—6.
14. Kovtunovych G., Lar O., Kozyrovska N. Cloning and structural analysis of the *Klebsiella oxytoca* VN13 *peh* gene // Biopolymery i klityna.—2000.—16.—P. 356—363 (In Ukrainian).
15. Kozyrovska N., Alexeyev M., Kovtunovych G., et al. Survival of *Klebsiella oxytoca* VN13 engineered to bioluminescence on barley roots during plant vegetation // Microbial Releases.—

- 1994.—2.—P. 262—265.
16. Lar O., Kovtunovych G., Kozyrovska N. Cloning and analysis of the gene encoding pectate lyase (*pelX*) of *Klebsiella oxytoca* VN13 // Biopolymery i klityna.—2002.—18.—P. 417—422 (In Ukrainian).
 17. Leach J. E., Ruba-White M., Sun Q., et al. Plants, plant pathogens, and microgravity — a deadly trio // Gravit. Space Biol. Bull.—2001.—149.—P. 15—23.
 18. Man'ko V. G., Kordyum V. A., Vorobiova L. V., et al. Dynamics of the *Proteus vulgaris* growth in the apparatus ROST-4M2 at space station Salut-7 // Space biology and biotechnology / Ed. by K. M. Sytnik. — Kiev: Naukova dumka, 1986.—P. 3—9 (In Russian).
 19. Nguyen T., Ton T., Tarasenko V., Kozyrovska N. Nitrogen-fixing bacteria colonize of the rice root xylem // Biopolymery i klityna.—1989.—5.—P. 97—99 (In Ukrainian).
 20. Reiter B., Pfeifer U., Schwab H., Sessitsch A. Response of endophytic bacteria communities in potato plants to infection with *Erwinia carotovora* subsp. *atroseptica* // Appl. Environ. Microbiol.—2002.—68.—P. 2261—2268.
 21. Rosenbaum V., Riesner D. Temperature-gradient gel electrophoresis — thermodynamic analysis of nucleic acids and proteins in purified form and in cellular extracts // Biophys. Chem.—1987.—26.—P. 235—246.
 22. Shulzhenko V., Kordyum V. Cloning of the maize sequences autonomously replicated in *Saccharomyces cerevisiae* // Biopolymery i klityna.—1987.—3.—P. 270—274 (In Russian).
 23. Simon R., Pfiefer U., Puhler A. A broad host range mobilization system for *in vivo* genetic engineering: transposon mutagenesis in Gram-negative bacteria // Bio/Technology.—1983.—1.—P. 784—794.
 24. Stankovic B., Link B. M., Zhou W. Arabidopsis rocket science (Abstract) // 34 COSPAR, Houston, 10—19 October, 2002.
 25. Tarasenko V. A., Kozyrovska N., Nechitailo G. S., et al. Cytological aspects of relationships of eucaryotes and nitrogen-fixing cyanobacteria in artificial association under microgravity (Abstract) // 28 COSPAR, Hague, The Netherlands, 1990.—P. 55.
 26. Thevenet D., D'Ari R., Bouloc P. The SIGNAL experiment in BIORACK: *Escherichia coli* in microgravity // J. Biotechnol.—1996.—47.—P. 89—97.
 27. Tzetlin V. V., Deshevaya E., Novikova N., et al. An impact of a low dose irradiation on microbial community of space stations (Abstract) // Second Ukrainian conference on prospective space investigations, September 21—27, 2002, Katzyveli, Ukraine. — Katzyveli, 2002.—P. 158 (In Russian).
 28. van Elsas J. D., Trevors J. T., Starodub M. E. Bacterial conjugation between pseudomonads in the rhizosphere of wheat // FEMS Microbiol. Ecol.—1988.—53.—P. 299—306.
 29. Wellington E. M. H., van Elsas J. D. Genetic interactions among microorganisms in the natural environment. — Oxford, United Kingdom, Pergamon Press, 1992.
 30. Weng M., Li J., Gao H., et al. Mutation induced by space conditions in *Escherichia coli* strains // Space Med. Eng. (Beijing).—1998.—11.—P. 245—248.
 31. Wilson J. W., Ramamurthy R., Porwollik S., et al. Microarray analysis identifies *Salmonella* genes belonging to the low-shear modeled microgravity regulon // Proc. Natl. Acad. Sci. USA.—2002.—99.—P. 13807—13812.
 32. Wilson K. J., Sessitsch A., Corbo J. C., et al. β -Glucuronidase (GUS) transports for ecological and genetic studies of rhizobia and other Gram-negative bacteria // Microbiology.—1995.—141.—P. 1691—1705.
 33. Zinniel D. K., Lambrecht P., Harris N. B., et al. Isolation and characterization of endophytic colonizing bacteria from agro-nomic crops and prairie plants // Appl. Environ. Microbiol.—2002.—68.—P. 2198—2208.

МОДЕЛЮВАННЯ МОЛЕКУЛЯРНИХ ВЗАЄМОДІЙ БАКТЕРІЙ З РОСЛИНАМИ ДЛЯ ПОЛІТНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

**Н. О. Козировська, Г. Л. Ковтунович, О. В. Лар,
М. В. Ковальчук, В. В. Негруцька, О. С. Корнійчук,
І. С. Рогуцький, А. П. Аллатов, В. А. Кордин**

Вирощування рослин у космічних відновлювальних оранжереях є актуальним для підтримки систем життєзабезпечення космонавтів у тривалих польотах. Однак відомо, що космічні фактори впливають на експресію генів, що регулюються системами, чутливими до цих факторів. На борту космічних апаратів ризик генетичних перебудов підвищується, тому слід очікувати деяких змін у ДНК. Як наслідок, бактерії можуть проявляти нові властивості, наприклад фітопатогенність. З попереднього досліду ми знаємо, що бактерії посилюють внутрішню колонізацію коренів рису під час космічного польоту. Для розуміння цих даних, а також передбачення підвищеної агресивності бактерій по відношенню до рослини-господаря необхідно на моделях вивчати молекулярно-генетичні взаємодії рослин з бактеріями, які відбуваються під впливом фізичних факторів. Гени, що кодують бактеріальні пектинази, є зручною моделлю для вирішення взаємопов'язаних завдань стосовно взаємодій рослини з бактеріями.

Л. В. Козак

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Зміна турбулентних процесів у нижній термосфері при проходженні внутрішніх гравітаційних хвиль

Проведено моделювання впливу внутрішніх гравітаційних хвиль (ВГХ) на розвиток та інтенсифікацію турбулентності на висотах мезопаузи та нижньої термосфери. Розглядається поширення ВГХ в горизонтально стратифікованій неізотермічній атмосфері. Порівнюються коефіцієнти турбулентності при фонових значеннях температури і вітру та з урахуванням збурень параметрів атмосфери при проходженні хвилі. За фонові значення температури і вітру бралися значення, отримані супутником UARS. Відмічається зміна коефіцієнтів турбулентності в'язкості і температуропровідності в порівняно тонких шарах атмосфери при проходженні ВГХ.

ВСТУП

Робота проведена в рамках інтерпретації експериментальних результатів, отриманих при аналізі супутникових спостережень температури і системи вітрів над областями сильних землетрусів [7]. Спостережене збільшення температури в області мезопаузи і її зменшення вище даної області над землетрусами можна пояснити підвищенням турбулентності. Турбулентність нижньої термосфери, з одного боку, може зумовити перенос тепла (а значить і охолодження термосфери), а з іншого — викликати нагрівання газу за рахунок дисипації кінетичної енергії турбулентних рухів. Наявність внутрішніх гравітаційних хвиль (ВГХ) в даній області може привести до зміни (виникнення) турбулентності. Джерелами ВГХ в епіцентральній області можуть бути довгоперіодичні коливання земної кори, нестационарне газовиділення, локальний парниковий ефект [6]. Одним із проявів сейсмічної активності є холодна дегазація Землі [2]. Подрібнення окремих блоків земної кори при активізації їхнього відносного руху призводить до збільшення тріщинуватості, а отже, і збільшення кількості газів, які виділяються в приземний шар атмосфери. Серед цих газів є значна кількість парниковых — CO_2 , CH_4 тощо. Підвищення їхньої концентрації в області землетрусу призводить до утворення локального парникового ефекту, і локального нагрівання

приземного шару атмосфери. Така теплова аномалія, при досить ефективній модуляції, наприклад, сейсмогравітаційними пульсаціями Землі [8], може бути джерелом ВГХ [5].

ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ ТУРБУЛЕНТНОСТІ ПРИ ПРОХОДЖЕННІ ВГХ

Розповсюджуючись вгору в адіабатичному режимі, ВГХ нарощує свою амплітуду по мірі зменшення густини атмосфери [10]. На висотах біля 100 км умови адіабатичності розповсюдження хвилі порушуються. Такий ефект найчастіше призводить до утворення порівняно тонких турбулентних шарів [14, 15]. В тропосфері час життя таких шарів великий, і вони можуть існувати довго після «виключення» хвильового джерела турбулізації.

За оцінку часу виродження турбулентності приймають $\tau_t \sim e_T/\varepsilon_d$, де e_T — густина турбулентної енергії, ε_d — питома швидкість в'язкої дисипації турбулентної енергії. За даними [11] на висотах 90—110 км для маломасштабної турбулентності $e_T \approx 20—50 \text{ м}^2/\text{с}^2$ і $\varepsilon_d \approx 0.5 — 1 \text{ м}^2/\text{с}^3$, тому $\tau_t \sim 20—100 \text{ с}$. Час розвитку турбулентності — $e_T/\varepsilon_s \sim e_T/\varepsilon_d \sim \tau_t$, оскільки $\varepsilon_s \sim \varepsilon_d$, (де ε_s — швидкість передачі енергії від середнього потоку до турбулентних вихорів за рахунок зсуву швидкості).

Тому при розгляді турбулізуючого впливу припливів і низькочастотних ВГХ вважають, що турбулентність встигає пристосуватися до повільно змінних хвильових профілів вітру і температури.

Для чисельних розрахунків зміни турбулентності на висотах мезопаузи використовувалися спектральні рівняння турбулентності. В роботах [9, 12] із використанням стаціонарних рівнянь для спектральних функцій ізотропних турбулентних полів швидкості і температури в термічно стратифікованій атмосфері при наявності сили тяжіння і напівемпіричних положень Ламлі — Шура отримано вирази для феноменологічних коефіцієнтів турбулентної в'язкості $K_v(k)$ і температуропровідності $K_T(k)$, які створюються сукупністю вихорів із хвильовими числами в діапазоні від k_0 до k_η :

$$K_v = C_u \Omega [k_0^{-4/3} - k_\eta^{-4/3}]^{3/2}, \quad (1)$$

$$K_T = K_v \text{Pr}^{-1}. \quad (2)$$

Тут Pr — турбулентне число Прандтля ($\text{Pr} = C_u/C_T$, C_u , C_T — константи), Ω визначається формулою

$$\Omega^2 = C_u (\partial \bar{u} / \partial z)^2 - C_T g \bar{T}^{-1} (\partial \bar{T} / \partial z + g / c_p),$$

де $\partial \bar{u} / \partial z$, $\partial \bar{T} / \partial z$ — зміни швидкості вітру і температури з висотою, g — прискорення вільного падіння, c_p — теплоємність при постійному тиску.

Область спектру розвиненої турбулентності («інерційний інтервал») лежить в діапазоні $k_0 \ll k \ll k_\eta$, де $k_0 = 2\pi(L_0)^{-1}$. Просторові масштаби турбулентності не більші від товщини шару L_0 (в іоносфері це значення 10–20 км [14]). В атмосфері k_η спадає з висотою, і залежну від висоти границю інерційного інтервалу визначають із співвідношення [14]

$$k_\eta = \frac{1}{8} \left[g \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial z} + \frac{g}{c_p} \right) \frac{1}{\nu T} \right]^{1/2}, \quad (3)$$

де кінематичний коефіцієнт в'язкості ν визначався за формулою

$$\nu = \mu / \rho, \mu = k_0 T_0^{2/3} / M [0.25(9\gamma - 5)c_v], \quad (4)$$

де $k_0 = 0.015$, T_0 — фонова температура, M — середня молекулярна маса повітря, C_v — теплоємність при постійному об'ємі.

Вплив вертикальних зсувів вітру і температури на турбулентний режим у приведених вище співвідношеннях описується величиною Ω , що входить до рівнянь (1)–(3). Ці формули мають фізичний зміст лише при $\Omega^2 > 0$, що відповідає умові $\text{Rf} < 1$,

де $\text{Rf} = \text{Ri}/\text{Pr}$, і $\text{Ri} = g \bar{T}^{-1} (\partial \bar{T} / \partial z + g / c_p) / (\partial \bar{u} / \partial z)^2$ — динамічне і градієнтне число Річардсона відповідно.

При наявності хвилі u та T представляють у вигляді $\bar{u} = U_0 + u$, $\bar{T} = T_0 + T'$, де U_0 , T_0 — фонові значення; u , T' — хвильові складові. Тоді вираз для Ω має вигляд [12]:

$$\Omega^2 = C_u \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)^2 \left(1 - \frac{\text{Ri}}{\text{Pr}} \right), \quad (5)$$

$$\text{Ri} = \frac{g [\partial(T_0 + T') / \partial z + g / c_p]}{T (\partial \bar{u} / \partial z)^2},$$

Отже, щоб визначити вплив ВГХ на турбулентність, потрібно знати зміни вітру і температури, викликані проходженням внутрішніх гравітаційних хвиль.

ВПЛИВ ВНУТРІШНІХ ГРАВІТАЦІЙНИХ ХВИЛЬ НА ПАРАМЕТРИ АТМОСФЕРИ

У стратифікованій атмосфері на великих висотах визначальну роль у формуванні вертикальної структури ВГХ відіграють молекулярна в'язкість та тепlopровідність. В нижній атмосфері цими дисипативними процесами можна знехтувати, принаймні до висот 120 км [1]. Тому розглядалися рівняння гідродинаміки для неізотермічної атмосфери без врахування в'язкості і тепlopровідності (для спрощення розглядалася двовимірна задача $\mathbf{v} = \mathbf{v}(U(x, z)W(x, z))$, де U , W — горизонтальна і вертикальна складові).

Вважаючи, що в незбуреному стані нейтральна атмосфера горизонтально стратифікована, ми розбивали її на ряд тонких ізотермічних шарів. В кожному такому шарі характеристики гравітаційних хвиль описуються дисперсійним рівнянням [10]:

$$k_z^2 = (\omega_g^2 / \omega^2) k_x^2 - k_x^2 - 1/4H^2 + \omega^2 / C_s^2, \quad (6)$$

де k_x і k_z — горизонтальні і вертикальні хвильові числа, осі z і x напрямлені в зеніт і на південь відповідно, ω — кутова частота хвилі, C_s — швидкість звуку, γ — відношення питомих теплоємностей при постійному тиску і постійному об'ємі, $\omega_g^2 = (\gamma - 1)g^2 / C_s^2$ — частота Брента—Ваясяля.

Крім того, мають місце поляризаційні співвідношення:

$$\frac{U}{X} = \frac{W}{Z} = \frac{T'}{T_0 \Theta} \propto \exp(i\omega t - ik_x x - ik_z z + z/2H), \quad (7)$$

де

$$X = \omega k_x C_s^2 (k_z - i(1 - \gamma/2)g / C_s^2),$$

$$Z = \omega(\omega^2 - k_x^2 C_s^2),$$

$$\Theta = (\gamma - 1)[\omega^2 k_z - ig[k_x^2 - \gamma \omega^2 / 2C_s^2]].$$

Для шару з номером n вертикальна швидкість частинок у хвилі визначалась за формулою

$$W_{z_n} = W_n \exp[(z - z_n)/2H_n] \exp[i(\omega t - k_x z - k_{z_n}(z - z_n))], \quad (8)$$

де W_n — комплексна стала, $z_{n+1} - z_n = h$; h — крок по висоті (товщина ізотермічного шару). Для розрахунків використовувалося значення $h = 100$ м. Розв'язки в сусідніх шарах зшивалися умовою рівності вертикальних зміщень на границі між шарами, що еквівалентно умові $W_{z_{n+1}} = W_{z_n}$. Тому за заданим значенням вертикальної швидкості частинок на нижній границі і для заданих ω і k_x можна розрахувати значення вертикальної швидкості в усіх шарах. А використовуючи поляризаційні співвідношення (7), можемо визначити усі параметри хвилі, зокрема T' та U . Найбільший турбулізуючий вплив мають короткі ВГХ $k_x^2 \gg 1/4H^2$. Початкове значення приймалося таким чином, щоб на висоті 120 км, де спостерігаються рухомі іоносферні збурення, величина збурення вертикального вітру складала 5 м/с [16]. Для розрахунків використовувалися значення $W_{z_0} = 0.001$ м/с, $k_x = 3 \cdot 10^{-5}$ м⁻¹, $T = 60$ хв і $T = 90$ хв.

Фонові значення температури для розрахунку збурень вітру і температури, викликані проходженням ВГХ, взято з моделі CIRA-72 [13].

Розраховані вертикальні структури збурень горизонтальної складової швидкості вітру U та температури T' приведено на рис. 1.

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ВГХ НА ПАРАМЕТРИ ФОНОВОЇ ТУРБУЛЕНТНОСТІ

Для знаходження коефіцієнтів турбулентної в'язкості $K_v(k)$ і температуропровідності $K_T(k)$ використовувалися значення температури і вітру, виміряні на супутнику UARS (U_0 і T_0) та отримані значення збурених параметрів атмосфери при проходженні ВГХ. Точки, що відповідають спостережним даним, були згладжені за допомогою інтерполяції сплайнами. Використані для аналізу графіки значень температури і вітру приведені на рис. 2.

Значення коефіцієнта турбулентної в'язкості K_v приведено на рис. 3. Для розрахунків використовувалося значення числа Прандтля $Pr = 6$, та $C_u = 0.1$.

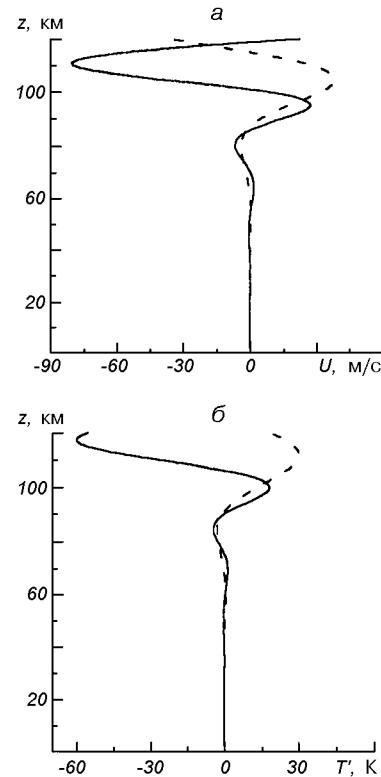


Рис. 1. Висотні профілі збурень температури та горизонтальної швидкості нейтрального газу при проходженні хвилі для періоду $T = 90$ хв (суцільна крива), та $T = 60$ хв (штрихова крива) в момент часу $t = t_0 + T/2$.

Як видно з рис. 3, ВГХ можуть як змінювати турбулентні рухи в тонких шарах атмосфери (розміри 3—5 км), так і викликати їх (рис. 3, σ). Також виявилося, що чисельне значення коефіцієнтів турбулентності залежить і від того, які масштаби турбулентності розглядаються.

