



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ДОКЛАД

РЕЗУЛЬТАТЫ
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ
КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
в России
1999–2001

НАУКА

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СОВЕТ ПО КОСМОСУ

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCE
COUNCIL FOR OUTER SPACE

**THE RESULTS
OF FUNDAMENTAL
SPACE RESEARCH
in Russia
1999–2001**

NATIONAL REPORT

Edited by A.A. Boyarchuk



MOSCOW NAUKA 2004

РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ в России 1999–2001

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ДОКЛАД

Ответственный редактор А.А. Боярчук



МОСКВА НАУКА 2004

Редакционная коллегия

- | | |
|------------------|---|
| Боярчук А.А. | – академик, председатель редколлегии |
| Котельников В.А. | – академик, заместитель председателя редколлегии |
| Соколова Л.Ф. | – ответственный секретарь редколлегии, Исполнительное бюро по космосу (ИБК) РАН |
| Аким Э.Л. | – д.ф.-м.н., Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН |
| Алферов А.В. | – к.э.н., ИБК РАН |
| Арманд Н.А. | – д.т.н., Институт радиотехники и электроники РАН |
| Галеев А.А. | – академик |
| Григорьев А.И. | – академик |
| Ораевский В.Н. | – д.ф.-м.н., Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН |
| Осипьян Ю.А. | – академик |
| Панасюк М.И. | – д.ф.-м.н., НИИ ядерной физики МГУ им. М.В. Ломоносова |
| Попов Г.А. | – член-корреспондент РАН |

Editorial Board:

- | | |
|-----------------|--|
| Boyarchuk A.A. | – academician, Editorial Board Chairman |
| Kotelnikov V.A. | – academician, Editorial Board Vice-Chairman |
| Sokolova L.F. | – executive secretary of the Editorial Board, RAS Executivr Space Bureau (ESB) |
| Akim E.L. | – doctor of Physics, Keldysh Institute of Applied Mathematics of the RAS |
| Alferov A.V. | – candidate of economics, RAS ESB |
| Armand N.A. | – doctor of technics, RAS Institute of Radio Engineering and Electronics |
| Galeev A.A. | – academician |
| Grigoryev A.I. | – academician |
| Oraevsky V.N. | – doctor of Physics, RAS Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphera and Radiowaves Propagation |
| Ossipyan Yu.A. | – academiain |
| Panasjuk M.I. | – doctor of Physics, Scientific-Research Institute of Nucleus Physics of Lomonosov Moscow State University |
| Popov G.A. | – corresponding member of the RAS |

Результаты фундаментальных космических исследований в России. 1999–2001. Национальный доклад / Отв. ред. А.А. Боярчук. – М.: Наука, 2004. – 232 с.

ISBN 5-02-002860-6

Национальный доклад охватывает трехлетний период (1999–2001 годы) проведения фундаментальных космических исследований и подготовлен Советом Российской академии наук по Космосу на основе материалов, представленных институтами РАН и высшими учебными заведениями, ответственными за научные программы космических проектов Федеральной космической программы России.

По сети АК

ISBN 5-02-002860-6

© Российская академия наук, 2004
© Издательство “Наука” (художественное оформление), 2004

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий доклад, охватывающий трехлетний период (1999–2001 гг.) проведения Фундаментальных космических исследований (ФКИ), подготовлен Советом РАН по космосу. Материалами к докладу послужили результаты институтов РАН и вузов, ведущих научные программы космических проектов Федеральной космической программы России.

В докладе кратко изложено состояние работ по космическим проектам научного назначения Федеральной космической программы России, которые находятся на этапах реализации летных научных программ, обработки космических данных завершенных летных программ, опытно-конструкторских и научно-исследовательских работ. Основные характеристики этих космических проектов, в том числе и технические данные космических аппаратов, научные задачи, состав комплекса научной аппаратуры и перечень основных исполнителей работ, приведены в Приложениях к Национальному докладу.