ВИСНОВКИ

Серед отриманих результатів можна відмітити зміну коефіцієнтів турбулентної в'язкості і температуропровідності при проходженні ВГХ. Підсилення турбулентних рухів на рівні мезопаузи та нижньої термосфери інтенсифікує процеси турбулентного переносу, що в умовах значних вертикальних градієнтів температури призводить до реконструкції термічної та хімічної структури атмосфери. Модельні розрахунки [3, 4] показали, що в нижній термосфері ($h < 100$ —105 км) при збільшенні інтенсивності турбулентних рухів температура атмосфе-

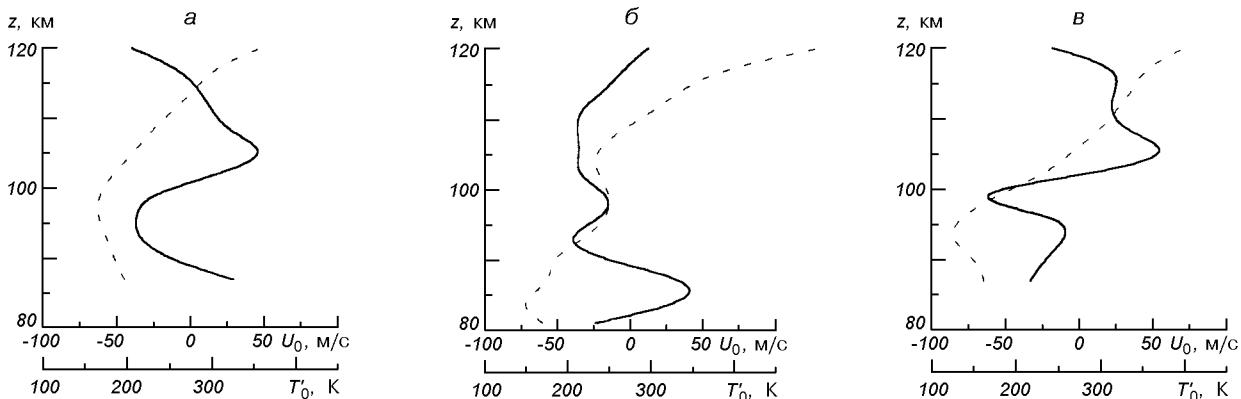


Рис. 2. Висотні профілі вітру (сucciльна крива) і температури (штрихова крива), отримані супутником UARS над областями: а) $\varphi = 0^\circ$, $\lambda = 140.30^\circ$, 24/10/1992, б) $\varphi = 36^\circ$, $\lambda = 137.24^\circ$, 25/10/1992, в) $\varphi = 4^\circ$, $\lambda = 146.35^\circ$, 26/11/1992

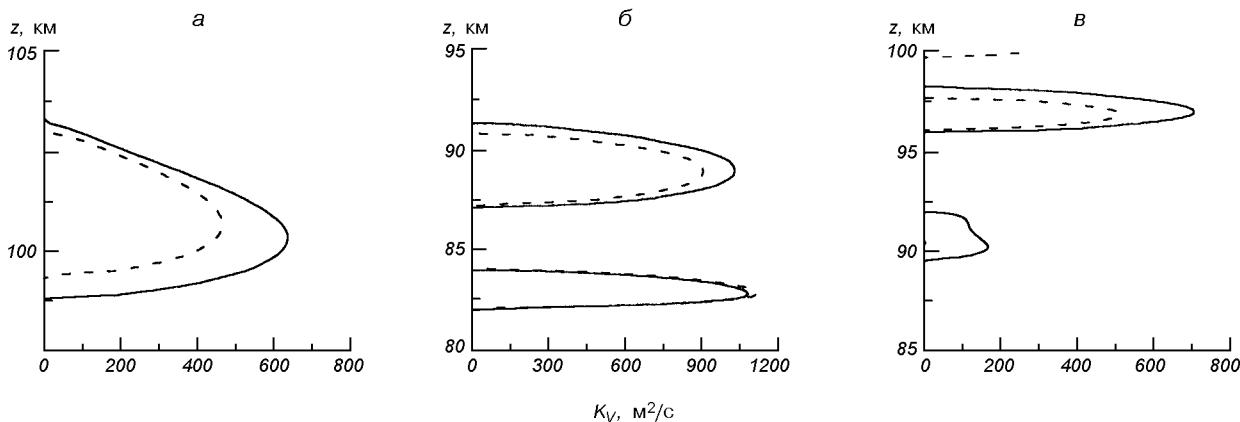


Рис. 3. Значення турбулентної в'язкості K_v (m^2/s). Штрихова крива відповідає значенню K_v при фонових значеннях температури і вітру, розглянутих на рис. 2. Сucciльна — значенням K_v із врахуванням збурень, викликаних хвилею: а) для значень хвилі з періодом $T = 60$ і $t = t_0 + T/2$, б) — для значень хвилі з періодом $T = 60$ і $t = t_0 + T$, в) — для значень хвилі з періодом $T = 90$ і $t = t_0 + T/2$

ри збільшується, а на $h \geq 105$ км — зменшується. Дані супутникових спостережень температурних змін над осередками землетрусів показали переважно саме такий характер реконструкції висотних температурних профілів [7], підтвердживши тим самим концепцію турбулентної інтенсифікації на висотах мезопаузи та нижньої термосфери.

Робота виконана при частковій підтримці INTAS грант № 99-0078 і INTAS-CNES грант № 97-1769.

1. Блингмайер Е. Р., Ивановский А. И., Погорельцев А. И. Формирование вертикальной структуры акусто-гравитационных волн процессами молекулярной вязкости и теплопроводности // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.—1990.—26, № 7.—С. 682—692.
2. Войтов Г. И., Добропольский И. И. Химические и изотропно-углеродные нестабильности потоков природных газов в

сейсмически активных областях // Физика Земли.—1994.—№ 3.—С. 20—31.

3. Гордиец Б. Ф., Куликов Ю. Н. О роли турбулентности и инфракрасного излучения в тепловом балансе нижней термосфери. Инфракрасная спектроскопия космического вещества и свойства среды в космосе / Под ред. Н. Г. Басова. — М.: Наука, 1982.—С. 29—47.—(Труды ФИАН, Т. 130).
4. Гордиец Б. Ф., Куликов Ю. Н., Марков М. Н., Маров М. Я. Численное моделирование нагрева и охлаждения газа в околосземном космическом пространстве. Инфракрасная спектроскопия космического вещества и свойства среды в космосе / Под ред. Н. Г. Басова. — М.: Наука, 1982.—С. 3—28.—(Труды ФИАН, Т. 130).
5. Гохберг М. Б., Некрасов А. К., Шалимов С. Л. О влиянии нестабильного выхода парниковых газов в сейсмически активных регионах на ионосферу // Физика Земли.—1996, № 8.—С. 52—55.
6. Гохберг М. Б., Шалимов С. Л. Литосферно-ионосферная связь и ее моделирование // Российский журнал наук о Земле.—2000.—2, № 1.—С. 3—26.
7. Дзюбенко Н. И., Ивченко В. Н., Козак Л. В. Вариации температуры над очагами землетрясений по измерениям

- спутника UARS // Космічна наука і технологія.—2001.—7, № 5/6.—С. 94—99.
8. Линьков Е. М., Петрова Л. Н., Осипов К. С. Сейсмогравитационные колебания Земли и связанные с ними возмущения атмосферы // Докл. АН СССР.—1990.—313, № 5.—С. 1095—1098.
 9. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика. — М.: Наука, 1965.—Ч. 2.—639 с.
 10. Хайнс К. О. Атмосферные гравитационные волны. Термосферная циркуляция. — М.: Мир, 1975.—С. 85—99.
 11. Хананян А. А. Экспериментальные оценки характеристик мелкомасштабной турбулентности в средней атмосфере // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.—1988.—24, № 1.—С. 95—98.
 12. Юдин В. А., Гаврилов Н. М. Полуэмпирическая модель замыкания системы уравнений для гравитационных волн и мелкомасштабной турбулентности в верхней атмосфере // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.—1989.—25, № 10.—С. 1026—1032.
 13. CIRA-72: COSPAR International Reference Atmosphere. — Berlin: Akademie-Verlag, 1972.—450 р.
 14. Hocking W. K. Turbulence in the altitude region 80—120 km // Adv. Space Res.—1990.—10, N 12.—P. 153—161.
 15. Hodges R. R. Jr. Eddy diffusion coefficients due to instabilities in internal gravity waves // J. Geophys. Res.—1969.—74.—P. 4087—4090.
 16. Yamamoto Mamoru, Tsuda Toshitaka, Kato Susumu, et al. A saturated inertia gravity wave in the mesosphere observed by the middle and upper atmosphere radar // J. Geophys. Res.—1987.—92.—P. 11993—11999.

CHANGES OF TURBULENCE PROCESSES IN THERMOSPHERE IN THE PASSAGE OF INNER GRAVITY WAVES

L. V. Kozak

We modelled the influence of inner gravity waves (IGW) on the turbulence intensification at the mesopause and lower thermosphere heights. The propagation of IGW in the horizontally stratified non-isothermal atmosphere is considered. We compared the turbulence coefficients both for the temperature and wind background values and when the disturbances of atmosphere parameters in the passage of a wave were taken into account. The UARS satellite data were taken as the temperature and wind background values. We noted the changes of the coefficients of turbulent viscosity and temperature conductivity in moderately thin layers of the atmosphere in the passage of IGW.

О. К. Черемных, Д. П. Демкив

Інститут космічних досліджень НАН України та НКА України, Київ

Взаємодействие с МГД-модами в магнитосферах высокоэнергетических частиц Земли

Для дипольної конфігурації магнітного поля Землі отримано рівняння балонних збурень з урахуванням тиску гарячих закритих частинок. Найдено, що гарячі частинки впливають на межу стійкості балонних коливань, а також при певних умовах можуть як стабілізувати, так і дестабілізувати збурення плазми.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время проблема изучения колебаний плазмы во внутренней магнитосфере Земли приобрела большую актуальность в связи с попытками построить модель магнитосферной суббури. Суббури, то есть процесс взрывоподобного освобождения накопленной в магнитосфере энергии, является фундаментальным и интереснейшим явлением в околоземном пространстве. В процессе его изучения было установлено, что очагом развития неустойчивости, вызывающей суббури, является именно внутренняя магнитосфера. Большим успехом в описании плазменных возмущений стало создание теории баллонных возмущений [1—3]. Тем не менее, для описания развития суббури она была непригодна по тем причинам, что давала заниженные значения устойчивости по β и не объясняла времени возникновения потоков быстрых частиц. Как показывают спутниковые исследования (рис. 1), вследствие эффективной накачки в магнитосферу высокоэнергетических частиц солнечного ветра во время фазы роста суббури давление плазмы существенно растет по сравнению со спокойным периодом. В то же время система остается устойчивой некоторое время даже при таких значениях β , которые превышают границу устойчивости баллонных возмущений.

В связи с этим ниже предложена модификация теории баллонных возмущений, которая учитывает

эффекты, обусловленные наличием горячего компонента. Данные по энергетическим спектрам частиц (рис. 2) во время магнитной активности указывают на существование двух отдельных популяций в магнитосферной плазме: холодного компонента с энергетическим пиком около 20 кэВ и горячих частиц с максимумом плотности энергии на 150 кэВ. Поэтому холодная плазма может описываться в приближении одножидкостной МГД, а к горячей плазме МГД описание неприменимо, поэтому используется кинетический подход.

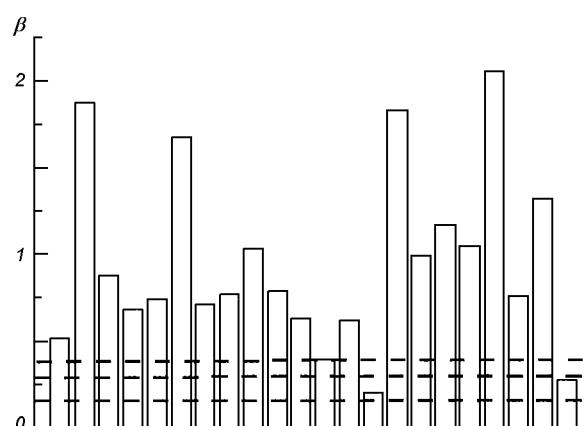


Рис. 1. Рост давления плазмы для 22 суббури по данным спутника GEOS2. Штриховая линия — давление в спокойные периоды

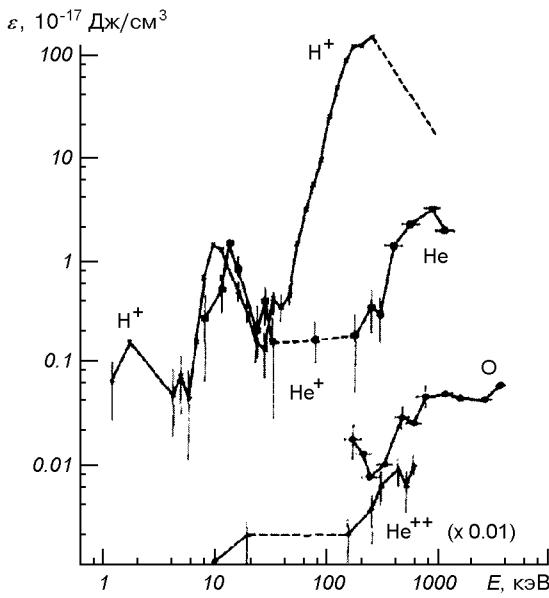


Рис. 2. Спектр энергий частиц во внутренней магнитосфере по данным спутника AMPTE/CCE

УРАВНЕНИЕ БАЛЛОНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Опишем процесс модификации уравнений МГД колебаний с учетом давления горячего компонента плазмы. В приближении одножидкостной МГД исходным для дальнейшего анализа является уравнение малых колебаний

$$\rho \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \nabla(\gamma p \operatorname{div} \xi + \xi \nabla p) - \nabla p_h + \delta j \times B + j \times \delta B, \quad (1)$$

где ξ — вектор смещения элементарного объема плазмы

$$v = \frac{\partial \xi}{\partial t}. \quad (2)$$

В уравнении (1) учтено давление горячих частиц p_h без указания его конкретного вида. Символ δ обозначает возмущенные величины.

В дальнейшем будет удобно перейти к потоковым координатам, описываемым магнитной меткой ψ , которая обладает следующими свойствами:

$$B \nabla \psi = 0, \quad j \nabla \psi = 0. \quad (3)$$

Также возмущенные величины удобно выразить через вектор T :

$$T = \operatorname{rot}[\xi \times B] + \frac{j \times \nabla \psi}{|\nabla \psi|^2} \xi \nabla \psi. \quad (4)$$

Раскладывая T и ξ по ортогональным векторам

$$T = T_1 \nabla \psi + T_2 \frac{B \times \nabla \psi}{|\nabla \psi|^2} - T_3 B, \quad (5)$$

$$\xi = \xi \frac{\nabla \psi}{|\nabla \psi|^2} + \eta \frac{B \times \nabla \psi}{B^2} + \tau \frac{B}{B^2}, \quad (6)$$

после ряда сложных преобразований получаем следующую систему уравнений, описывающую возмущения магнитосферной плазмы в общем случае:

$$\frac{\rho}{|\nabla \psi|^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \alpha_s V T_3 \nabla \psi + \frac{(V T_0 - \nabla p_h) \nabla \psi}{|\nabla \psi|^2} + K \xi + V T_1 B + T_2 (S - \gamma_s) - 2 p' T_3, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\rho}{\alpha_s} \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} &= \\ &= \frac{(V T_0 - \nabla p_h)}{B^2} [B \times \nabla \psi] + V T_2 B + V T_1 [B \times \nabla \psi], \end{aligned} \quad (8)$$

$$\rho \frac{\partial^2 \tau}{\partial t^2} = (V T_0 - \nabla p_h) B. \quad (9)$$

Здесь использованы следующие обозначения:

$$\begin{aligned} T_0 &= \gamma p \operatorname{div} \xi, \\ T_1 &= \frac{\nabla \psi \operatorname{rot} \xi \times B}{|\nabla \psi|^2}, \\ T_2 &= \frac{1}{\alpha_s} [B \nabla \eta + (\gamma_s - S) \xi], \\ T_3 &= \frac{\nabla \psi \nabla \xi}{|\nabla \psi|^2} + \nabla \eta \frac{B \times \nabla \psi}{|B|^2} + \frac{\xi}{B^2} [\operatorname{div}(\alpha_s \nabla \psi) + 2 p'], \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \alpha_s &= \frac{B^2}{|\nabla \psi|^2}, & \gamma_s &= \frac{B j}{|\nabla \psi|^2}, \\ S &= \frac{\nabla \psi \times B}{|\nabla \psi|^2} \operatorname{rot} \frac{\nabla \psi \times B}{|\nabla \psi|^2}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$K = \frac{j^2}{|\nabla \psi|^2} - \alpha S + \frac{p'}{B^2} \left(p' + \frac{\nabla B^2 \nabla \psi}{|\nabla \psi|^2} \right). \quad (12)$$

Штрихом обозначена производная по магнитной метке.

В геометрии дипольного магнитного поля Земли, когда

$$B = \nabla \psi \times \nabla \varphi, \quad (13)$$

магнитная метка имеет смысл полоидального магнитного потока

$$\psi = \frac{M \cos^2 \theta}{r}. \quad (14)$$

С учетом этого обстоятельства величины (11) и (12) принимают вид

$$\gamma_s = S = 0, \quad (15)$$

$$K = \frac{p' \nabla \psi \nabla (2p + B^2)}{B^2 |\nabla \psi|^2}. \quad (16)$$

Редукция системы уравнений (7)–(9) проводится в приближении баллонных возмущений

$$\frac{|\nabla \psi \times \nabla X|}{|\nabla \psi|}, \frac{|\mathbf{B} \times \nabla \psi| \nabla X|}{B |\nabla \psi|} \gg \frac{X}{b}, \frac{|\mathbf{B} \nabla X|}{B}, \quad (17)$$

где X — любой компонент переменной, b — характерные размеры неоднородностей равновесных величин. Иначе говоря, колебания считаются мелкомасштабными поперек поля и крупномасштабными — вдоль. Выполнение этих условий обеспечивается следующим представлением возмущенных величин:

$$\xi(\mathbf{r}, t) = \hat{\xi}(\mathbf{r}) \exp\left(-i\omega t + \frac{iS}{\varepsilon}\right), \quad (18)$$

$$\mathbf{T}(\mathbf{r}, t) = \hat{\mathbf{T}}(\mathbf{r}) \exp\left(-i\omega t + \frac{iS}{\varepsilon}\right), \quad (19)$$

где ε — малый параметр, S — эйконал, удовлетворяющий условию

$$\nabla S = \mathbf{k}_\perp = k_\varphi \nabla \varphi + k_\psi \nabla \psi. \quad (20)$$

Подставляя (18) и (19) в уравнения малых колебаний, разлагая последнее по ε и используя особенности дипольной геометрии, а также вводя безразмерные переменные

$$T_0 = \frac{\hat{T}_0 L^6}{M^2}, \quad T_1 = \hat{T}_1 L, \quad T_2 = \frac{\hat{T}_2 L^2}{M}, \quad T_3 = \hat{T}_3, \quad (21)$$

$$\xi = \frac{\hat{\xi} L}{M}, \quad \eta = \hat{\eta}', \quad \tau = \frac{\hat{\tau} L^2}{M}, \quad p_h = \frac{\hat{p}_h L^6}{M^2}, \quad (22)$$

$$B_E = \frac{M}{L^3}, \quad \omega_A = \frac{B_E}{L \sqrt{\rho}}, \quad \Omega = \frac{\omega}{\omega_A}, \quad (23)$$

где M — магнитный дипольный момент, L — экваториальное расстояние до магнитной поверхности, B_E — величина магнитного поля в экваториальной плоскости, ω_A — альвеновская частота, можно получить следующую систему, описывающую баллонные возмущения:

$$\begin{aligned} \Omega^2 \xi + \frac{a(\theta)}{\cos^{13}\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{a(\theta) \cos \theta} \frac{\partial \xi}{\partial \theta} \right) + \\ + \frac{4 \left(T_0 - p_h + \frac{\alpha \beta}{\gamma} \xi \right)}{a(\theta) \cos^4 \theta} = 0, \end{aligned} \quad (24)$$

$$\Omega^2 \eta + \frac{1}{\cos^{13}\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{\cos \theta} \frac{\partial \eta}{\partial \theta} \right) = 0, \quad (25)$$

$$\Omega^2 \eta + \frac{1}{\cos^7 \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (T_0 - p_h) = 0, \quad (26)$$

где

$$T_0 = \frac{a(\theta) \beta}{a(\theta) + \beta \cos^{12} \theta} \times \\ \times \left[\frac{1}{\cos^7 \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\tau \cos^{12} \theta}{a(\theta)} \right) - \frac{4 \cos^2 \theta}{a^2(\theta)} \xi + \frac{p_h \cos^{12} \theta}{a(\theta)} \right], \quad (27)$$

$$\alpha = -\frac{L}{p} \frac{dp}{dL}, \quad \beta = \frac{\gamma p}{B_E^2}, \quad a(\theta) = 1 + 3 \sin^2 \theta. \quad (28)$$

Из (24) и (26) для несжимаемых возмущений получаем искомое уравнение малых колебаний:

$$\begin{aligned} \Omega^2 \xi + \frac{a(\theta)}{\cos^{13}\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{a(\theta) \cos \theta} \frac{\partial \xi}{\partial \theta} \right) + \frac{4 \alpha \beta}{\gamma a(\theta) \cos^4 \theta} = \\ = \frac{16}{a(\theta) \cos^4 \theta} \frac{\int \frac{\beta \cos^9 \theta}{a^2(\theta)} \xi d\theta}{\int \left[1 + \frac{\beta}{a(\theta)} \cos^{12} \theta \right] \cos^7 d\theta} + \\ + \frac{4}{a(\theta) \cos^4 \theta} \frac{\int p_h \cos^7 \theta d\theta}{\int \left[1 + \frac{\beta}{a(\theta)} \cos^{12} \theta \right] \cos^7 d\theta}. \end{aligned} \quad (29)$$

Полученное уравнение описывает не только колебания плазмы с произвольным β , но и учитывает влияние горячих частиц. Последний член в (29) будет оказывать стабилизирующее влияние, когда он положителен, и дестабилизирующее, если он отрицателен.

ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ДАВЛЕНИЕ ГОРЯЧИХ ЧАСТИЦ

Для нахождения возмущенного давления горячего компонента p_h необходимо найти возмущенную функцию распределения энергичных частиц. Принимая во внимание то, что пролетные частицы не влияют на возмущения плазмы, будем рассматривать запертые горячие частицы, совершающие байанс-колебания и различные виды дрейфов. Исходным для нахождения функции является дрейфовое кинетическое уравнение, полученное Вэйландом [4] из уравнения Власова усреднением по лармировским осцилляциям:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial t} + (\nu_{||} \mathbf{e}_0 + \mathbf{V}_{gc}) \nabla f + \frac{q}{m} \left(E_{||} + \frac{\mathbf{e}_0}{c} [\mathbf{V}_{D0} \times \delta \mathbf{B}_{\perp}] \right) \frac{\partial f}{\partial \nu_{||}} + \\ + \frac{q}{m} \left(\mathbf{E} + \frac{\nu_{||}}{c} [\mathbf{e}_0 \times \delta \mathbf{B}_{\perp}] \right) \left(\frac{\mathbf{v}_{VB}}{\nu_{\perp}} \frac{\partial f}{\partial \nu_{\perp}} + \frac{\mathbf{v}_R}{\nu_{||}} \frac{\partial f}{\partial \nu_{||}} \right) = 0, \end{aligned} \quad (30)$$

где

$$\mathbf{V}_{\text{gc}} = \frac{c}{B_0} \mathbf{E} \times \mathbf{e}_0 + \nu_{\parallel} \frac{\delta \mathbf{B}_{\perp}}{B_0} + \mathbf{V}_{\text{D0}},$$

$$\mathbf{V}_{\text{D0}} = \mathbf{v}_{\text{R}} + \mathbf{v}_{\text{VB}},$$

$$\mathbf{v}_{\text{R}} = \frac{\nu_{\parallel}^2}{\omega_{\text{B}}} [\mathbf{e}_0 \times \mathbf{k}_0],$$

$$\mathbf{v}_{\text{VB}} = \frac{\nu_{\perp}^2}{2\omega_{\text{B}}} \left[\mathbf{e}_0 \times \frac{\nabla B_0}{B_0} \right],$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \delta \mathbf{B}, \quad \mathbf{e}_0 \equiv \frac{\mathbf{B}_0}{B_0},$$

$$\mathbf{k}_0 = (\mathbf{e}_0 \nabla) \mathbf{e}_0.$$

Для поиска решения уравнения (30) учтем, что $\mathbf{E}_{\parallel} = 0$, и представим функцию распределения высокоэнергичных частиц в виде суммы стационарной и возмущенной частей:

$$f = F + \delta f. \quad (31)$$

Далее возмущенную часть будем искать в виде

$$\delta f = \tilde{f} - \xi \nabla F. \quad (32)$$

В этом случае уравнение (30) принимает вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{f}}{\partial t} + (\mathbf{v}_{\parallel} + \mathbf{V}_{\text{D0}}) \nabla \tilde{f} = \\ = -m(\nu_{\parallel}^2 + \nu_{\perp}^2/2) \frac{dF}{dE} \frac{\nabla B_0}{B_0} \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{dF}{d\psi} \mathbf{V}_{\text{D0}} \nabla \xi. \end{aligned} \quad (33)$$

Воспользовавшись представлением (18) и разлагая решение по малой величине $\omega \Lambda / \nu_{\parallel}$, где Λ — длина силовой линии, получим, что возмущенная функция распределения записывается в виде

$$\delta f = \left(C(\xi) + \xi L \frac{dF}{dL} \right) \exp \left[-i\omega t + \frac{iS(L, \phi)}{\varepsilon} \right], \quad (34)$$

$$C = C^0 + C^{\omega}, \quad (35)$$

$$C^0 = -\frac{2}{3} L \frac{\partial F}{\partial L} \frac{I_2}{I_3},$$

$$C^{\omega} = -\frac{\omega \left(2E \frac{dF}{dE} \frac{I_2}{I_1} - \frac{2}{3} L \frac{dF}{dL} \frac{I_2}{I_3} \right)}{\omega - \frac{3k_{\varphi}E}{mL^2\omega_{\text{BE}}} \frac{I_3}{I_1}}, \quad (36)$$

$$I_1(\alpha_0) = \int_0^{\theta_m} \frac{\cos \theta \sqrt{a(\theta)}}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha_0 \sqrt{a(\theta)}}{\cos^6 \theta}}} d\theta,$$

$$\begin{aligned} I_2(\alpha_0) &= \int_0^{\theta_m} \frac{\left[1 - \frac{\sin^2 \alpha_0 \sqrt{a(\theta)}}{2\cos^6 \theta} \right]}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha_0 \sqrt{a(\theta)}}{\cos^6 \theta}}} \frac{\cos^3 \theta}{a^{3/2}(\theta)} d\theta, \\ I_3(\alpha_0) &= \int_0^{\theta_m} \frac{\left[1 - \frac{\sin^2 \alpha_0 \sqrt{a(\theta)}}{2\cos^6 \theta} \right]}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha_0 \frac{\sqrt{a(\theta)}}{\cos^6 \theta}}} \frac{\cos^3 \theta}{a^{3/2}(\theta)} d\theta. \end{aligned} \quad (37)$$

Здесь α_0 — питч-угол на экваторе, θ_m — широта магнитной пробки, а величина ξ определена в (22).

Видно, что возмущенная функция распределения состоит из двух частей, одна из которых зависит от частоты, а другая не зависит, что может облегчить оценку границы устойчивости баллонных мод.

Зная возмущенную функцию распределения запертых частиц, легко найти создаваемое ими давление:

$$p = \iint (\nu_{\parallel}^2 + \nu_{\perp}^2/2) \frac{B_0}{\nu_{\parallel}} f d\mu dE. \quad (38)$$

Отсюда окончательно получаем безразмерное давление горячих частиц p_h , фигурирующее в уравнении (29):

$$p_h = \frac{1}{B_E^2} (p_h^0 + p_h^{\omega}), \quad (39)$$

$$p_h^0 = L \frac{\partial p_h^0}{\partial L} \left(\xi_0 - \frac{2}{3} \frac{I_2}{I_3} \right), \quad (40)$$

$$p_h^0 = \iint (\nu_{\parallel}^2 + \nu_{\perp}^2/2) \frac{B_0}{\nu_{\parallel}} F d\mu dE,$$

$$\begin{aligned} \tilde{p}_h^{\omega} &= - \iint \sqrt{\frac{2E}{m}} \frac{B_E \sqrt{a(\theta)}}{\cos^6 \theta} \times \frac{\left[1 - \frac{\sin^2 \alpha_0 \sqrt{a(\theta)}}{2\cos^6 \theta} \right]}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha_0 \sqrt{a(\theta)}}{\cos^6 \theta}}} \times \\ &\times \frac{\omega \left(2E \frac{dF}{dE} \frac{I_2}{I_1} - \frac{2}{3} L \frac{dF}{dL} \frac{I_2}{I_1} \right)}{\omega - \frac{3k_{\varphi}E}{mL^2\omega_{\text{BE}}} \frac{I_3}{I_1}} d\mu dE. \end{aligned} \quad (41)$$

Выводы

При простейшем анализе можно заметить следующие особенности полученных уравнений:

- поскольку в возмущенном давлении запертых горячих частиц есть слагаемые, не исчезающие даже при нулевой частоте, горячие частицы влияют на границу устойчивости баллонных

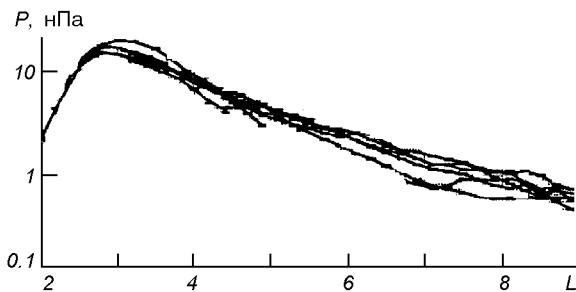


Рис. 3. Давление протонов по данным спутника AMPTE/CCE

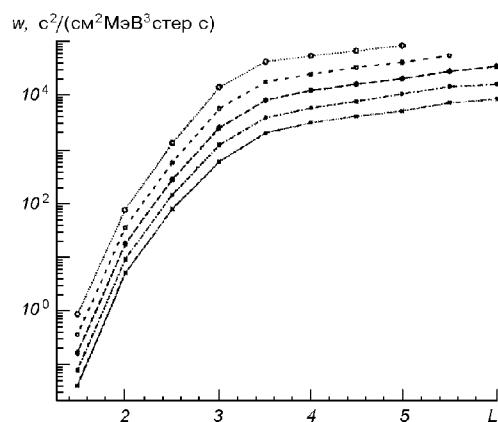


Рис. 4. Функция распределения горячих частиц по данным спутника Galileo

возмущений;

- влияние горячих частиц зависит от формы возмущения, поскольку ξ входит в выражение для I_2 . Для нечетных мод последний член в (29) обращается в нуль, т. е. частицы не оказывают на возмущения никакого влияния. Вклад давления частиц для четных мод зависит от знака I_2 .
- из профиля давления энергичных частиц (рис. 3) следует, что колебания с амплитудой, не превышающей $\frac{2}{3} \frac{I_2}{I_3}$, стабилизируются, а более сильные колебания могут быть неустойчивы;
- из вида функции распределения (рис. 4) следует, что стабилизироваться могут колебания с частотой ниже резонансной $\omega_r = \frac{3k_\varphi E}{mL^2 \omega_{\text{BE}}} \frac{I_3}{I_1}$, а с более высокими частотами — дестабилизироваться;
- характерное значение ω_r , вычисленное для протонов с энергией 100 кэВ на геостационарной орбите при $k_\varphi = 100$ составляет около 0.1 Гц, что совпадает с частотой баунс-прохождения альвеновской волны. Таким образом, механизм резонанса — взаимодействие волна-частица.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как следует из представленной выше модели, неучт возраставшего давления горячих частиц может оказаться критическим при описании развития магнитосферной неустойчивости. Добавление к рас-

смотрению горячего компонента усложняет картину устойчивость/неустойчивость. Поэтому именно такой параметр, как давление горячих частиц, может сыграть определяющую роль в оценке состояния магнитосферы и построении модели магнитосферной суббури.

1. Черемных О. К., Бурдо О. С., Кременецкий И. А., Парновский А. С. К теории МГД-волн во внутренней магнитосфере Земли // Космічна наука і технологія.—2001.—7, № 5/6.—С.44—63.
2. Chen L., Hasegawa A. Kinetic theory of geomagnetic pulsations. 1 Internal excitation by energetic particles // J. Geophys. Res.—1991.—96.—P. 1503—1512.
3. Hameiri E., Laurence P., Mond M. The ballooning instability in space plasmas // J. Geophys. Res.—1991.—96.—P. 1513—1518.
4. Weiland J. Collective modes in inhomogeneous plasma. Kinetic and fluid theory // Plasma Phys. Ser.—2000.

INTERACTION OF HIGH-ENERGY PARTICLES WITH MAGNETOHYDRODYNAMIC MODES IN THE EARTH'S MAGNETOSPHERE

O. K. Cheremnykh and D. P. Demkiv

The equations of ballooning perturbations were derived for the dipole configuration of the Earth's magnetic field with regard to the pressure of hot trapped particles. We found that hot particles affect the stability limit of the ballooning oscillations, and under certain condition they can stabilize or destabilize plasma perturbations.

В. Н. Федун^{1,2}, А. К. Юхимук²,
А. Д. Войцеховская², О. К. Черемных³

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

²Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ

³Інститут космічних досліджень НАНУ і НКАУ, Київ

Нелинейное взаимодействие вистлеров и инерционных альвеновских волн в магнитосфере Земли

На базі дворідинної магнітної гідродинаміки розглянуто нелінійну параметричну взаємодію вістлера з високочастотною електронною звуковою хвилею та інерціальною альвенівською хвилею у авроральній області магнітосферної плазми з малим значенням плазмового параметра β . Знайдено нелінійне дисперсійне рівняння, що описує трихвильову взаємодію, інкремент та час розвитку параметричної нестійкості. Теоретичні результати використовуються для аналізу експериментальних даних, отриманих під час супутникових досліджень.

ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные спутниковые измерения, проведенные в различных областях околоземной плазмы, указывают на широкий спектр электростатических и электромагнитных волновых мод. При этом большое количество зарегистрированных волн может быть однозначно идентифицировано, так как их дисперсионные свойства хорошо изучены. Как известно, магнитосфера неоднородно заполнена плазмой. Поэтому выделяют несколько наиболее характерных областей: плазменный слой, плазмосферу и дневные полярные каспы. Проекция плазменного слоя вдоль магнитных силовых линий на ионосферу имеет вид кольца, которое окружает геомагнитный полюс. Это своеобразное кольцо называется авроральной зоной магнитосферы. Внутри авроральной области генерируется наибольшая часть энергии геомагнитных возмущений [2].

Впервые интенсивные электрические возмущения вдоль магнитных силовых линий в этой области были зарегистрированы с использованием спутника OV1-10 [7]. В дальнейшем, более детальное исследование проводилось при помощи спутников

«Hawkeye-1» и IMP 6 [8], а также «Dynamics Explorer-1» [9]. В результате были измерены физические параметры частиц и полей в полярной области магнитосферы Земли, исследовано авроральное шипение, обнаружены так называемые широкополосные электростатические шумы (ШЭШ), которые представляют собой импульсные эмиссии электростатических волн. Значения электрического поля в авроральной области были зафиксированы на уровне 30—300 мВ/м. После запуска в 1986 году шведского спутника «Viking» появилась возможность исследовать ШЭШ с более высоким времененным расширением, что позволило более полно представить их частотные и энергетические характеристики. Суммарное электрическое поле ШЭШ по данным измерений достигает 100 мВ/м. Измерения проводились на высотах 2—5 радиусов Земли. Частотный диапазон зарегистрированных эмиссий захватывает область от нескольких Гц до ω_{pe} — электронной плазменной частоты. На более низких высотах исследования плазменных параметров авроральной области проводились с использованием спутника «Freja». Характерные высоты, на которых проводились исследования, в апогее со-

ставляли 1650—1750 км. В работе [10], посвященной анализу некоторых экспериментальных данных, полученных на этом спутнике, отмечено, что квазипериодические электромагнитные моды в ОНЧ-диапазоне (инерциальные альвеновские волны) часто наблюдаются вместе с электронными образованиями, распространяющимися вдоль магнитных силовых линий. При этом энергия образований зафиксирована в диапазоне от нескольких десятков эВ до нескольких КэВ. Проведение таких последовательных спутниковых исследований в этих областях магнитосферы дало возможность на основании существования ШЭШ, инерциальных альвеновских волн и других плазменных мод объяснить ускорение частиц, и в частности электронное ускорение [14]. Поэтому довольно интересным является вопрос и о самом механизме возникновения различного рода периодических или квазипериодических электромагнитных структур. Как показали экспериментальные данные, генерация аврорального шипения тесно связана с распространением и неустойчивостью электронно-звуковых (ЭЗ) [12] и вистлеровских [9] волн. Большая же часть энергии эмиссий ШЭШ, сосредоточена в низкочастотной области (ионно-звуковые, ионно-циклотронные, дрейфовые нижне-гибридные [8, 11] волны). Высокочастотная часть спектра, как отмечается в [11] связана с электронно-звуковой и пучковой модой. Генерация электронно-звуковой волны неоднократно рассматривалась в литературе с использованием различных математических методов и моделей околоземной плазмы. Так, в работах [12, 13] исследуется генерация электронно-звуковой моды на основе уравнения Власова в приближении незамагниченной плазмы, состоящей из трех компонентов: горячих и холодных электронов и ионов. Численное моделирование показало, что более стабильной, в отличие от электронно-звуковой, является вистлеровская мода, и следовательно, зарегистрированные на DE-1 электронные пучки, распространяющиеся вверх от Земли, более существенно влияют на распад электронно-звуковой волны. В работе [11] в качестве источника генерации ШЭШ рассматриваются также электронно-звуковые волны, однако вместо трехкомпонентной плазмы используется четырехкомпонентная: горячие и холодные электроны с максвелловским распределением по скоростям, ионы и электронный пучок.