Российские космические проекты были направлены на решение актуальных научных проблем и задач в следующих направлениях ФКИ: космическая биология и физиология; исследования Земли из космоса; Солнце и солнечно-земные связи; исследования планет и малых тел Солнечной системы; внеатмосферная астрономия; физика космических лучей.

В течение трех лет основные усилия российских организаций и специалистов были направлены на реализацию летной научной программы международного проекта “Интербол”, подготовке к запуску российско-украинского космического аппарата (КА) для комплексных исследований Солнца по проекту “Коронас-Ф”, реализацию летной научной программы, обработку и интерпретацию полученных данных; создание и наземную отработку космических аппаратов серии “СПЕКТР” и комплексов научной аппаратуры для проведения астрофизических наблюдений в рамках международных проектов “Спектр–Рентген–Гамма”, “Спектр–Радиоастрон” и “Спектр–УФ”.

В рамках проектов “Спектр” для создания современной научной аппаратуры и проведения астрофизических наблюдений и ис-

следований создана широкая кооперация научных организаций практически всех развитых стран, включая США, Великобританию, Францию, Германию, Италию, Данию, Швецию, Испанию, Болгарию, Польшу, Израиль, Японию и Китай.

Российские ученые принимали участие в международных космических проектах НАСА, ЕКА, Италии и Украины. Ими был создан детектор быстрых нейтронов “Хенд” в составе комплексного эксперимента Gamma Ray Spectrometer (GRS) по измерению гамма-излучения и нейтронного излучения Марса с борта находящегося на орбите Марса космического аппарата НАСА “Марс Одиссей”. На основании этих измерений были построены карты элементного состава поверхности планеты Марс. Проводились работы по созданию нескольких российских приборов для проекта ЕКА “Марс Экспресс”.

Совместно с учеными Италии по проекту “Памела” проводились работы по созданию научной аппаратуры для исследования потоков античастиц (антипротонов, позитронов, легких антиядер) и ее адаптации к системам российского космического аппарата типа “Ресурс-ДК1”. Российские специалисты совместно с учеными Украины приступили к реализации совместных летных научных программ исследований Земли из космоса с использованием метеорологических ИСЗ “Океан-О” и “Метеор-3”.

Специалисты институтов РАН с участием зарубежных ученых продолжали обработку космических данных, полученных при реализации завершенных летных научных программ проектов “Рентген-Квант”, “Гранат” и “Интербол”.

Институты РАН и высшие учебные заведения совместно с организациями ракетно-космической отрасли в рамках научно-исследовательских работ вели проработку технических возможностей создания перспективных космических аппаратов и современной научной аппаратуры для решения актуальных проблем и задач ФКИ. Научные проекты на этой стадии работ были отобраны из более чем двухсот предложений по результатам конкурсного рассмотрения научной значимости поставленных целей и задач.

СОСТОЯНИЕ РАБОТ ПО КОСМИЧЕСКИМ ПРОЕКТАМ НАУЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ФЕДЕРАЛЬНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ПРОГРАММЫ РОССИИ

(на 01 января 2002 г.)

1.1. Физика космической плазмы и солнечно-земных связей

Проект “Интербол” (раздел ОКР Федеральной космической программы России) представляет собой новый подход к изучению физических процессов в магнитосфере Земли, на ее границах и в межпланетной среде.

Главная научная задача проекта “Интербол” – изучение активных процессов в хвосте магнитосферы Земли и их связей с явлениями в авроральной (полярной) магнитосфере одновременно с исследованием природы и структуры крупномасштабных неоднородностей солнечного ветра, при взаимодействии которых с магнитосферой Земли активизируются указанные процессы. Они включают в себя: изменение конфигурации магнитного поля в хвосте магнитосферы при накоплении в нем магнитной энергии; генерацию продольных электрических токов, поддерживающих связь ионосферных токовых систем с магнитосферой; ускорение заряженных частиц (электронов и ионов) – в хвосте магнитосферы и в полярных областях; генерацию мощного аврорального радиоизлучения в километровом диапазоне волн, выходящего в магнитосферу из областей полярных сияний; взрывное высвобождение энергии, накопленной в магнитосферном хвосте, в форме пучков ускоренных частиц, электрических токов, ионизации ионосферы; резкие изменения картины полярных сияний и свечения ночного неба, отражающие поглощение энергии магнитосферной плазмы в верхней атмосфере.

Измерение параметров потоков заряженных частиц, плазмы и электромагнитных полей проводится одновременно комплексом научной аппаратуры, размещенной на трех искусственных спутниках Земли.

Космический аппарат “Прогноз-М2-512” (“Интербол-1”) с субспутником “Магион-4” запущен 3 августа 1995 г. для проведения измерений в ключевых областях магнитного хвоста Земли:

на околоземной ударной волне, на границах магнитосферы, в области полярного каспа и в околоземном межпланетном пространстве.

Летная научная программа КА “Интербол-1” завершена 16 октября 2000 г.

Космический аппарат “Прогноз-М2-513” (“Интербол-2”) запущен 29 августа 1996 г. для проведения измерений электромагнитных излучений, потоков высыпающихся и восходящих частиц и функций распределения холодной плазмы в северной авроральной области магнитосферы Земли. “Интербол-2” позволяет также наблюдать глобальную картину полярных сияний в ультрафиолетовом диапазоне, отслеживая при этом как их пространственное распределение, так и временную динамику в периоды суббурь.

Летная научная программа КА “Интербол-2” завершена 26 января 1999 г.

Проект “Интербол” стал важнейшей частью крупнейшей международной космической программы по солнечно-земной физике, в которую входят японо-американский спутник “Геотейл”, американские высокоапогейные спутники “Поляр” и “Винд”.

Головная организация по комплексу научной аппаратуры – Институт космических исследований РАН.

Головная организация по КА “Интербол-1-2” – НПО им. С.А. Лавочкина Росавиакосмос.

В настоящее время осуществляется обработка и интерпретация информации, полученной в ходе реализации летной научной программы проекта “Интербол”. Результаты обработки приведены в гл. 3.

Проект “Коронас-Ф” (раздел ОКР Федеральной космической программы России) является частью научной Международной программы “Коронас” (Комплексные Орбитальные Околоземные Наблюдения Активности Солнца), в рамках которой осуществлен запуск околоземной космической солнечной обсерватории “Коронас-Ф”. Эта обсерватория предназначена для исследований Солнца на разных фазах 11-летнего солнечного цикла. Предыдущий спутник “Коронас-И” (запущен в 1994 г.) наблюдал Солнце вблизи минимума его активности. Аппаратура проекта “Коронас-Ф” изучает солнечную активность вблизи максимума текущего 23-го цикла. Спутник “Коронас-Ф” выведен на орбиту Земли 31 июля 2001 г. и имеет следующие параметры: наклонение орбиты – 82,49°, удаление от поверхности Земли – 500,9 и 548,5 км, период обращения 94, 859 мин. Такая орбита обеспечивает повторяющиеся периоды непрерывных наблюдений за Солнцем длительностью приблизительно

20 сут., что особенно важно для задач гелиосейсмологии и пат-рулирования солнечных вспышек. Стабилизация ориентации космического аппарата (несколько угловых секунд за секунду) позволяет достичь высокого пространственного разрешения наблюдений Солнца. Продолжается реализация летной научной программы, обработка и интерпретация получаемой научной информации.

Основные научные задачи проекта “Коронас-Ф”: наблюдения глобальных колебаний Солнца, изучение сейсмологии его недр и внутреннего строения, комплексные исследования мощных динамических процессов активного Солнца (активные области, вспышки, выбросы плазмы) в широком диапазоне длин волн от оптики до гамма, изучение солнечных космических лучей, ускоренных во время активных явлений на Солнце, условий их выхода, распространения в межпланетном магнитном поле и воздействия на магнитосферу Земли.

Головная организация по комплексу научной аппаратуры – Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн.

Головная организация по космическому аппарату АУОС-СМ-КФ – ГКБ “Южное”, г. Днепропетровск, Украина.

В настоящее время осуществляется обработка и интерпретация информации, полученной в ходе реализации летной научной программы проекта “Коронас-Ф”. Результаты обработки приведены в гл. 3.