Как видно, электронно-звуковые волны являются важным звеном для возникновения различных нелинейных волновых процессов в авроральной области магнитосферы Земли. Поэтому данную работу мы посвятили исследованию нелинейного взаимодействия между вистлерами и ВЭЗВ в авроральной

области нижней магнитосферы. На основе двухжидкостной магнитной гидродинамики нами рассмотрена параметрическая неустойчивость, в результате которой вистлер, волна накачки, распространяющаяся в однородной замагниченной ($B_0 = B_0 e_z$) электронно-ионной плазме с $T_i > T_e$ [1, 5], распадается на ВЭЗВ и КАВ.

Представим вистлеровскую волну накачки в виде плоской волны, распространяющейся в магнитосферной плазме:

$$\mathbf{E}_0 = (E_{0x} \mathbf{e}_x + E_{0y} \mathbf{e}_y) \exp(i\psi_0) + \text{k.c.}, \quad (1)$$

где

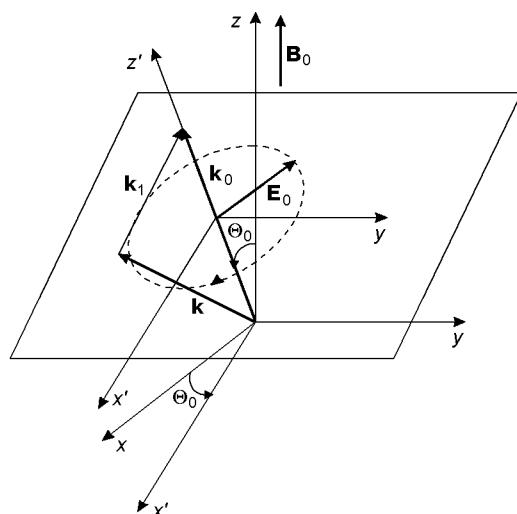
$$\begin{aligned} \psi_0 &= -\omega_0 t + k_{0x}x + k_{0z}z, \\ \omega_0 &= (k_0^2 c^2 / \omega_{pe}^2) \omega_{Be} |\cos\theta_0|, \end{aligned} \quad (2)$$

ω_{Be} — электронная циклотронная частота, θ_0 — угол между внешним магнитным полем \mathbf{B}_0 и волновым вектором \mathbf{k}_0 . Отметим, что поскольку вистлеровская мода является правополяризованной электромагнитной волной и распространяется под углом θ_0 , то $E_{0y}/E_{0x} = i \cos\theta_0$. Для эффективного параметрического взаимодействия необходимым является выполнение условий синхронизма для взаимодействующих волн:

$$\omega_0 = \omega + \omega_1,$$

$$\mathbf{k}_0 = \mathbf{k} + \mathbf{k}_1,$$

где ω_0 , \mathbf{k}_0 — частота и волновой вектор вистлеровской волны накачки, ω , \mathbf{k} — частота и волновой вектор КАВ, ω_1 , \mathbf{k}_1 — частота и волновой вектор ВЭЗВ. Предполагается, что все волновые вектора расположены в плоскости XOZ (рисунок).



Расположение волновых векторов

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Основная система уравнений двухжидкостной магнитной гидродинамики имеет вид

$$\frac{\partial \mathbf{V}_\alpha}{\partial t} = \frac{1}{m_\alpha} (e_\alpha \mathbf{E} + \mathbf{F}_\alpha) + (\mathbf{V}_\alpha \times \omega_{\text{Be}\alpha}) - \frac{T_\alpha}{m_\alpha n_\alpha} \nabla n_\alpha, \quad (3)$$

$$\frac{\partial n_\alpha}{\partial t} = -\nabla \cdot (n_\alpha \mathbf{V}_\alpha), \quad (4)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}, \quad (5)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi\rho, \quad (7)$$

где $\mathbf{j} = e(n_i \mathbf{V}_i - n_e \mathbf{V}_e)$, $\rho = e(n_i - n_e)$, $\mathbf{F}_\alpha = (e_\alpha/c)(\mathbf{V}_\alpha \times \mathbf{B}) - m_\alpha(\mathbf{V}_\alpha \nabla) \mathbf{V}_\alpha$. Индекс $\alpha = i, e$ соответствует ионной и электронной компонентам плазмы, \mathbf{F}_α — пондеромоторная сила. Так как $F_i = (m_e/m_i)F_e \ll F_e$, то вклад ионного компонента пондеромоторной силы мал, и следовательно, силой F_i можно пренебречь.

Электронную плотность, скорость, электрическое и магнитное поле представим в виде сумм

$$n_e = n_0 + \tilde{n}_0 + \tilde{n} + \tilde{n}_1,$$

$$\mathbf{V}_e = \mathbf{V}_0 + \mathbf{V} + \mathbf{V}_1,$$

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E} + \mathbf{E}_1,$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{b}_0 + \mathbf{b},$$

где n_0 — среднее значение плотности плазмы, величины с индексом «0» соответствуют волне накачки, а величины без индекса и с индексом «1» — КАВ и ВЭЗВ соответственно.

НЕЛИНЕЙНОЕ ДИСПЕРСИОННОЕ УРАВНЕНИЕ ДЛЯ КАВ

Нелинейное дисперсионное уравнение для КАВ в случае плазмы с низким плазменным параметром β было получено в работах [3, 4, 15]. Воспользуемся наиболее полным выражением из работы [15]:

$$\left[\frac{V_{\text{ph}}^2}{V_A^2} (1 + \chi_e) - (1 + \bar{\mu}_i) \right] \frac{1}{1 + \mu_i} \varphi = \frac{1}{ie k_z} F_{ez} - \\ - \frac{m_e V_{\text{ph}}^2}{m_i V_A^2} (1 + \chi_e) \frac{1}{ie k_x} \left(F_{ex} - i \frac{\omega_{\text{Be}}}{\omega} F_{ey} \right) -$$

$$- \frac{m_i}{e} (k_z^2 \delta_i^2)^{-1} \frac{\omega}{k_x} (1 + \chi_e) \frac{n_e^L}{n_0} V_{\text{ex}}^L. \quad (8)$$

где $\bar{\mu}_i = (1 + T_e/T_i)\mu_i$, $\mu_i = k_x^2 \rho_i^2$, $\rho_i = V_{Ti}/\omega_{Bi}$ — ионный ларморовский радиус, $\chi_e = k_x^2 \delta_e^2$, $\delta_e = c/\omega_{pe}$ — электронная инерционная длина, $\delta_i = c/\omega_{pi}$ — ионная инерционная длина, $V_{ph} = \omega/k_z$, $V_A = c\omega_{Bi}/\omega_{pi}$ — альвеновская скорость, $V_{Ti} = \sqrt{T_i/m_i}$ — тепловая скорость ионов, φ — скалярный потенциал КАВ. Последний член в правой части выражения (8) представляет собой так называемую концентрационную нелинейность. Компоненты пондеромоторной силы определяются взаимодействием вистлеровской волны накачки и высокочастотной электронно-звуковой волны. Из уравнения движения (3) найдем компоненты скорости электронов в поле вистлера (учитывая, что $\omega_{be} \gg \omega_0$):

$$V_{0x} = i \frac{e E_{0x} (\omega_0 + \omega_{Be} \cos \theta_0)}{m_e \omega_{Be}^2}, \quad (9)$$

$$V_{0y} = -\frac{e E_{0x}}{m_e \omega_{Be}}.$$

Из уравнения (6) получим возмущенные компоненты магнитного поля волны накачки:

$$b_{0x} = -i \frac{ck_{0z} \cos \theta_0}{\omega_0} E_{0x}, \quad (10)$$

$$b_{0y} = \frac{ck_{0z}}{\omega_0} E_{0x},$$

$$b_{0z} = i \frac{k_{0x} c \cos \theta_0}{\omega_0} E_{0x}.$$

Компоненты скорости электронов в поле высокочастотной электронно-звуковой волны равны

$$V_{1ex} = -\frac{k_{1x} e \omega_1}{m_e (\omega_1^2 - \omega_{Be}^2)} \varphi_1, \quad (11)$$

$$V_{1ey} = -i \frac{k_{1x} e \omega_{Be}}{m_e (\omega_1^2 - \omega_{Be}^2)} \varphi_1,$$

$$V_{1ez} = -\frac{e}{m_e} \frac{k_{1z}}{\omega_1} \varphi_1.$$

Поскольку рассматривается магнитосферная плазма на высотах менее 3-4 радиуса Земли (где $\beta \ll m_e/m_i$), то существенными являются дисперсионные эффекты, связанные с учетом электронной инерционной длины или, другими словами, доминируют эффекты, связанные с конечностью массы электронов [6]. Учитывая это, а также используя выражения (8)–(11), представим дисперсионное уравнение КАВ (такие волны часто называют инер-

циальными альвеновскими волнами) в виде

$$\varepsilon_A \varphi = \mu_1 E_{0x} \varphi_1^*, \quad (12)$$

где

$$\varepsilon_A = \omega^2 - \frac{k_z^2 V_A^2}{1 + \chi_e}, \quad (13)$$

а коэффициент связи определяется выражением

$$\begin{aligned} \mu_1 = i \frac{e}{m_e} \frac{\omega}{\omega_{Be}} \cos \theta_0 \frac{k_{1x}}{k_x} \times \\ \times \left[k_x \frac{\omega}{\omega_0} + \frac{m_e}{m_i} \left(k_{1x} + k_{0x} - \frac{k_{1z} k_{0z}}{k_{1x}} \frac{\omega_{Be}^2}{\omega_0 \omega_0} \right) - \right. \\ \left. - \frac{\omega^2}{\omega_{Bi}^2} \chi_e \frac{k_z^2}{k_x^2} k_{1x} \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

НЕЛИНЕЙНОЕ ДИСПЕРСИОННОЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ВЭЗВ

Для получения дисперсионного уравнения для ВЭЗВ воспользуемся уравнением Пуассона (7). Поскольку высокочастотный электронный звук является потенциальной волной, то $E_1 = -\nabla \varphi_1$, и линеаризованное уравнение (7) можно представить в виде

$$\Delta \varphi_1 = -4\pi e(\tilde{n}_{1i} - \tilde{n}_{1e}), \quad (15)$$

где φ_1 — скалярный потенциал электрического поля ВЭЗВ.

Используя уравнения движения и непрерывности, а также учитывая, что $|\omega_1| \gg \omega_{Bi}$, $k_1 \rho_i \gg 1$, $\omega_1 \ll k_1 V_{Ti}$, получим выражения для возмущенного электронного и ионного компонентов плотности для ВЭЗВ:

$$\begin{aligned} \tilde{n}_{1e} = -\frac{n_0 e}{\omega_1^2 m_e} \left[-\frac{\omega_1^2}{\omega_{Be}^2} k_{1x}^2 + k_{1z}^2 \right] \varphi_1 + \\ + \frac{n_0}{\omega_1} \left[\frac{i}{m_e} \frac{k_{1z}}{\omega_1} F_{1ez} - \frac{k_{1x}}{m_e \omega_{Be}} \left(i \frac{\omega_1}{\omega_{Be}} F_{1ex} + F_{1ey} \right) \right] - \\ - i \frac{\nabla \tilde{n}_e^* \tilde{\mathbf{V}}_0}{\omega_1}, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\tilde{n}_{1i} = -\frac{n_0 e}{V_{Ti}^2 m_i} \varphi_1. \quad (17)$$

Для вычисления пондеромоторной силы ВЭЗВ необходимо воспользоваться компонентами скорости электронов в поле КАВ и компонентами магнитного поля КАВ. Учитывая, что в плазме с $\beta \ll m_e/m_i$ альвеновская скорость превышает тепловую скорость электронов $V_A \gg V_{Te}$ ($V_{Te} = \sqrt{T_e/m_e}$), и следовательно, членами V_{Te}/V_A можно пренебречь,

имеем

$$V_x = \frac{ek_x \omega}{m_e \omega_{Be}} \varphi, \quad V_y = i \frac{ek_x}{m_e \omega_{Be}} \varphi,$$

$$V_z = -\frac{ek_z}{m_e \omega} \chi_e \varphi, \quad b_y = -ic \frac{k_x}{V_A} \varphi.$$

Подставляя выражения (16) и (17) в уравнение (15), получим нелинейное дисперсионное уравнение для ВЭЗВ:

$$\varepsilon_1 \varphi_1 = \mu E_{0x} \varphi^*, \quad (18)$$

где

$$\varepsilon_1 = \omega_1^2 - \frac{V_{Se}^2 k_{1z}^2}{1 + \rho_i^2 k_1^2 + \rho_0^2 k_{1x}^2},$$

а коэффициент связи задается выражением

$$\begin{aligned} \mu = i \frac{\omega_{Se}^2 \omega_1}{\omega_{Be}} \frac{k_{1x} k_x}{k_{1z}^2} \frac{e}{m_e} \cos \theta_0 \left[\frac{k_{1z}}{k_{1x}} \frac{1}{\omega_1} \left(\frac{k_{0z}}{\omega_0} - \frac{k_z^2 V_A^2}{\omega^2} \right) + \right. \\ \left. + \frac{k_z}{k_x} \frac{1}{\omega} \left(\frac{k_z}{\omega} - \frac{k_{0z}}{\omega_0} \right) \chi_e - \frac{k_{0x}}{\omega_{Be}} \right], \end{aligned}$$

$V_{Se} = \sqrt{T_i/m_e}$ — скорость электронного звука, $\rho_0 = V_{Se}/\omega_{Be}$.

НЕЛИНЕЙНОЕ ДИСПЕРСИОННОЕ УРАВНЕНИЕ И ИНКРЕМЕНТ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ

Используя дисперсионные уравнения для КАВ (12) и ВЭЗВ (18), несложно получить нелинейное дисперсионное уравнение, описывающее трехволновое взаимодействие:

$$\varepsilon_A^* \varepsilon_1 = \mu_1^* \mu |E_{0x}|^2. \quad (19)$$

В случае отсутствия волны накачки, что соответствует $|E_{0x}|^2 = 0$, в плазме будут распространяться две не взаимодействующих друг с другом волновые моды, КАВ и ВЭЗВ [1]. Если же $|E_{0x}|^2 \neq 0$, то энергия от вистлеровской волны накачки будет передаваться к КАВ и ВЭЗВ, что приведет к нарастанию их амплитуд. Полагая в (19) $\omega_1 = \omega_{1r} + i\gamma$, $\omega = \omega_r + i\gamma$, ($|\gamma| \ll \omega_r, \omega_{1r}$) и раскладывая ε и ε_1 в ряд Тейлора по малому параметру γ , представим инкремент развития параметрической неустойчивости в виде

$$\gamma^2 = \frac{\frac{\partial \varepsilon_A^*}{\partial \omega} \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial \omega}}{\frac{\partial \varepsilon_A}{\partial \omega} \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial \omega}} \Bigg|_{\substack{\omega=\omega_r \\ \omega_1=\omega_{1r}}}, \quad (20)$$

где ω_r , ω_{1r} , найдем из уравнений $\varepsilon_A(\omega_r, \mathbf{k}) = 0$, $\varepsilon_1(\omega_{1r}, \mathbf{k}_1) = 0$. Подставляя в (20) выражения

$$\frac{\partial \varepsilon_A}{\partial \omega} = 2\omega, \quad \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial \omega_1} = 2\omega_1$$

и коэффициенты связи, получим инкремент развития неустойчивости:

$$\gamma^2 = \frac{W}{4} \frac{\omega_{Se}^2 k_{1x}^2 \omega_{pe}^2}{\omega_{Be}^2 k_{1z}^2 \omega^2} V_{Te}^2 k_z^2 \chi_e \cos^2 \theta_0 \cdot K, \quad (21)$$

где

$$W = \frac{|E_0|^2}{4\pi n_0 T_e},$$

$$K = \left(1 - \frac{k_{0z}}{k_z} \frac{\omega}{\omega_0} \right) \times$$

$$\times \left[\frac{\omega}{\omega_0} + \frac{m_e}{m_i} \left(\frac{k_{1x} + k_{0x}}{k_x} - \frac{k_{1z}}{k_{1x}} \frac{k_{0z}}{k_x} \frac{\omega_{Be}^2}{\omega_1 \omega_0} \right) - \right.$$

$$\left. - \frac{\omega^2}{\omega_{Bi}^2} \frac{k_z^2}{k_x^2} \frac{k_{1x}}{k_x} \chi_e \right].$$

Пороговое значение амплитуды волны накачки, при превышении которого возможно развитие представленной параметрической неустойчивости, можно оценить если учесть черенковское затухание высокочастотного электронного звука

$$\gamma_{B3ZB} = \sqrt{\frac{\pi}{8}} \frac{m_i}{m_e} \frac{k_1 V_{Se} \cos^2(\theta_1)}{(1 + k_{1p}^2 + k_{1p_0}^2)^2},$$

где θ_1 — угол между внешним магнитным полем B_0 и волновым вектором k_1 и кинетической альвеновской волны

$$\gamma_A = \sqrt{\frac{\pi}{8}} \frac{V_A}{V_{Te}} \frac{k_x^2 V_{Ti}^2}{\omega_{Bi}^2} \omega.$$

Для случая затухания ВЭЗВ учтем только ионный компонент, поскольку электронный экспоненциально мал ($T_i > T_e$). Учтем также, что затухание мало только для углов распространения ВЭЗВ, близких к $\pi/2$ [1]. Используя выражения для γ , γ_{B3ZB} и γ_A , пороговое значение E_0 можно представить в виде

$$E_0 = \sqrt{2n_0 T_i} \pi \frac{\omega_{Se}}{k_{1x} V_{Ti}} \frac{\omega}{k_z c} \left(\frac{V_A}{V_{Te}} \frac{\omega}{k_1 V_{Ti}} \right)^{1/2} \cos^{-1} \theta_0 K^{-1/2}. \quad (22)$$

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе рассмотрен параметрический распад вистлеровской волны накачки на КАВ и ВЭЗВ. Этот канал распада, как нам представляется, еще никем

не обсуждался. В то же время, как следует из анализа спутниковых наблюдений [11], есть тесная связь между вистлерами и электронно-звуковыми волнами. Поэтому проведенные нами теоретические исследования представляют и определенный практический интерес. С другой стороны, генерация КАВ также имеет большое значение для динамики электромагнитных процессов, протекающих в околоземной плазме. КАВ эффективно взаимодействуют как с частицами плазмы (процессы переноса и ускорения), так и с различными плазменными волновыми модами (трансформация волн). Найденный инкремент развития параметрической неустойчивости γ пропорционален электронной инерционной длине c/ω_{pe} , поэтому представленный в работе процесс распада возможен только при учете конечности массы электронов в дисперсионном уравнении для альвеновских волн. Для оценки γ воспользуемся параметрами магнитосферной плазмы, которые были получены во время экспериментов проведенных на спутнике «Freja» [5]: n_e , $n_i = 2000 \text{ см}^{-3}$, $T_e = 1 \text{ эВ}$, $T_i = 30 \text{ эВ}$, $\delta_e = 120 \text{ м}$, $V_A = 3300 \text{ км/с}$, $\omega_{Bi} = 160 \text{ с}^{-1}$. Подставляя эти значения в выражение для инкремента (21), имеем $\gamma \approx 20 \text{ с}^{-1}$, что соответствует времени развития неустойчивости $\tau = 0.05 \text{ с}$. Из (22) находим пороговое значение амплитуды волны накачки: $E_0 = 0.2 \text{ мВ/м}$. Таким образом, можно отметить, что в тех областях авроральной магнитосферы, где реализуется ситуация $T_e < T_i$, вистлеровская волна накачки, распространяющаяся практически вдоль магнитного поля Земли, может являться источником генерации ВЭЗВ и КАВ.

1. Ахиезер А. И., Ахиезер И. А., Половин Р. В. и др. Электродинамика плазмы. — М.: Наука, 1974.—720 с.
2. Ляцкий В. Б., Мальцев Ю. П. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. — М.: Наука, 1983.—192 с.
3. Юхимук А. К., Федун В. Н., Юхимук В. А., Ивченко В. Н. Параметрическое возбуждение верхнегибридных и кинетических альвеновских волн в магнитоактивной плазме // Космічна наука і технологія.—1998.—4, № 1.—С. 108—112.
4. Юхимук А. К., Федун В. Н., Юхимук В. А., Фалько О. Г. Генерация электромагнитного излучения с помощью верхнегибридной волны накачки в замагниченной плазме // Космічна наука і технологія.—1998.—4, № 1.—С. 102—107.
5. Clark A. E., Seyler C. E. Electron beam formation by small-scale oblique inertial Alfvén waves // J. Geophys. Res.—1989.—104.—P. 17233—17249.
6. Dubinin E. M. Satellite observations of fine scale structure in auroral field-aligned current system // Physics of magnetic flux ropes (A92-31201 12-75). — Washington, DC, American Geophysical Union, 1990.—P. 555—564.
7. Dubouloz N., Potelette R., Malingre M., Treumann R. A. Generation of broadband electrostatic noise by electron acoustic solitons // Geophys. Res. Lett.—1991.—18, N 2.—P. 155—158.
8. Gurnett D. A., Frank L. A. A region of intense plasma wave turbulence on auroral field lines // J. Geophys. Res.—1977.—82.—P. 1031—1050.

9. Gurnett D. A., Shawhan S. D., Shaw R. R. Auroral hiss, Z mode radiation, and auroral kilometric radiation in the polar magnetosphere: DE-1 observations // J. Geophys. Res.—1983.—88.—P. 329—340.
10. Khotyaintsev Y., Ivchenko N., Stasiewicz K., Berthomier M. Electron Energization by Alfvén Waves: Freja and Sounding Rocket Observations // Phys. scr.—2000.—84.—P. 150—155.
11. Singh S. V., Lakhina G. S. Generation of electron-acoustic waves in the magnetosphere // Planet. and Space Sci.—2001.—N 49.—P. 107—114.
12. Tokar R. L., Gary S. P. Electrostatic hiss and the beam driven electron acoustic instability in the dayside polar cusp // Geophys. Res. Lett.—1984.—11.—P. 1180—1183.
13. Tokar R. L., Gary S. P. The electron-acoustic mode // Phys. Fluids.—1985.—28.—P. 2439—2441.
14. Winglee R. M., Pritchett P. L., Dusenberry P. B., et al. Particle acceleration and wave emissions associated with the formation of auroral cavities and enhancements // J. Geophys. Res.—1988.—93.—P. 14567—14590.
15. Yukhimuk A. K., Fedun V. M., Sirenko E. K., et al. Parametric interaction of whistler waves and kinetic Alfvén waves in the space plasmas // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl.—2000.—N 3.—P. 483—489.

**THE NONLINEAR INTERACTION OF THE WHISTLER
WAVE WITH THE INERTIAL ALFVEN WAVE
IN THE MAGNETOSPHERE OF THE EARTH**

V. M. Fedun, A. K. Yukhimuk, A. D. Voitsekhovskaya,
O. K. Cheremnich

On the basis of two-fluid magnetohydrodynamic the nonlinear parametric interaction of the pump whistler wave with high frequency electron acoustic wave and the inertial Alfvén wave in the auroral magnetosphere with a low plasma parameter β is considered. The nonlinear dispersion equation for three-wave interaction, the growth rate and the time of development of the parametric decay instability are found. The theoretical results are used for the analysis of the experimental data obtained during satellite investigations.

Б. И. Калита, В. П. Мезенцев, С. А. Сорока

Львівський центр Інституту космічних досліджень НАНУ—НКАУ, м. Львів

Наземно-космический активный акустический эксперимент «Геофон»

Розглядається можливість проведення наземно-космічного експерименту для виявлення змін в іоносферній плазмі та електромагнітних синалах при акустичних збуреннях на поверхні Землі. Дано обґрунтування доцільності дослідження реакції іоносфери на керовану акустичну дію. Описано основні задачі та можливі експерименти. Пропонується проведення експериментів в регіонах з різною сейсмічною активністю, що може дати інформацію про підготовку землетрусу.

ОБОСНОВАНИЕ ИДЕИ ПРОЕКТА «ГЕОФОН». СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ АКТИВНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИОНОСФЕРЫ

Сущность идеи проекта состоит в синхронных орбитальных и наземных наблюдениях электромагнитных эффектов при акустическом воздействии на ионосферу. Основой проекта будет создание сверхмощного мобильного акустического излучателя в диапазоне 5—30 Гц. Наблюдения реакции нейтральной атмосферы и ионосферы на акустическое возмущение будут производиться в различных диапазонах электромагнитных волн: в оптическом диапазоне, в радиодиапазоне и в области геомагнитных пульсаций. Созданная в рамках проекта бортовая и наземная аппаратура позволит проводить регулярные исследования реакции ионосферы на акустические возмущения в различных географических районах Земли.

Первые исследования, направленные на изучение акустического канала связи приземных слоев атмосферы и ионосфера, шли путем использования научных и промышленных взрывов большой мощности. Наиболее известный в этом направлении проект MACCA (магнитосферно-атмосферные связи при сейсмо-акустических явлениях), проведенный в СССР.

Контрольно-измерительная аппаратура в районе взрыва на больших расстояниях зафиксировала изменения параметров ионосферы. В экспериментах по проекту MACCA проводились и орбитальные измерения на спутниках AUREOL-3 и «Космос-1809». На основе измерений были зафиксированы

низкочастотные электромагнитные излучения из возмущенных зон, альвеновские волны. Методами радиозондирования также были обнаружены разнообразные возмущения в ионосфере.

В особый раздел следует выделить исследования акустического канала литосфера-ионосфера на основе естественных источников звука. Большинство крупномасштабных естественных явлений сопровождается звуковыми излучениями большой интенсивности (землетрясения, цунами, извержения вулканов, ураганы и т. п.). Звуковые излучения этих явлений тоже используются для научных исследований реакции ионосферы на акустические возмущения.

Основными недостатками указанных выше исследований является их спорадичность и слабая контролируемость акустического воздействия. Недостаток взрывных методов заключается в необходимости проведения экспериментов в пустынной местности, вдали от измерительных радиофизических комплексов. Все это резко удорожает исследования и практически исключает возможность регулярных наблюдений.

В рамках проекта «Геофон» предлагается использовать параметрический метод генерации звука, который заключается в нелинейном взаимодействии двух высокочастотных акустических волн и образования низкочастотной волны на разностной частоте. Волна разностной частоты будет распространяться с меньшим затуханием и на большие расстояния.

В отличие от взрывных методов генерации звука параметрический генератор допускает управляемость по частоте и работает длительное время. Мобильность излучателя позволит проводить экс-

перименты в комплексе с другими методами активного воздействия на ионосферу, например нагревым электромагнитным стендом.

До недавнего времени считалось, что заметные возмущения в ионосфере можно получить только при взрывах с тротиловым эквивалентом около 100 т. Однако эксперименты, проведенные в 1998—2002 гг. показали возможность возмущения ионосферы относительно небольшим по мощности акустическим излучателем [1]. Наличие ионосферных возмущений при вертикальном акустическом излучении проверялись радиофизическими методами и прямыми измерениями электромагнитных излучений из возмущенных зон. В частности, проводилась диагностика возмущенных зон над акустическим излучателем методами на просвет и отражение радиоволн декаметрового диапазона.

Проводились измерения вариаций магнитного и электрического полей в диапазоне 1—40 Гц при акустическом возмущении ионосферы. В ряде экспериментов наблюдалась реакция ионосферы на акустические возмущения.

Проведены также наблюдения оптического свечения неба после прохождения акустической волны. Регистрация свечения проводилась фотографическим методом с последующим фотометрированием фотопленки вдоль средней линии кадра. На рис. 1 приведены результаты экспериментальных исследований.

В ходе проведения предварительных экспериментов получены и другие эффекты, однако они нуждаются в более детальной проверке. Фактически открыта новая страница в активных исследованиях ионосферы. Результаты предварительных экспериментальных исследований служат основанием для осуществления проекта одновременных наземных и бортовых наблюдений электромагнитных эффектов при акустическом возмущении ионосферы.

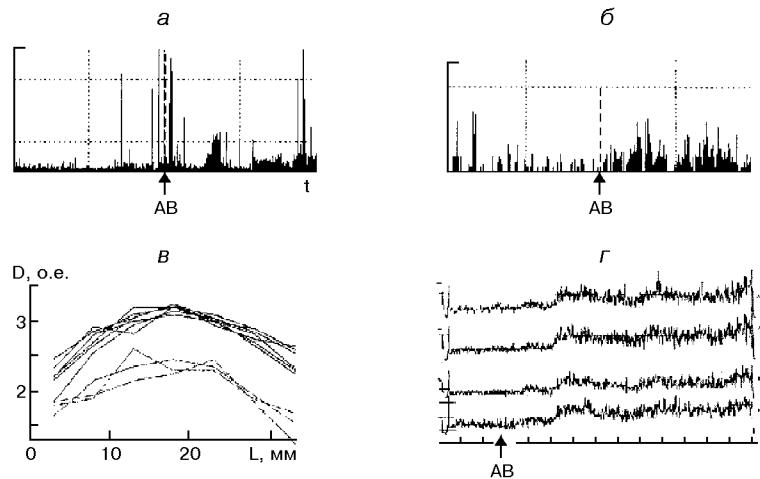


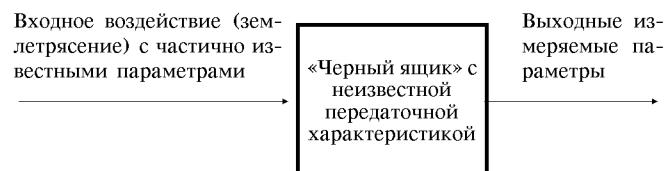
Рис. 1. Электромагнитные эффекты акустических возмущений в атмосфере

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕАКЦИИ ИОНОСФЕРЫ НА УПРАВЛЯЕМЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Ионосфера Земли является тем связующим элементом, через который реализуется влияние космической энергии практически на все земные процессы. Одновременно ионосфера находится под влиянием высокоэнергетических процессов на Земле. Причем воздействие с одной стороны носит электромагнитный характер, а с другой — это механические и электромагнитные колебания.

В ионосферных процессах отображаются как литосферные, так и атмосферные высокоэнергетические явления. Таким образом, ионосферу можно рассматривать как естественный информационный элемент, в котором находят отображение разнообразные земные процессы. Однако использование «ионосферной информации» затруднено в связи с отсутствием сведений о параметрах откликов ионосферы на различные внешние воздействия.

Традиционные методы поиска ионосферных диагностических признаков землетрясений базировались на пассивных измерениях множества геофизических параметров откликов на землетрясения. Не вдаваясь в детали этих методов, их можно представить в виде схемы:



Задача заключается в прогнозировании входного воздействия по измеренным выходным параметрам геофизических полей. Даже в идеализированной математической постановке такая задача не решается.

В рамках проекта «Геофон» будут исследованы электромагнитные отклики ионосферы на полностью известные наземные акустические возмущения. Эти исследования представляют интерес для выяснения роли акустических колебаний в атмосфере в общей цепи причинно-следственных связей процессов в нейтральной атмосфере, ионосфере и космической плазме. Полученная измерительная информация позволит провести комплексный анализ и выявить взаимосвязи между процессами в различных слоях атмосферы и космической плазме. Возможность регулярного наблюдения ионосферных откликов на акустическое возмущение позволяет отслеживать их динамику и зависимость от других параметров.

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ПРОЕКТА И ПРЕДПОЛАГАЕМЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Основные задачи проекта следующие.

- Поиск стабильных информационных признаков в электромагнитных откликах на акустическое воздействие в тропосфере.

- Обоснование параметров системы спутникового мониторинга процессов на Земле, которые сопровождаются интенсивным акустическим излучением.

- Исследование зависимости электромагнитных откликов на наземное акустическое воздействие от сезонных и геофизических факторов.

- Исследование влияния акустического воздействия на тропосферные процессы.

В рамках проекта «Геофон» будут проведены такие эксперименты.

- Проведение измерений электромагнитных откликов на наземное акустическое воздействие в регионах с различной сейсмичностью.

- Проведение синхронных наземных и орбитальных измерений электромагнитных откликов на наземное акустическое возмущение.

- Проведение измерений электромагнитных откликов при одновременном акустическом и электромагнитном (нагревным стендом) воздействии на ионосферу.

Проведение синхронных бортовых и наземных наблюдений позволит повысить надежность обнаружения эффектов акустического возмущения и оценить влияние различных факторов (сезонные изменения, солнечная активность, геомагнитные возмущения и др.).

Часть экспериментов может выполняться с участием только наземных средств. В частности, исследования связи геомагнитных вариаций с акусто-

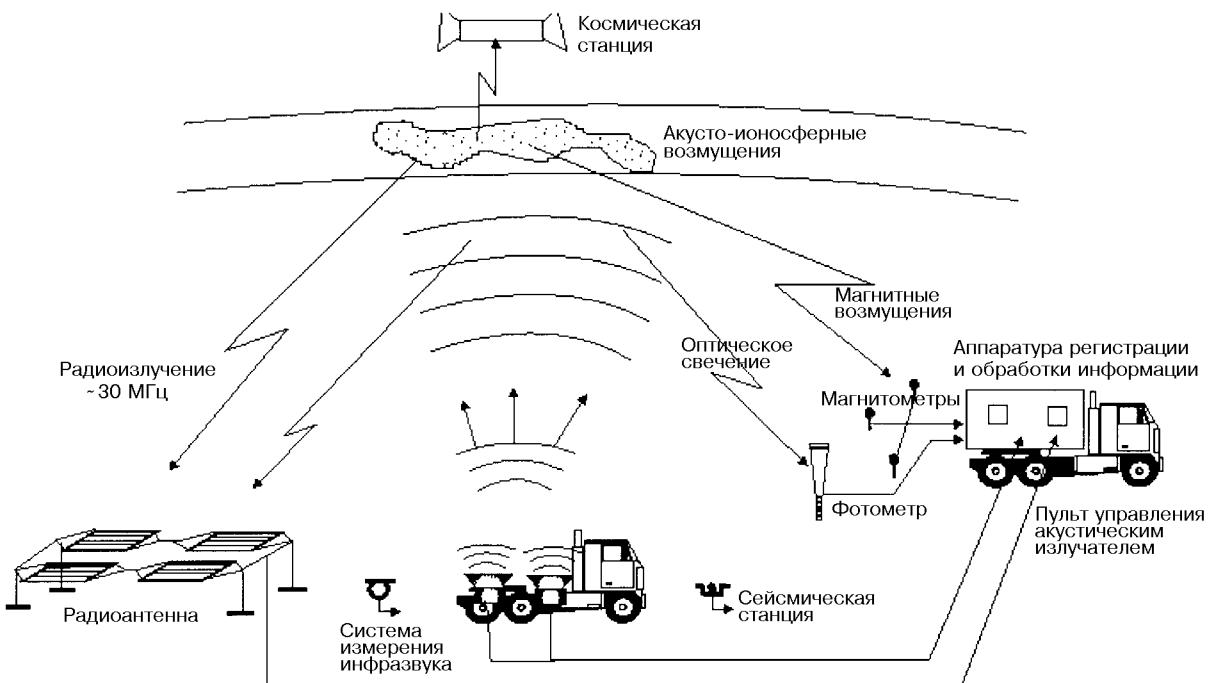


Рис. 2. Общая схема наземно-космического эксперимента «Геофон» и состав наземных измерительных систем

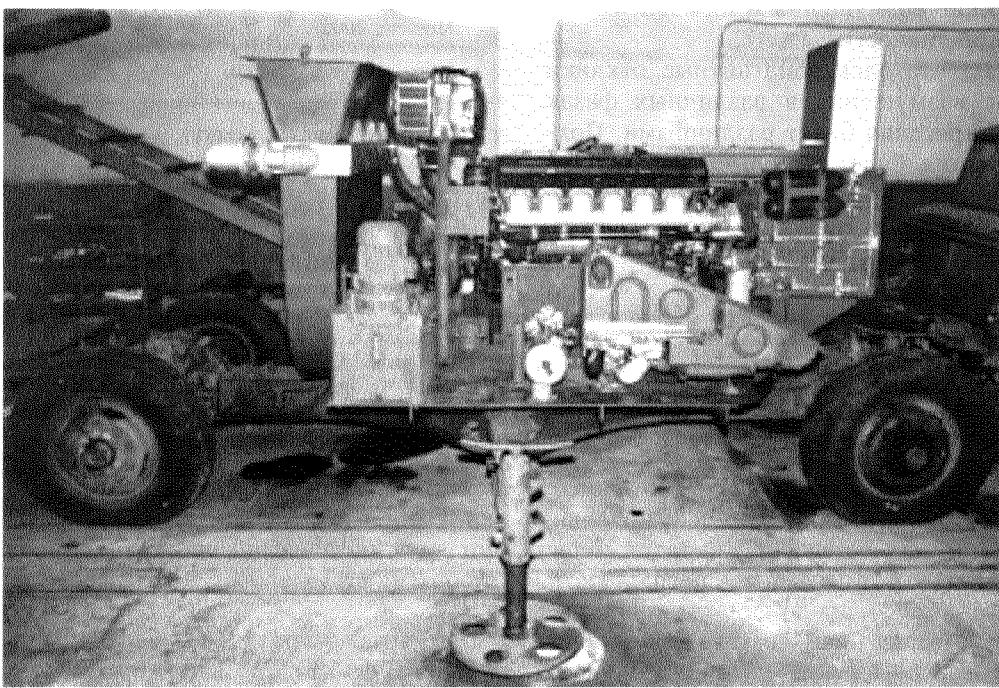


Рис. 3. Мобильный акустический излучатель для исследования акустического канала литосферно-ионосферных связей

электрическими эффектами в нейтральной атмосфере.

СОСТАВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Наземное оборудование. Общая схема наземного оборудования показана на рис. 2. На схеме показаны только основные элементы без оборудования общего обеспечения.

Наземное оборудование будет содержать:

- Мобильный акустический излучатель.
- Комплекс измерения сигналов магнитных вариаций.
- Фотометр.
- Систему измерения радиошумов в диапазоне 30 МГц.
- Систему измерения инфразвука.
- Сейсмическую станцию.

Первые эксперименты предполагается проводить в точке расположения Западного регионального центра специального контроля НКАУ, где уже имеется основное оборудование.

Бортовое оборудование. Для удешевления проекта предполагается орбитальные измерения проводить путем использования измерительных систем,

которые будут разработаны в рамках украинско-российского эксперимента «Обстановка». Можно использовать и измерительные системы французского спутника DEMETER при соответствующих договоренностях с французской стороной.

Всю работу можно разбить на три этапа.