Проект “Коронас-Фотон” (раздел ОКР Федеральной космической программы России) предполагает исследование процессов накопления энергии и ее трансформации в энергию ускоренных частиц во время солнечных вспышек, изучение механизмов ускорения, распространения и взаимодействия энергичных частиц в атмосфере Солнца, исследование корреляции солнечной активности с физико-химическими процессами в верхней атмосфере Земли. Планируемая дата запуска космического аппарата – 2006 г.

Проведение эксперимента позволит детально исследовать характеристики высокоэнергетичного электромагнитного излучения, наблюдаемого для нескольких солнечных вспышек российским спутником “Гамма-1” и американскими SMM и GRO “Compton”.

Впервые будет систематически исследовано гамма-излучение солнечных вспышек вплоть до энергий 2000 МэВ, осуществлена регистрация нейтронов аппаратурой с большой эффективной площадью. Измерение линейной поляризации излучения открывает новый канал получения информации о механизмах ускоре-

ния и переноса электронов в области вспышки. Впервые в солнечных исследованиях будут применены новые типы сцинтилляторов (YAlO_3), позволяющих повысить быстродействие аппаратуры до долей микросекунды, что увеличит достоверность получаемых данных. Данные об ультрафиолетовом излучении всего диска Солнца будут иметь абсолютную точность не хуже 10%, что особенно важно для моделирования процессов в верхней атмосфере.

Совокупные данные проектов “Коронас–Фотон” и “Коронас–Ф”, “Yohkoh”, GRO “Compton”, “Soho” “Ulysses”, “Wind”, “Rhesi” и скореллированные со спутником Solar-B наблюдения, взаимно дополняя друг друга, позволят существенно продвинуться в понимании последовательности процессов в солнечной плазме, приводящих к взрывному процессу высвобождения энергии, сопровождающимся высокоэффективным ускорением частиц с последующим их проявлением в наблюдаемых явлениях.

Головная организация по комплексу научной аппаратуры проекта “Коронас–Фотон” – Московский инженерно-физический институт.

Головная организация по космическому аппарату “Коронас–Фотон” – Научно-исследовательский институт электромеханики – НИИЭМ, Московская область, г. Истра.

Состояние работ по проекту “Коронас–Фотон” следующие.

1. Определены научные задачи проекта, состав и разработки бортовой научной аппаратуры; тип базового космического аппарата (“Метеор-3М”), состав штатных систем и их изготовители; тип ракеты-носителя (“Циклон-3М”), космодром и конкретная стартовая площадка; российские наземные пункты приема научной информации.

2. Завершена конструкторская привязка служебных (штатных) систем космического аппарата и научной аппаратуры по электропитанию, системам управления, съема и передачи информации. Согласованы все электрические интерфейсы.

3. Для большинства научных приборов завершается изготовление технологических образцов, для части из них ведутся градуировочные и ресурсные испытания.

4. Определен порядок комплексной отработки научной аппаратуры и начато создание соответствующих средств.

Проект “Интергелиозонд” (раздел НИР Федеральной космической программы России) предназначен для проведения исследований Солнца и внутренней гелиосферы с целью решения проблем нагрева солнечной короны, ускорения солнечного ветра, происхождения наиболее мощных проявлений солнечной

активности – солнечных вспышек и выбросов коронального вещества.

Основные научные задачи проекта: наблюдения с высоким пространственным и спектральным разрешением солнечной атмосферы для исследования ее тонкой структуры и мелкомасштабной динамики, включая предполагаемые области истечения изменчивого медленного солнечного ветра, для установления плазменных микропроцессов, определяющих нагрев хромосферы и короны, ускорение медленного и быстрого солнечного ветра; исследование активных областей, вспышек, выбросов и других межпланетных возмущений, временных и пространственных корреляций на Солнце и в межпланетной среде в периоды частичной коротации КА с вращением Солнца; определение характеристик солнечного ветра, плазмы и магнитного поля в областях гелиосферы, которые связаны с магнитоактивным поясом стримеров и корональными дырами, простирающимися от полярных до приэклиптических широт; исследование плазменной турбулентности, процессов ускорения, удержания и распространения энергичных частиц вблизи Солнца; получение стереоизображений солнечных образований и исследование их трехмерной пространственно-временной динамики; апробация и отработка дистанционных и локальных методов предсказания гелиосферной погоды и изучения солнечно-земных связей.