На первом этапе проводится разработка мобильного акустического излучателя и его экспериментальные испытания. Одновременно проводятся исследования электромагнитных сигналов-откликов, измеренных наземными измерительными системами. Эти работы уже проводятся. На рис. 3 показан мобильный акустический излучатель. Результаты первых экспериментальных исследований представлены в работе [2].

На втором этапе проводятся: 1) разработка и изготовление рабочего образца акустического излучателя; 2) установка излучателя в заданную точку проведения эксперимента; 3) синхронные орбитальные и наземные измерения электромагнитных сигналов при акустическом возмущении атмосферы. На этом же этапе проводится сравнение неземных и орбитальных измерений.

На третьем этапе работы акустический излучатель транспортируется в сейсмоактивный регион, и проводятся исследования электромагнитных откли-

ков на акустические возмущения и их зависимость от сейсмической активности.

Предполагается, что электромагнитные отклики на акустические возмущения в различных фазах подготовки землетрясения будут различными. Полученная информация будет использована для создания нового метода сейсмопрогноза. Фактически предлагается создание активного метода сейсмопрогноза.

1. Кошовий В. В., Сорока С. О. Акустичне збурення іоносферної плазми наземним випромінювачем // Космічна наука і технологія.—1998.—4, № 4.—С. 16—26.
2. Kalita B. I., Mezensev V. P., Soroka S. A. Electromagnetic responses during acoustic disturbance in atmosphere // III International Workshop on Magnetic, Electric and Elektro-Mag-

netic Methods in Seismology and Volcanology (MEEMSV-2002, Moscow, 2002).

THE GROUND-SPACE ACTIVE ACOUSTIC EXPERIMENT GEOFON

B. I. Kalita, V. P. Mezentsev, S. A. Soroka

We discuss the possibility to carry out a ground-space experiment for the detection of variations in ionospheric plasma and electromagnetic responses during ground acoustic disturbances. The advisability of the investigation of the ionosphere response to controlled acoustic action is justified. The main problems and possible experiments are described. We propose to perform the experiments in regions with different seismic activity, which can provide the data on the preparation of earthquakes.

Ю. В. Ермилов

Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса

Аналіз вибороакустического состояния ракетных двигателей радиолокационными методами

Рассмотрены проблемы анализа вибороакустического состояния ракетных двигателей радиолокационными методами.

Аварийные ситуации ракетных, авиационных и других энергетических установок, созданных или эксплуатируемых в Украине, выдвигают в настоящее время на первый план проблемы их диагностирования.

Опыт двадцатилетней совместной работы с НПО «Энергомаш» (Россия) показал, что традиционно применяемые у нас и за рубежом спектральные либо корреляционные методы анализа вибороакустических сигналов от вибродатчиков, устанавливаемых в ракетных двигателях, не всегда удовлетворяют предъявляемым требованиям.

Как известно, вибороакустические сигналы представляют собой смесь регулярной составляющей (полигармонический сигнал), шумоподобный «пьедестал», случайный периодический сигнал (узкополосный либо широкополосный) и монотонно затухающий сигнал (ударные возбуждения). Предлагается использовать известные в теории радиолокации методы анализа регулярной составляющей с помощью синхронного детектирования, а для анализа других составляющих применить дисперсионный спектрально-корреляционный метод с использованием согласованных с линейно-частотно-модулированными сигналами.

Наиболее непредсказуемыми являются ударные возбуждения. По принципу возбуждения монотонно затухающие сигналы можно разделить на две группы: сигналы, начало формирования которых известно, т. е. следующие синхронно с импульсами или процессами, которыми они вызваны; сигналы, время формирования которых необходимо определить, так как неизвестно начало формирования импульсов, которыми они вызваны. Для первой группы определить начало появления сигнала можно достаточно точно, поэтому все усилия направлены на реализацию процедур обнаружения и изме-

рения. Вторая группа характеризуется неизвестным началом формирования и частотой следования как возбуждающих процессов, так и самих МЗС. Поэтому первоначально в этом случае решаются вопросы определения начала формирования сигналов и частоты их следования, далее решаются вопросы обнаружения и измерения их параметров.

Статистическая обработка экспериментальных результатов показала, что сигналы, отображающие физические процессы, возникающие при однократных и многократных ударных возбуждениях в различных узлах роторных машин, могут быть описаны суммой монотонно затухающих колебаний (МЗС) при соответствующем выборе их параметров.

Эксперимент показал, что наиболее часто встречаются два вида сигналов:

$$S_1(t) = \sum_{i=1}^m A_i t^{-n_i} e^{-\alpha_i t}, \quad t \geq 0, \quad (1)$$

$$S_2(t) = \sum_{i=1}^m A_i t^{-n_i} e^{-\alpha_i t} \cos(\omega_i t + \varphi_i), \quad t \geq 0, \quad (2)$$

различающиеся принципиально тем, что спектр $S_1(t)$ находится в области нулевых частот, а $S_2(t)$ — в окрестности частот ω_i . Кроме того, эти сигналы могут быть одиночными или периодически повторяться с частотой вращения ротора. Выбором параметров A_i , n_i , α_i , ω_i и φ_i можно аппроксимировать реальные сигналы с высокой степенью точности для широкого класса возмущений. В большинстве случаев достаточно одного члена суммы; такие сигналы будем называть простыми МЗС. Информацию о состоянии объекта могут нести все параметры, входящие в описание МЗС. На практике кроме этих параметров для оценки состояния объекта используют еще такие [6]: τ_1 — длительность МЗС,

определенная по уровню 0.1, 0.05 или 0.01 от максимального значения, выражаясь через обобщенное затухание (декремент) как $\tau_{\text{н}0.1} = 2.3/\alpha$, $\tau_{\text{н}0.05} = 3/\alpha$, $\tau_{\text{н}0.01} = 4.6/\alpha$;

$$S_{\max} = \max \left| S(t) - \int_0^{\tau_{\text{н}}} S(t) dt \right|$$

— максимальное отклонение;

$$K_A = A/A \sqrt{\int_0^{\tau_{\text{н}}} S^2(t) dt}$$

— коэффициент амплитуды;

$$K_\phi = \sqrt{\int_0^{\tau_{\text{н}}} S^2(t) dt / \int_0^{\tau_{\text{н}}} S(t) dt}$$

— коэффициент формы.

Другие моменты исследуемых процессов: центр тяжести, относительный центр тяжести и т. д. менее употребимы, и мы на них останавливаться не будем.

Обнаружение и измерение параметров МЗС происходит на фоне помех.

В качестве помех в работе рассмотрены собственные шумы системы (аппроксимированы независимым случайнным процессом с нормальным законом распределения), импульсные хаотические помехи и помехи гармонического типа.

Процесс, подлежащий обнаружению, является квазидетерминированным сигналом, описываемым выражением (1) или (2), параметры которого могут изменяться случайнным образом. Задача обнаружения таких сигналов на фоне некоррелированных помех (в нашем случае собственных шумов, описываемых нормальным законом распределения) согласно теории статистических решений сводится к задаче обнаружения сигнала с неизвестными параметрами на фоне некоррелированных шумов.

Неизвестными в общем случае могут быть все параметры, входящие в описание сигнала — амплитуда, начальная фаза, декремент, средняя частота колебаний:

$$S(t) = Ae^{-\alpha t} \cos(\omega t + \varphi_0). \quad (3)$$

Однако характер изменения этих параметров от опыта к опыту, от реализации к реализации различный. По данным эксперимента амплитуда и фаза изменяются от реализации к реализации по случайнным законам. Декремент и частота для наблюдателя являются неизвестными, но от реализации к реализации в одном эксперименте их величина не изменяется, так как она определяется физическими параметрами узла (объекта), который их порождает.

Найдем алгоритм (структуру приемника) обнаружения МЗС со случайными амплитудой и фазой при фиксированном декременте и частоте.

Согласно [2] отношение правдоподобия (ОП) для сигнала со случайными параметрами, законы распределений которых известны, может быть получено усреднением ОП для фиксированных параметров по всем возможным значениям:

$$\Lambda(y, f, \alpha) = \int_A \int_{\varphi_0} \Lambda(y, f, \alpha, A, \varphi_0) W(A) W(\varphi_0) dA d\varphi_0,$$

где $\Lambda(y, f, \alpha, A, \varphi_0) = W_{C+N}(y)/W_N(y)$ — отношение правдоподобия с известными параметрами; $W_{C+N}(y)$ — плотность распределения входного процесса $y(t)$ при наличии сигнала $S(t, \varphi, A, f, \alpha)$; $W_N(y)$ — плотность распределения входного процесса при отсутствии полезного сигнала; $W(A)$, $W(\varphi_0)$ — априорные плотности распределения амплитуды и фазы входного сигнала.

Найдем отношение правдоподобия для сигнала со случайной фазой и амплитудой при известной частоте и декременте. Для этого воспользуемся результатами, изложенными в [2, 3, 5].

Процедура нахождения отношения для указанного случая состоит в определении отношения правдоподобия с известными параметрами. Затем определяется диапазон возможных изменений этих параметров и законы их распределений.

При обнаружении сигналов фаза и амплитуда являются мешающими параметрами. Определив их законы распределения, можно будет избавиться от их влияния путем усреднения отношения правдоподобия по всем возможным значениям амплитуды и фазы.

Отношение правдоподобия для сигнала с известными параметрами на фоне белых шумов спектральной плотностью N_0 имеет вид

$$\Lambda(y) = \exp\left(\frac{2Z - E}{N_0}\right),$$

где $Z = \int_0^T y(t) S(t) dt$ — корреляционный интеграл;

$E = \int_0^T S^2(t) dt$ — энергия полезного сигнала. Если

принять, что закон распределения начальной фазы равномерный в пределах от 0 до 2π , а закон распределения амплитуды подчиняется модели флюктуаций

$$W(A) = \begin{cases} \frac{A}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{A^2}{2\sigma^2}\right), & A \geq 0, \\ 0, & A < 0, \end{cases}$$

то отношение правдоподобия при обнаружении сигнала со случайными амплитудой и фазой на фоне некоррелированных шумов будет иметь вид [2, 3, 5]

$$\bar{\Lambda}(y) = \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{A^2 E}{N_0}\right) I_0(2A|Z|N_0) dA.$$

Так как выражение под интегралом неотрицательно, $I_0(x)$ (функция Бесселя) — монотонная функция своего аргумента, то отношение правдоподобия также является монотонной функцией модуля корреляционного интеграла. Так как от входного воздействия зависит только $|Z|$, то решение можно принимать на основании сравнения с порогом значения корреляционного интеграла. Реализация согласованных фильтров для случая МЗС с неизвестными параметрами затруднительна. Поэтому на практике применяют квазисогласованные фильтры, т. е. имеет место рассогласование фильтра и сигнала. В связи с этим необходимо рассматривать вопрос о том, какие потери будет вызывать рассогласование сигнала и фильтра по параметрам, которыми описывается МЗС.

Структурная схема оптимального приемника обнаружения представлена на рис. 1.

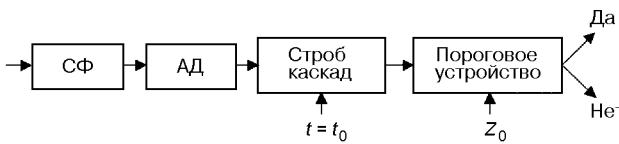


Рис. 1. Структурная схема оптимального обнаружителя СФ — согласованный с ожидаемым сигналом линейный фильтр, АД — амплитудный детектор

В статистической теории обнаружения показано, что такой приемник является оптимальным, так как он обеспечивает максимум вероятности правильного обнаружения $P_{\text{по}}$ при заданной вероятности ложной тревоги $P_{\text{ЛТ}}$, которые связаны между собой следующими соотношениями при выбранных моделях сигнала и помехи:

$$P_{\text{по}} = P_{\text{ЛТ}} \cdot \frac{1}{q^{2/2}},$$

где $q^2 = 2E/N_0$ — отношение сигнал/шум по энергии; E — энергия ожидаемого сигнала; N_0 — спектральная плотность шумов.

На практике частота и декремент (длительность) МЗС неизвестны, поэтому приходится вести обнаружение сигнала в заданном диапазоне частот для различных α , то есть возникает многоальтернативная задача — обнаружение сигнала с принятием

решением относительно его средней частоты и величины декремента. Для этого воспользуемся методикой, изложенной в работах [3—5]. Весь диапазон частот, в котором ведется обнаружение, разбивается на m интервалов равной величины Δf , в одном из которых может появиться сигнал. Для обнаружения МЗС и указания средней частоты с точностью до Δf необходимо вычислить отношение правдоподобия $\Lambda_i(y)$ для каждого интервала и сравнить с порогом

$$\Lambda_i(y) = \int_{\Delta f} P(f) \Lambda(y, f) df, i = 1, 2, \dots, m.$$

Отношения правдоподобия, превысившие порог, отбираются и сравниваются между собой. Средняя частота присваивается по номеру канала, в котором $\Lambda_i(y)$ максимально. Увеличение числа каналов ведет к повышению точности определения частоты, но при этом увеличивается сложность приемника обнаружения.

Очевидно, что выбор числа каналов, полосы пропускания квазисогласованных фильтров определяется, с одной стороны, сложностью системы обнаружения, а с другой — потерями в отношении сигнал/шум, а следовательно, ухудшением качественных показателей как обнаружения, так и оценки параметров МЗС. Потери в отношении сигнал/шум будут зависеть как от рассогласования полосы пропускания и ширины спектра МЗС, так и от расстройки средней частоты сигнала от средней частоты настройки фильтров.

Как правило, построение систем диагностики с одновременной оценкой параметров, когда число оцениваемых параметров больше двух, сильно усложняется из-за многоканальности (рис. 2). Для упрощения построения систем обработки сигналов на практике обнаружение ведут во всем предполагаемом диапазоне возможных изменений параметров сигнала, а затем проводят оценку обнаруженных сигналов.

Как и задача обнаружения ударных возбуждений, задача оценки (измерения) их параметров является статистической, и ее оптимальное решение можно получить на основе методологии раздела теории статистических решений — теории оценивания параметров [1—3, 5]. Из математической модели ударных возбуждений

$$S(t) = A e^{i - \alpha(t - \tau)} \cos[\omega(t - \tau) + \varphi_0]$$

следует, что параметрами, подлежащими оценке, являются амплитуда A , декремент α , время задержки τ (момент появления ударного возбуждения на интервале наблюдения), частота ω . Начальную fazу ударного возбуждения будем считать мешающим

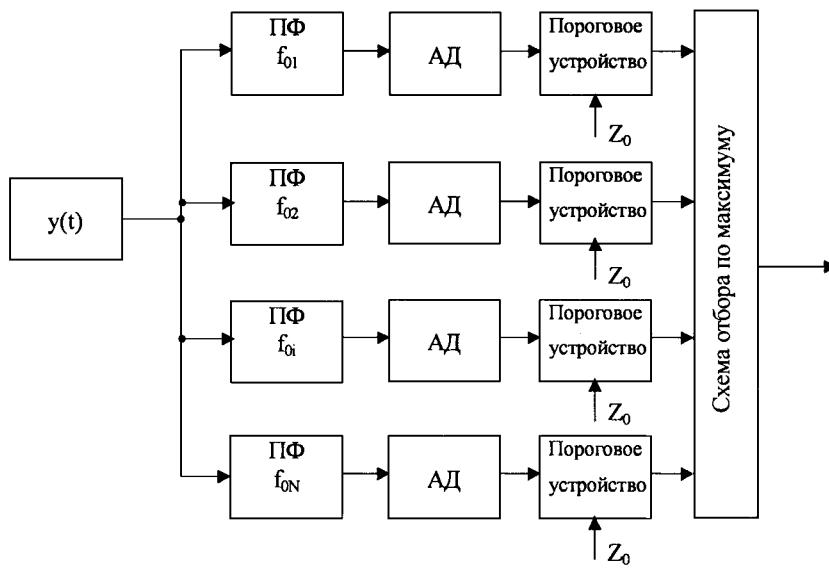


Рис. 2. Структурная схема обнаружителя с полосовыми фильтрами

параметром т. е. параметром, не подлежащим оценке.

В соответствии с общей постановкой задачи статистической оценки параметров сигналов задача оценивания параметров ударных возбуждений может быть сформулирована следующим образом.

Пусть в течение заданного интервала времени $[0 \leq t \leq T]$ принимается некоторая реализация случайного процесса

$$y(t) = S(t; \theta, \varphi_0) + n(t),$$

где $S(t; \theta, \varphi_0)$ — сигнал ударного возбуждения, представленный моделью (1) и содержащий вектор $\theta = [A, \alpha, \tau, \omega]$ неизвестных параметров, подлежащих оценке (информационных параметров) и неизвестный мешающий параметр φ_0 ; $n(t)$ — помеха, представляющая собой белый гауссовский шум со спектральной плотностью N_0 .

Будем также полагать, что информационные параметры ударного возбуждения на интервале наблюдения $[0, T]$ от времени не зависят. Мешающий параметр будем полагать случайной величиной, равномерно распределенной в интервале $[-\pi, \pi]$.

На основе наблюдения и анализа принятой реализации $y(t)$ необходимо решить, какие значения (из заданного интервала возможных значений) принимают информационные параметры в этой реализации. Другими словами, на основе обработки наблюданной реализации $y(t)$ необходимо произвести оценку векторного информационного параметра $\theta = [A, \alpha, \tau, \omega]$.

Оценка параметра сигнала — это некоторым образом выбранная система функций (или одна функция) от наблюдаемых реализаций. Значения функций, входящих в эту систему, при фиксированной реализации $y(t)$ дают оценку неизвестных информационных параметров сигнала.

Оптимальное правило оценивания, как и оптимальное правило обнаружения, определяется наилучшей в том или ином смысле системой функций, которая отыскивается методами теории статистических решений.

Для отыскания оценок параметров ударных возбуждений воспользуемся методом максимального правдоподобия, получившим наибольшее распространение в задачах оценивания параметров радиосигналов [1—4] благодаря его существенным достоинствам:

- оценки, полученные по методу максимального правдоподобия (ОМП), являются асимптотически несмешенными;

- ОМП параметров асимптотически совместно эффективны;

- ОМП параметров асимптотически совместно нормальны;

- если строго (а не только асимптотически) эффективная оценка существует, то ОМП как раз и является этой оценкой.

- ОМП является асимптотически байесовскими оценками.

Термин «асимптотически» эквивалентен условиям большого времени наблюдения или большой энергии сигнала, которые должны выполняться для

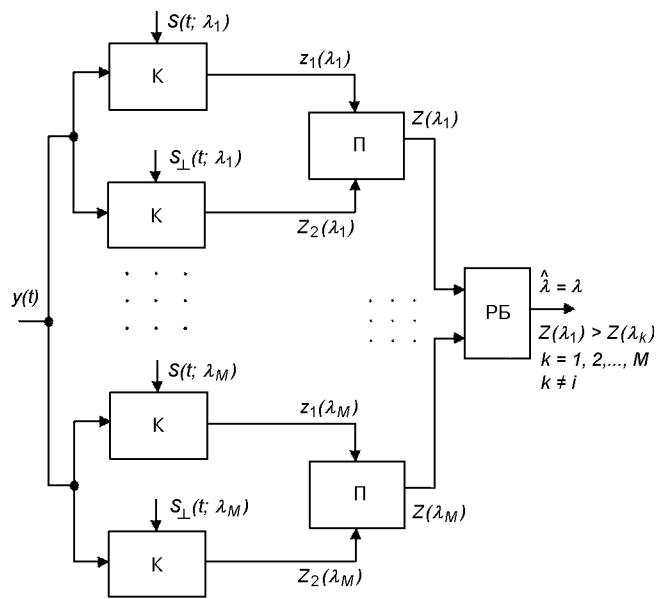


Рис. 3. Структурная схема измерителя параметров

достижения высокой точности измерения.