Ведущее научное учреждение – Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН.

Проект находится в стадии проработки возможностей решения поставленных научных задач с предприятиями ракетно-космической отрасли России.

Проект “Резонанс” предназначен для исследований процессов резонансного взаимодействия электромагнитного излучения с заряженными частицами магнитосферы Земли.

Основные научные задачи проекта: длительные наблюдения естественных явлений в выбранной силовой трубке магнитного поля (динамика и режимы магнитосферного циклотронного мазера, формирование и распад кольцевого тока, заполнение плазмосферы после магнитных возмущений, роль мелкомасштабных явлений в глобальной динамике плазмы); искусственное воздействие на режим магнитосферного мазера (искусственное возбуждение и/или стимуляция волн, модификация потока высыпавшихся частиц, изменение добротности мазера путем модификации коэффициента отражения от ионосферы).

Ведущее научное учреждение – Институт космических исследований (ИКИ) РАН.

Проект находится в стадии проработки возможностей решения поставленных научных задач с предприятиями ракетно-космической отрасли России.

1.2. Внеатмосферная астрономия

Проект “Рентген–Квант” (раздел ОКР Федеральной космической программы России) нацелен на исследование энергетических и спектральных характеристик и временной переменности космических источников рентгеновского излучения: рентгеновских пульсаров, маломассивных двойных систем, рентгеновских новых, активных ядер галактик, квазаров. Основными научными задачами проекта стали: построение изображений участков небесной сферы в рентгеновском диапазоне длин волн, локализация дискретных источников излучений; исследование энергетических спектров галактических объектов и поведение их во времени; поиск ярких рентгеновских транзиентов в населенных областях неба.

Модуль “Квант” был выведен на околоземную орбиту и пристыкован к орбитальной пилотируемой станции (ОПС) “Мир” весной 1987 г., прекративший свое существование 23 марта 2001 г. В период штатной работы модуль “Квант” обеспечивал проведение летной научной программы обсерватории “Рентген–Квант”. Рабочая орбита ОПС “Мир” позволяла проводить сеансы наблюдений на каждом витке со средней продолжительностью сеанса около 20 мин. При этом точность стабилизации станции за время сеанса находилась в пределах 2 угловых минут.

Комплекс научных приборов, установленных на обсерватории, включает в себя четыре астрофизических эксперимента: ТТМ/Comis (телескоп с кодированной апертурой), “Нехе” (сцинтилляционный спектрометр с качающимся коллиматором), GSPC (сцинтилляционный пропорциональный счетчик) и “Пульсар-Х1” (высокоэнергетический сцинтилляционный спектрометр). Все указанные эксперименты обеспечивали комплексную информацию о наблюдаемом источнике.

Головная организация по комплексу научной аппаратуры – Институт космических исследований Российской академии наук.

Головная организация по ОПС “Мир” – Ракетно-космическая корпорация “Энергия”.

В настоящее время осуществляется обработка и интерпретация информации, полученной в ходе реализации летной научной программы проекта “Рентген–Квант”. Результаты обработки приведены в гл. 5.

Проект “Гранат” (раздел ОКР Федеральной космической программы России) нацелен на проведение исследований в рентгеновском и гамма-диапазонах длин волн квазистационарных источников и источников гамма-всплесков с последующим построением изображения определенных участков неба с целью локализации на нем дискретных источников. Относительно яркие источники детально исследуются с помощью спектрального анализа и слежения за поведением во времени их излучения.

Основные научные задачи проекта: построение изображений участков небесной сферы в рентгеновском и гамма-диапазонах длин волн, локализация дискретных источников излучений; исследование энергетических спектров галактических и внегалактических объектов и поведение их во времени; патрульное слежение за небесной сферой для обнаружения новых источников рентгеновских и гамма-излучений; исследование спектров гамма-всплесков и их поведение во времени.