Поскольку для случая неэнергетического параметра λ ОМП $\hat{\lambda}$ есть такое значение параметра λ , при котором комплексная огибающая наблюдаемой реализации обладает наибольшим сходством (корреляцией) с комплексной огибающей сигнала $S(t; \lambda)$, схему измерителя можно представить как набор M пар квадратурных корреляторов K (рис. 3), каждая из которых формирует пару корреляций $z_1(\lambda_i)$ и $z_2(\lambda_i)$ принятой реализации $y(t)$ с двумя

копиями квадратурных компонентов сигнала $S(t; \lambda_i)$ и $S_{\perp}(t; \lambda_i)$, $i = 1, 2, \dots, M$, где M — количество точек (значений) в заданном априорном интервале значений оцениваемого параметра.

Преобразователь Π осуществляет вычисление $Z(\lambda_i) = (z_1^2(\lambda_i) + z_2^2(\lambda_i))^{1/2}$, после чего решающий блок РБ выдает в качестве ОМП $\hat{\lambda}$ то λ_i , для которого получено максимальное значение $Z(\lambda_i)$.

В заключение следует отметить, что направлением дальнейших исследований должен стать синтез подоптимальных методов обнаружения и оценки параметров МЗС при одноканальной структуре аппаратуры.

1. Куликов Е. И., Трифонов А. П. Оценка параметров сигналов на фоне помех. — М.: Сов. Радио, 1978.
2. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники — М.: Сов. Радио, 1968.
3. Радиотехнические системы / Под ред. Ю. М. Казаринова. — М.: Высш. Школа., 1990.
4. Репин В. Г., Тартаковский Т. П. Статистический анализ при априорной неопределенности и адаптация информационных систем.
5. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. — М.: Сов. Радио, 1966.
6. Цема М. И. Измерение и обработка параметров монотонно затухающих сигналов — Киев: Наукова думка, 1988.

ANALYSIS OF VIBROACOUSTIC CONDITION OF ROCKET ENGINES BY RADAR TECHNIQUES

Yu. V. Ermilov

We discuss some problems arising in the analysis of vibroacoustic condition of rocket engines by radar technique

А. Е. Аснис, В. Ф. Демченко, А. Б. Лесной,
С. П. Заболотин

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАНУ, Київ

Математическое моделирование тепловых
и гидродинамических процессов
при электронно-лучевой бестигельной
зонной плавке монокристалла кремния
в условиях микрогравитации

Методом комп'ютерного моделювання проведено порівняльний аналіз теплового і гідродинамічного стану в монокристалах кремнію, отримуваних методом електронно-променевого бестигельного плавлення в земних умовах і в умовах мікрагравітації.

В различных технологиях получения полупроводниковых материалов существенное влияние на степень физической и химической неоднородности выращиваемых монокристаллов оказывают [4] гидродинамические процессы, развивающиеся в расплаве под действием различных силовых факторов: архимедовой силы (тепловая и концентрационная конвекция), градиента сил поверхностного натяжения на свободной поверхности расплава (термокапиллярная и концентрационнокапиллярная конвекция), пондеромоторной силы, возникающей в жидкости при пропускании электрического тока и др. Достаточно проблематичной представляется возможность управлять гидродинамикой расплава, так как требования, предъявляемые к формированию кристалла (градиенты температур вблизи фронта кристаллизации и его геометрия, степень перегрева расплава, распределение легирующих и примесных элементов) вступают в противоречие с тепловыми условиями создания благоприятной гидродинамической обстановки. С этой целью в ряде технологий используется принудительное воздействие на течение расплава за счет вращения монокристалла, создания электромагнитной силы и др.

Чрезвычайно привлекательным представляется использование космического пространства как уникальной технологической среды для выращивания

полупроводниковых материалов, так как в условиях микрогравитации существенно подавляется тепловая конвекция, определяющая гидродинамику расплава в земных условиях.

В институте электросварки им. Е.О. Патона НАНУ проводятся работы [5] по созданию технологии и аппаратуры для получения совершенных полупроводниковых материалов методом электронно-лучевой бестигельной зонной плавки, при которой расплавленная зона удерживается силами поверхностного натяжения. Кольцевой электронно-лучевой нагреватель, осуществляющий нагрев и плавление цилиндрического образца, перемещается по образующей с постоянной скоростью. В конструкции установки предусмотрена возможность вращения переплавляемого кристалла, плавка в тепловом экране, пропускание постоянного тока вдоль образца, а также сканирование электронного луча с заданной частотой и амплитудой по свободной поверхности расплавленной зоны. Проведенные на опытной установке эксперименты свидетельствуют о том, что в земных условиях плавки обеспечивается устойчивое формирование монокристалла кремния $\varnothing 10$ мм и поддержание высоты расплавленной зоны в диапазоне 8—10 мм.

С целью прогнозирования технологических результатов и отработки параметров режима плавки

в условиях микрографитации разработана математическая модель тепловых и гидродинамических процессов, которая базируется на полной системе уравнений динамики вязкой несжимаемой жидкости и уравнении конвективно-кондуктивного переноса энергии в осесимметричной постановке. Тепловые процессы описываются уравнением энергии в энталпийной формулировке, учитывающей выделение (поглощение) скрытой теплоты на фронте кристаллизации (плавления)

$$\frac{\partial W}{\partial t} + V_r \frac{\partial W}{\partial r} + V_z \frac{\partial W}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

$$r, z \in \Omega = \{0 < r < R, 0 < z < H\},$$

где $W(T) = \int_{T_0}^T c\rho dT + \kappa\rho\eta(T)$ — энталпия, $\eta(T - T^*)$ — функция Хевисайда, T^* — температура кристаллизации, $c(T)$, $\rho(T)$ — удельная теплоемкость и плотность материала, $\lambda(T)$ — коэффициент теплопроводности, $\mathbf{v} = \{v_r, v_z\}$ — вектор скорости движения расплава. На внешней поверхности цилиндрического образца Ω записываются условия радиационного теплообмена со стенками камеры

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \epsilon_{np} \sigma_0 (T^4 - T_k^4), \quad (2)$$

где ϵ_{np} — приведенная степень черноты, T , T_k — температура поверхности формирующегося монокристалла и вакуумной камеры. Дополнительно к (2) при плавке в тепловом экране модель предусматривает возможность радиационного теплообмена боковой поверхности образца с теплозащитным экраном, расположенным ниже фронта кристаллизации и перемещающимся вместе с источником электронно-лучевого нагрева. По длине экрана решается одномерная нестационарная задача теплопроводности с учетом лучистого теплообмена поверхностей экрана с образцом и стенками камеры.

На оси образца записывается условие симметрии температурного поля

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0. \quad (3)$$

Плотность теплового потока электронно-лучевого нагревателя $q(r, t)$ предполагается распределенной вдоль образующей образца по нормальному закону: центр пятна нагрева в регулярном режиме плавки перемещается с постоянной скоростью v_e . Параметры гауссовского закона распределения мощности

нагрева выбирались таким образом, чтобы 90 % мощности выделялось в кольцевом пятне заданной высоты. Для оценки влияния теплоты испарения взвешивали образцы до и после плавки. В результате проведенных измерений установлено, что потери массы не превышают 0.3 %, поэтому затратами тепла на испарение можно пренебречь.

Гидродинамические процессы в расплавленной зоне описываются системой нестационарных уравнений Навье—Стокса движения вязкой несжимаемой жидкости в приближении Обербека—Буссинеска:

$$\frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \nu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} - \frac{V_r}{r^2} \right), \quad (4)$$

$$\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) + F_z, \quad (5)$$

$$\frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r V_r) = 0, \quad (6)$$

где P — давление, ν — коэффициент кинематической вязкости, $F_z = g\beta_T T$ — архимедова сила, g — ускорение свободного падения, β_T — коэффициент термического объемного расширения расплава.

На фронтах Γ_f плавления и кристаллизации задаются условия прилипания и непроницаемости

$$V_n \Big|_{\Gamma_f} = V_\tau \Big|_{\Gamma_f} = 0,$$

где V_n , V_τ — нормальная и касательная к границе составляющие вектора скорости.

На свободной поверхности выполняется условие Марангони, в соответствии с которым тангенциальные напряжения, возникающие в поверхностном слое жидкого металла, уравновешиваются градиентом сил поверхностного натяжения:

$$\nu \frac{\partial V_r}{\partial r} \Big|_{r=R} = - \frac{1}{\rho} \beta_\sigma \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{r=R}, \quad (8)$$

где β_σ — коэффициент поверхностного расширения. Для нормальной составляющей вектора скорости задаются условия непроницаемости

$$V_z(r, 0, t) = 0. \quad (9)$$

Уравнения гидродинамики интегрируются в двумерной области, которая ограничена с одной стороны свободной поверхностью, с другой — фронтами

кристаллизации и плавления, геометрия которых подлежит определению из решения тепловой задачи. Незначительной деформацией свободной поверхности металлической ванны будем пренебречь. В начальный момент времени $t = 0$ задается температура монокристалла и положение центра электронно-лучевого нагрева.

Сопряженная задача гидродинамики и теплообмена решается в естественных переменных методом сеток с использованием неявных разностных схем. Для аппроксимации уравнений конвективно-кондуктивного переноса энергии и импульса используется совместный лагранжево-эйлеровский метод [1, 3], основная идея которого состоит в аппроксимации на локальных лагранжевых сетках конвективных членов в уравнениях энергии и движения вместе с субстанциональными производными. Проведенные нами теоретические исследования и вычислительные эксперименты, выполненные на тестовых задачах, показали [2], что предложенный метод позволяет проводить расчеты с высокой точностью на достаточно грубых временных сетках благодаря подавлению эффектов счетной диссиляции. Системы сеточных уравнений решаются при помощи высокоэффективной вычислительной процедуры ORTOMIN.

Расчеты проводились для образца $\varnothing 1$ см и длиной 10 см на сетке 30×300 узлов; мощность Q электронно-лучевого нагревателя и скорость его

перемещения v_e варьировались в пределах: $Q = 260...300$ Вт, $v_e = 2...10$ см/ч.

На рис. 1, а представлено температурное поле и картина течения расплава рис. 1, б при зонной плавке монокристалла кремния в земных условиях для $Q = 280$ Вт, $v_e = 35$ мм/ч; источник электронно-лучевого нагрева сфокусирован в пятно высотой $h = 3$ мм. В этом случае гидродинамическое состояние расплавленной зоны формируется преимущественно под воздействием архимедовой силы: на свободной поверхности возникает восходящий поток расплава, который вблизи фронта плавления разворачивается в радиальном направлении, образуя тороидальный вихрь, центр которогомещен к фронту плавления. Наибольшая скорость течения наблюдается на свободной поверхности в зоне максимального тепловыделения луча, а также в осевых участках жидкого расплава (эффект цилиндричности образца). Интенсивным течением охватывается большая часть центральных объемов расплавленной зоны. Вдоль фронта кристаллизации конвективные потоки имеют наименьшую интенсивность, особенно в осевой и приповерхностной зоне, где характеристическая скорость течения составляет 0.08 см/с.

Тепловое состояние образца характеризуется близкой к плоской геометрией фронта кристаллизации (изотерма 3, рис. 1, б), что благоприятным образом сказывается на формировании монокристалла с высокой однородностью свойств. Вычисли-

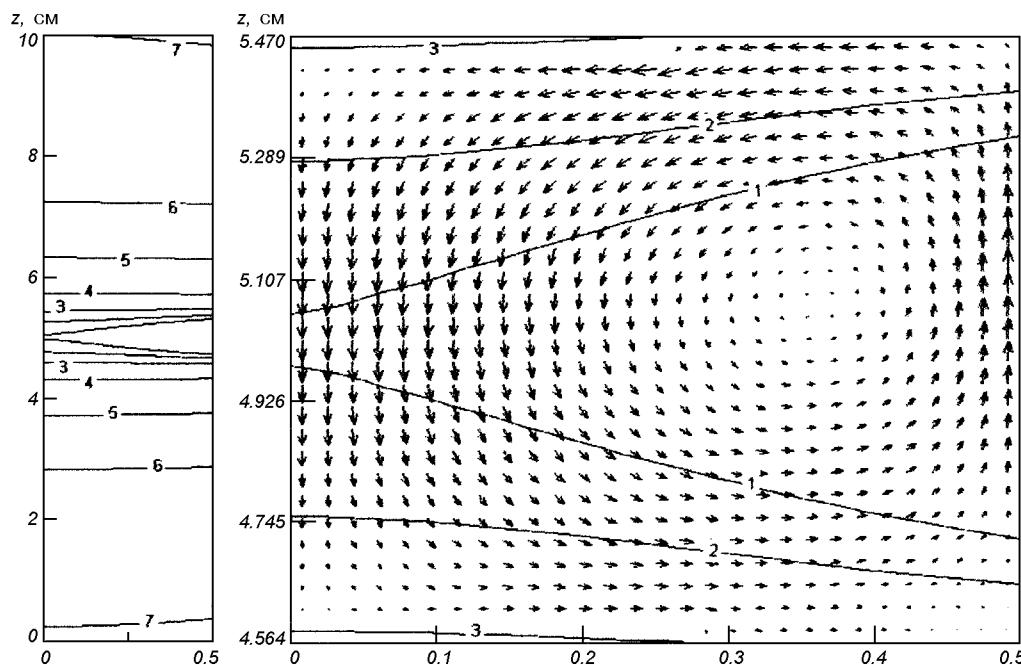


Рис. 1. Поле температур и течение расплава в земных условиях

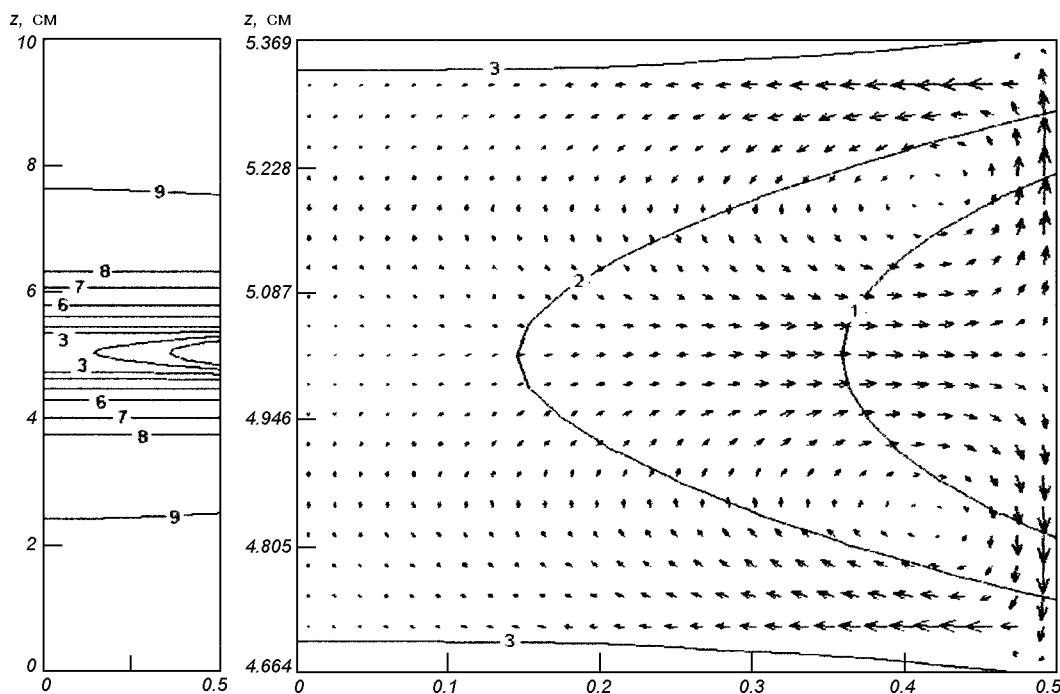


Рис. 2. Поле температур и течение расплава в условиях микрогравитации

тельный эксперимент по исследованию влияния режимов плавки на размер расплавленной зоны показал, что высота зоны определяется мощностью электронно-лучевого нагрева и практически не зависит от скорости v_e перемещения источника нагрева в диапазоне скоростей плавки 1–10 см/ч. Последнее объясняется низкими значениями (порядка 0.001) теплового критерия Пекле, рассчитанного по значению v_e . Эти результаты вычислений хорошо согласуются с данными экспериментов; при этом рассчитанная высота зоны расплава отличается от экспериментальной на 5–7 %. Существенное влияние на перегрев расплава выше температуры кристаллизации, а следовательно, и на интенсивность конвекции в расплавленной зоне имеет степень сосредоточенности источника электронно-лучевого нагрева. Так, при $h = 9$ мм максимальный перегрев расплава на свободной поверхности ванны не превосходит 60 °C, соответственно этому уменьшаются скорости течения расплава.

В отличие от земных условий плавки, течение расплава в условиях микрогравитации (рис. 2) формируется преимущественно под действием термокапиллярной силы, в результате которой в расплаве образуется два встречных глобальных торoidalных вихря, центры которых также смешены к фронту плавления и свободной поверхности распла-

ва. Интенсивное перемешивание расплава возникает только в приповерхностной зоне, удаленной от свободной поверхности на половину радиуса образца, в то время как в центре расплава наблюдается слабоинтенсивное течение.

Максимальные скорости течения оказываются в 5–6 раз меньшими, чем в земных условиях. Вследствие этого интенсивность отвода тепла конвективными потоками из зоны электронно-лучевого нагрева уменьшается — это приводит к повышению температуры перегрева свободной поверхности расплава и снижению теплоусвоения образцом мощности электронно-лучевого нагревателя за счет более высоких потерь тепла на излучение с боковой поверхности образца. По сравнению с земными условиями высота расплавленной зоны уменьшается на 10–15 %, и образуется более выпуклый фронт кристаллизации с величиной прогиба 0.35 мм. Поэтому в конструкции полетного варианта установки предусматривается возможность регулирования распределением плотности теплового потока электронно-лучевого нагрева, а также специальные средства целенаправленного воздействия на лучистый теплообмен образца с камерой, позволяющие поддерживать практически плоский фронт кристаллизации при невысокой степени перегрева расплава.

Исследования, проведенные в настоящей работе, показывают, что технология электронно-лучевой бестигельной зонной плавки позволяет в определенных пределах управлять интенсивностью термо-капиллярной конвекции, возникающей в результате действия поверхностной силы, в отличие от других способов принудительного воздействия на течение расплава, например, электромагнитной силы, распределение которой имеет объемный характер и трудно поддается регулированию.

1. Демченко В. Ф., Лісний О. Б. Лагранжево-еїлеровий метод чисельного розв'язку багатовимірних задач конвективної дифузії // Доп. НАН України.—2000.—№ 11.—С. 71—75.
2. Демченко В. Ф., Лісний О. Б. Порівняльний аналіз дисипативних властивостей різницевих схем для багатовимірних задач конвективної дифузії // Математическое моделирование.—2000.—№ 1(6).—С. 20—24.
3. Ляшко И. И., Демченко В. Ф., Вакуленко С. А. Вариант метода расщепления уравнений динамики вязкой жидкости

на лагранжево-эйлеровых сетках // Докл. АН УССР. Сер. А.—1981.—С. 43—47.