Спутник “Гранат” был запущен на орбиту Земли 1 декабря 1989 г. Летная научная программа была завершена в 1998 г. и в процессе ее выполнения были детально исследованы свойства рентгеновских источников: аккрецирующих нейтронных звезд и черных дыр, активных ядер галактик, космических гамма-всплесков и высокоэнергичных солнечных вспышек. Продолжается анализ и обработка данных, полученных обсерваторией. Результаты обработки приведены в гл. 5.

Головная организация по комплексу научной аппаратуры – Институт космических исследований Российской академии наук.

Головная организация по космическому аппарату “Гранат” – НПО им. С.А. Лавочкина Российского авиационно-космического агентства.

Проект “Всплеск” (раздел ОКР Федеральной космической программы России) предназначен для проведения исследований космических гамма-всплесков. Он включает в себя два синхронных эксперимента по исследованию всплесков космического гамма-излучения – “Конус-Винд” и “Конус-А”, которые решают следующие основные научные задачи: детальное изучение временных профилей гамма-всплесков; исследование энергетических спектров всплесков в широкой области энергий от 10 кэВ до 10 МэВ; исследование быстрой спектральной переменности излучения всплесков в сплошном спектре и в линиях; локализация источников гамма-всплесков двумя независимыми методами: по данным системы автономной локализации и триангуляционным методом во взаимодействии с международной сетью регистрации всплесков IPN (Interplanetary Network); поиск и исследование оп-

тической активности источников всплесков, начиная с начальной фазы события, регистрируемого по гамма-излучению, существенное уточнение локализации при обнаружении оптического транзита.

Продолжается реализация летной научной программы, осуществляется прием, анализ и обработка данных, полученных в ходе синхронных экспериментов проекта “Всплеск”. Результаты обработки приведены в гл. 3.

Головная организация по комплексу научной аппаратуры “Конус–Винд” и “Конус-А” – Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН.

Головная организация по КА типа Е2У – КБ “Арсенал” им. М.В.Фрунзе Российского авиационно-космического агентства. Результаты обработки приведены в гл. 5.

Проект “СПЕКТР-Р” (“Радиоастрон”) входит в раздел ОКР Федеральной космической программы России и направлен на создание совместно с глобальной наземной сетью радиотелескопов единую систему наземно-космического интерферометра для получения изображений, координат и угловых перемещений различных объектов Вселенной с шириной лепестка до 8 мкс дуги на длине волны 1,35 см, что в 50 раз превышает разрешение глобальной наземной сети радиотелескопов.

Основные научные задачи проекта связаны с построением высокоточных изображений различных объектов Вселенной, измерением их координат и изучением изменений со временем. Ширина диаграмм направленности системы до 35 мкс дуги (для резервной орбиты – до 10 мкс угловых).

В число объектов исследований входят: звезды и планетные системы на разных этапах эволюции, нейтронные звезды – пульсары и черные дыры в нашей галактике, структура и эволюция космических мазеров, исследование межзвездной среды, физические процессы около сверхмассивных черных дыр в ядрах галактик, процессы ускорения релятивистских частиц, сверхмощное энерговыделение, сверхвысокие яркостные температуры и сверхсветовые движения, космологическая эволюция компактных внегалактических радиоисточников, гравитационные эффекты, гравитационные волны, фундаментальные космологические параметры и природа скрытой массы.

Международный проект “Радиоастрон” предусматривает запуск космического 10-метрового радиотелескопа на эллиптическую высокоапогейную орбиту спутника Земли. Орбита имеет специально подобранную регулярную эволюцию благодаря слабому гравитационному воздействию Луны. Период обращения спутника около 9,5 сут.; радиус перигея меняется в пределах

10...70 тыс. км, апогея – 300...350 тыс. км. Эволюция орбиты обеспечивает вращение ее плоскости около слабо меняющейся оси апсид.

Головная организация по комплексу научной аппаратуры – Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук.