4. Мильвидский М. Г., Картавых А. В., Раков В. В. Выращивание монокристаллов из расплавов в условиях космического полета // Поверхность.—2001.—№ 9.—С. 17—35.
5. Патон Б. Е., Лапчинский В. Ф. Сварка и родственные технологии в космосе. — Киев: Наук. думка, 1998.—182 с.

MATHEMATICAL MODELLING OF THERMAL AND HYDRODYNAMIC PROCESSES IN THE ELECTRON BEAM FLOATING-ZONE MELTING OF SILICON MONOCRYSTAL UNDER MICROGRAVITY CONDITIONS

A. E. Asnis, V. F. Demchenko,
A. B. Lesnoi, and S. P. Zabolotin

Using computer modelling, we carried out the comparative analysis of thermal and hydrodynamic situation in the silicon monocrystals produced by electron beam floating zone melting under the terrestrial and microgravity conditions.

В. П. Майборода, Г. М. Молчановская

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. Н. Францевича НАНУ, Київ

Структурные мотивы и процессы массопереноса в расплавах

Дослідження присвячені визначенню можливої спадкової анізотропії самодифузії в металевих розплавах. Будова рідкого Zn зіставляється з замороженими структурами зразків. Для цього перед затвердінням проба відбирається з використанням ефекту розшарування рідини на структурні фрагменти. Встановлено наявність в розплавах шарових фракталів і вільного об'єму у вигляді розсипу пор, які мають огранку. Будова киплячого розплаву характеризується колоїдами. Внутрішній об'єм колоїдів містить смугастий композиційний мотив. Вільний об'єм замороженої структури киплячого розплаву розподілений по межах колоїдів. На основі даних обґрунттовується вибір орієнтаційних параметрів монокристалів Zn для досліджень процесів самодифузії в його розплавах в умовах мікрогравітації.

Имеющиеся в настоящее время обширные экспериментальные [3] и теоретические [1] данные по диффузии в металлических расплавах не могут быть обобщены в рамках единой модели строения жидкостей. Наиболее распространенным является положение о том, что атомы в расплавах подвержены трем типам движения: трансляционным, колебательным и коллективным в составе микрогруппировки или кластера. Но даже учет этих трех видов перемещения не позволяет предсказуемо определять скорость диффузии элементов в металлургических расплавах. Пренебрегая незначительной величиной массопереноса внутри кластера и принимая, что основное диффузионное перемещение осуществляется кластерами и активированными атомами (атомы разупорядоченной зоны), Гаврилин в работе [1] приводит расчетные данные коэффициента самодиффузии в жидких металлах вблизи температуры плавления, которые для металлов в 2–3 раза меньше экспериментально наблюдаемых. В железе имеет место обратный эффект. Расчетное значение коэффициента диффузии в 6 раз превышает экспериментальное.

Не исключая экспериментальных трудностей по предотвращению влияния на параметры массопереноса внешних факторов, таких как гравитация и конвекция, тем не менее совершенно очевидно, что дело не только в этом, а прежде всего в том, насколько достоверно та или иная модель строения расплавов соответствует действительности. По-ви-

димому, и моноатомная, и кластерная модели слишком упрощенно отображают строение жидкостей и этим предопределяют расхождение между экспериментальными и теоретическими параметрами диффузии. Традиционно кинематическая вязкость расплавов и диффузия являются объектом приложения при изучении структурных аспектов строения жидкостей. Поэтому, собственно, и настоящая работа направлена на изучение структурных мотивов специфического дальнего упорядочения расплавов на основе диффузионных процессов.

Впервые наличие более сложного композиционного мотива строения жидких металлов было обнаружено при переплавных процессах в 1930-е гг. Эффект был обнаружен Шейлем и Даниловым при переплаве алюминиевых слитков [2]. Было установлено, что если для переплава использовать мелкозернистую заготовку, а переплав осуществлять без перемешивания, то и слиток получается мелкозернистым. Если в качестве шихты использовать заготовку с крупнозернистым строением, то после плавления затвердевший слиток также крупнозернистый. Наследственное сохранение величины зернистости образца после переплава в условиях отсутствия макроконвекции свидетельствует о наличии и других, кроме кластерных, «композиционных» мотивов строения расплавленного монокристаллического зерна, которые ориентационно отличаются от аналогичных «фрагментаций» в расплавах соседних зерен. Это строение жидкости не

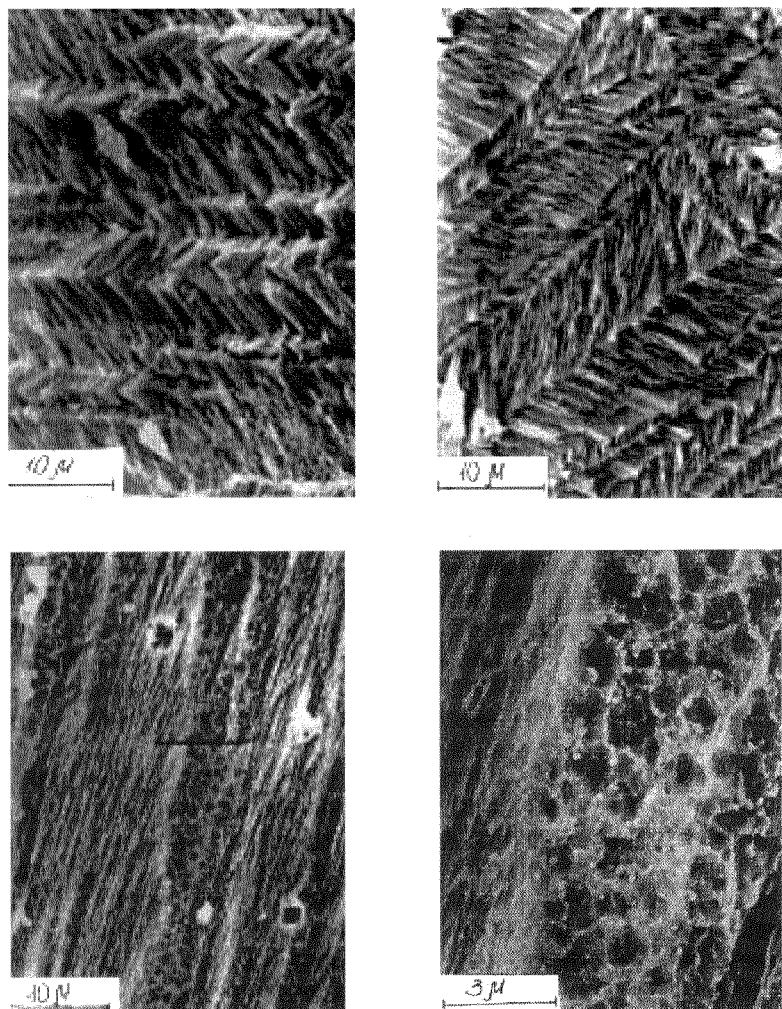


Рис. 1. Структура цилиндрических проб цинка, отобранных при различных температурах расплава: *а* — 823 К, *б* — 973 К, *в* и *г* — 1023 К

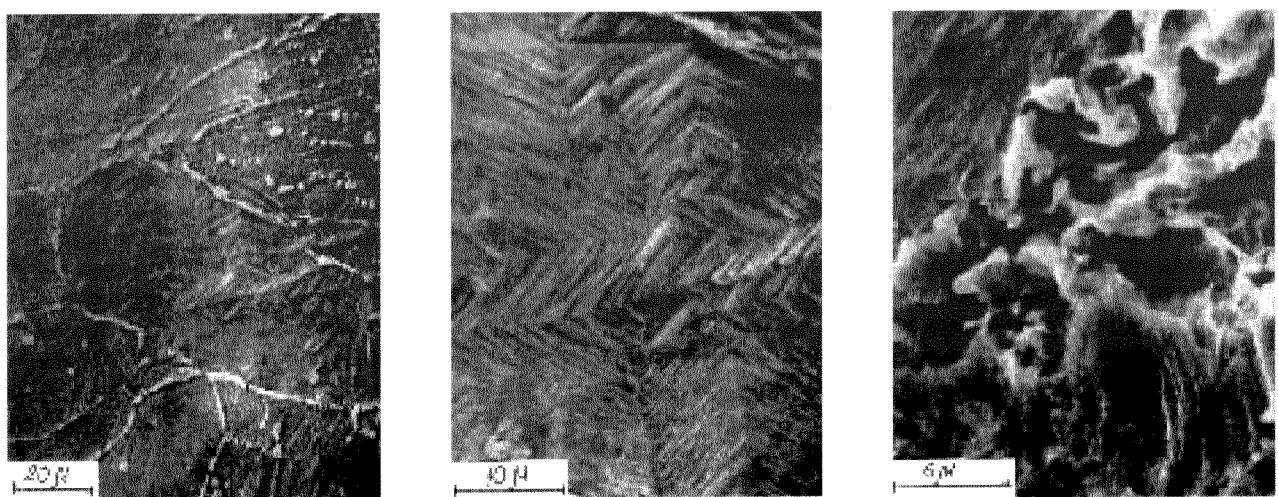


Рис. 2. Структура двух типичных участков цинка (цилиндрические пробы), отобранного из расплава в момент кипения (1183 К)

отличается от коллоидного. При таком строении макрообъемов расплава наиболее активными артериями массопереноса должны быть «рыхлые» межколлоидные границы. Внутри зерна-коллоида [6] наблюдается нисходящая по масштабности подвижная полифрагментная структурная система, которая, по-видимому, также представляет соответствующие зоны массопереноса вещества. Наименьший структурный элемент этой иерархической системы составляет размеры в ширину от 2 до 5 нм и в длину от 10 до 30 нм [13], находится в постоянном движении [11], взаимно ориентированном по отношению к соседям [12] и имеет кристаллическое строение. Из этой модели следует, что проникновение диффузанта может осуществляться по всем элементам структурной системы расплава. Не отрицая возможности перемещения диффузанта по межклластерным границам, хотелось бы отметить, что экспериментальное наблюдение этого процесса чрезвычайно затруднено малым разрешением высокотемпературной электронной микроскопии. Не изучена экспериментально также природа межклластерных зон, например, так, как изучены межзеренные или субзеренные границы в поликристаллах. Поэтому утверждать, что диффузионный массоперенос в расплавах осуществляется в основном по межклластерному пространству пока несколько преждевременно. Не совсем очевидна универсальность и диффузии кластерами, ибо, например, в пределах коллоида не наблюдается пор такого размера. Другое дело межколлоидные границы. По-видимому, эта структурная составляющая является наиболее вместительной, как для поатомной, так и кластерной диффузии.

Изучению влияния этих структурных аспектов строения расплавов на процессы массопереноса в условиях микрографитации, а равно и наличию структурных мотивов дальнего упорядочения в металлических расплавах и направлена данная работа.

На первом этапе в качестве объекта исследований предлагаются монокристаллы цинка. При исследовании структурных изменений цинка прямыми методами [4], было установлено возникновение спонтанной фрагментации пластинчато подобной структуры зерен на стадии, предшествующей плавлению. Впервые этот эффект наблюдался на железе [8], меди [5], олове [6] и других металлах. На олове и галии [6, 13] подобная полидоменная структура наблюдалась и на поверхности расплавов *«in situ»*, а также в виде наследственных структур [7], если металл перед затвердеванием пропускать через капилляры диаметром 4–6 мм. Близость мозаичного строения расплавов и затвердевших специфически получаемых образцов позволяет ис-

пользовать эту методику для косвенного изучения строения расплавов во всем температурном интервале существования жидкости.

Работы проводились на цинке ЦО чистоты 99.96 % мас. Пробы цилиндрических образцов в трубы диаметра 4 мм отбирались при температурах 823 К, 973 К, 1023 К и из кипящего расплава — 1183 К. Во всех случаях исследовался косой срез образца под углом 45° к оси цилиндра.

Структуры шлифов цинка даны на рис. 1. Их анализ показывает, что повышение температуры перегрева расплава с 823 К до 973 К приводит к утонению пластинчатых фрагментов и, формально, к увеличению центров кристаллизации. Структура стадии предкипения отличается тонкополосчатым вытянутым строением, которое разделено слоистыми зонами ямочного или пузырчатого вида. Структура образца, полученного из кипящего расплава (рис. 2, а) является зеренной с внутренней тонкополосчатой фрагментацией, но более дисперсной, чем на рис. 1, б. В отличие от структуры металла, отобранного на стадии предкипения (рис. 1, в, г) внутренняя структура зерен, полученная из кипящего металла, не содержит пузырчатых зон (рис. 2, б). Газовая составляющая, по-видимому, сосредоточена уже в основном по границам зерен (рис. 2, в). Строение этих границ напоминает микрократеры кипящей вязкой жидкости.

Аргументы в пользу того, что приведенные структуры представляют собой замороженное строение расплава цинка, следующие. Во-первых, структура на рис. 1, а, близка к структуре, приведенной в работе [4], и отражает переход к жидкому состоянию. Образец, полученный из расплава с большим перегревом, должен обладать меньшим числом центров кристаллизации и, соответственно, большими размерами дендритных игл или пластин.

В данном же случае наблюдается обратный эффект. Пластины (иглы) на рис. 1, б, тоньше, чем на рис. 1, а. Эта тенденция не случайна, ибо повышение температуры до 1023 К еще больше утоняет полосчатые фрагменты (рис. 1, в). Стадия предкипения отличается интенсивным газообразованием. Этот процесс в виде пузырчатых зон, имеющих огранки, надежно фиксируется структурой цилиндрических проб в виде замороженного коллоидного строения расплава, а коллоиды, в свою очередь, имеют наиболее мелкую пластинчатую фрагментацию. В традиционном понимании кипящий металл должен обладать наименьшим числом центров как для гетерогенного, так и для гомогенного зарождения кристаллов. В данном случае (рис. 2, б), приписывая каждой микропластине центр кристаллизации, мы вынуждены были бы

констатировать, что их гораздо больше в кипящем расплаве, чем в расплаве при температуре 823 К (рис. 1, а). Заметно также, что поры стадии предкипения (рис. 1, в, г) имеют огранку. Совершенная огранка ямок травления наблюдается на никеле и алюминии [9, 10]. Возможно, центрами ямок травления на Ni и Al являются не включения, поскольку для экспериментов использовались высокочистые материалы, а вакансационные поры в расплаве, которые накапливаются по мере его перегревания. Газовые пузыри, судя по рис. 2, в, образуются при температуре кипения путем объединения вакансационных пор и миграции к внутренней поверхности коллоидов и к «зеркалу» расплава.

Эти данные могут быть непосредственно использованы при исследовании микроскопических механизмов самодиффузии и диффузии в расплавах. При изучении самодиффузии цинка в условиях термоградиента на орбитальной космической станции «Скайлэб» (эксперимент № 558, А. Юкенва) в течение одного часа проникновение изотопа ^{65}Zn составило 2 см. Расплав при этом получали плавлением поликристаллической заготовки. Это завышенное проникновение диффузанта в условиях отсутствия конвекции может быть связано с «рыхлым» строением и термической активностью межколлоидных зон.

Поэтому в экспериментах необходимо исключать не только конвекцию расплава, связанную в том числе и с гравитационным воздействием, но и влияние на массоперенос межколлоидных или других внутренних границ, составляющих композиционный мотив строения расплава [14]. Основными артериями массопереноса являются вакансационные потоки, которые сосредоточены в большей мере в зонах, фрагментирующих расплав и обуславливающих наследственные эффекты.

Для определения возможных преимущественных направлений самодиффузии в жидкости расплав необходимо получать плавлением монокристалла Zn двух ориентаций (ось цилиндра образца параллельна и перпендикулярна к оси С). Изотоп ^{65}Zn получать облучением торца цилиндра монокристалла. Плавление производить в запаянной ампуле, соответствующей форме образца в термоградиентном поле. Эти условия позволят определить удельную долю кристаллоподобного механизма диффузионного массопереноса на большие расстояния в жидких металлах, а также степень сохранения в макрообъеме расплавленного без перемешивания и растекания большого монокристалла дальнего трансляционного «структурного» мотива [14].

1. Гаврилин И. В. Плавление и кристаллизация металлов и сплавов. — Владимир: Владимирский государственный университет, 2000.—260 с.
2. Данилов В. И. Строение и кристаллизация жидкостей. — Киев: Изд-во АН УССР, 1956.—568 с.
3. Ершов Г. С., Майборода В. П. Диффузия в металлургических расплавах. — Киев: Наук. думка, 1990.—224 с.
4. Майборода В. П. Влияние обработки расплава на структуру и плотность цинка. — М., 1990.—Деп. в ВИНИТИ 17.05.90, № 2711-В90 (МФ, № 5).
5. Майборода В. П. Изменение структуры меди на стадии предплавления // Изв. АН СССР. Металлы.—1990.—№ 4, С. 49—52.
6. Майборода В. П. Исследование поверхности олова при плавлении // УФЖ.—1991.—36, № 7.—С. 1083—1086.
7. Майборода В. П. Влияние потоковой обработки расплава на структуру алюминия, никеля и меди // Расплавы.—1991. № 3.—С. 115—117.
8. Майборода В. П., Лисенко А. А. Исследование природы возникновения ультрамелкокристаллической реечной структуры железа на стадии предплавления. — Киев, 1986.—27 с.—(Препринт / АН УССР. Ин-т проблем материаловедения; № 12).
9. Майборода В. П., Макара В. А., Молчановська Г. М. та ін. Структуроутворення при охолодженні перегрітого розплаву алюмінію // Доп. НАН України.—2001.—№ 11.—С. 64—67.
10. Майборода В. П., Максимова Г. О., Молчановська Г. М. та ін. Спадкові структури, отримані з розплаву нікелю // Вісник Київ. ун-ту. Сер. Фізико-математичні науки.—2000.—Вип. 2.—С. 520—523.
11. Майборода В. П., Трефилов В. И., Максимова Г. А., Рево С. Л. Прямое исследование субмикроструктурных изменений конденсата золота при нагреве // Металлофизика и новейшие технологии.—1997.—19, № 8.—С. 19—22.
12. Майборода В. П., Трефилов В. И. и др. Изучение влияния температуры на ориентацию кристаллических островков олова в тонких пленках // Металлы.—1999.—№ 2.—С. 124—127.
13. Maiboroda V. P. // Thin Solid Films.—191-195, N 1-2.—P. 357—366.
14. Maiboroda V. P., Molchanovskaya G. M. // Космічна наука і технологія.—2000.—6, № 4, С. 22—23.

THE STRUCTURAL MOTIVES AND PROCESSES OF MASS TRANSFER IN THE MELTS

V. P. Maiboroda, G. M. Molchanovskaya

The investigations are dedicated to determination of possible hereditarily anisotropy of selfdiffusion in the metal melts. The building of the melt Zn is comparing with the frozen structures of the samples. In this purpose the sample selection before solidification was made with using of the effect of separation of liquid on the structural fragments. The availability in melts the layer fractals and the free volume like deposit of pores that have cuts is established. The building of the boiling melt is characterized by colloids. The internal volume of colloids contain the strip compositional motive. The free volume of the frozen structure of boiling melt distribute among boundaries of colloids. On the base of data the choice of orientation parameters of monocrystals of Zn are substantiated for the investigation of the processes of selfdiffusion in its melts in conditions of microgravitation.