Головная организация по космическому аппарату – НПО им. С.А. Лавочкина Российского авиационно-космического агентства.

Состояние работ по проекту “Радиоастрон” следующее.

1. Завершена сборка полноразмерного раскрывающегося антенного рефлектора космического радиотелескопа (КРТ) диаметром 10 м с 27-ю лепестками и центральным зеркалом, изготовленными из композиционного материала.

2. На полигоне для наземных радиоастрономических испытаний КРТ установлено и отъюстировано опорно-поворотное устройство и отлажено управление им. Разработаны схемы испытаний.

3. Завершены лабораторные испытания электронного комплекса КРТ и испытания интерферометра с нулевой базой (без антенн).

Планируемая дата запуска космического аппарата – 2005–2010 гг.

Проект “Спектр–Рентген–Гамма” (раздел ОКР федеральной космической программы России) предназначен для проведения наблюдений космических источников в широчайшем диапазоне энергий (от далекого ультрафиолета до гамма-излучения), построения изображений в рентгеновских лучах с высоким угловым разрешением, осуществления детальной спектроскопии и исследований кривых блеска рентгеновских источников.

В число основных научных задач входит решение следующих проблем: космологии (измерение постоянной Хаббла, определение красных смещений скоплений галактик по рентгеновским линиям железа, подсчеты сверхслабых далеких рентгеновских источников, исследование изучения межгалактического газа, измерение угловых флуктуаций рентгеновского фонового излучения, исследование скрытой массы в галактиках и скоплениях галактик); внегалактической астрономии (детальное исследование спектров и переменностей внегалактических источников, поиск далеких квазаров и ядер активных галактик, поиск молодых галактик и скоплений галактик, находящихся в стадии образования); галактической астрономии и релятивистской астрофизики (детальное исследование черных дыр и нейтронных звезд в двой-

ных звездных системах; исследование природы рентгеновских источников методами спектроскопии и поляриметрии, постоянное слежение за всем небом с целью поиска новых рентгеновских источников и космических гамма-всплесков, исследование Солнечных и звездных вспышек в рентгеновском диапазоне).

Головная организация по комплексу научной аппаратуры (КНА) – Институт космических исследований Российской академии наук.

Головная организация по КА “Спектр-РГ” – НПО им. С.А. Лавочкина Российского авиационно-космического агентства.

Планируемая дата запуска космического аппарата – 2005–2010 гг.

Состояние работ по проекту “Спектр–Рентген–Гамма” следующее.

1. Проведено 75% отработочных испытаний научных приборов по программе конструкторско-доводочных испытаний, в том числе ресурсных испытаний.

2. Изготовлено и подготовлено к физической отработке и калибровке по радиоактивным источникам 60% штатных образцов приборов. В заделе находится 70% штатных приборов.

3. Выполнено более 50% объема работ по изготовлению в производстве специального оборудования и технологической оснастки для обеспечения работ с КНА в составе космического аппарата (КА).

4. Отработано более 70% режимов программы вибростатических испытаний КНА.

5. Продолжаются работы по изготовлению штатных образцов контрольно-испытательной аппаратуры научных приборов и блоков для обеспечения работ с КНА в составе летного изделия КА.

Проект “Спектр-УФ” (раздел ОКР федеральной космической программы России) – международная космическая обсерватория, предназначенная для проведения астрономических наблюдений в недоступном для наблюдений с поверхности Земли ультрафиолетовом диапазоне спектра (91–350 нм). В состав обсерватории входят телескоп с диаметром главного зеркала 170 см, блок камер поля для получения изображений и трехканальный спектрометр (разрешающая сила от 1000 до 60 000). По своим возможностям обсерватория во многих отношениях должна превосходить космический телескоп Хаббла.

Головная организация по комплексу научной аппаратуры – Институт астрономии Российской академии наук.

Головная организация по космическому аппарату – НПО им. С.А. Лавочкина Российского авиационно-космического агентства.

Планируемая дата запуска космического аппарата – 2005–2010 гг.

Проект “Астрометрия” (раздел НИР Федеральной космической программы России) имеет целью разработку и вывод на околоземную орбиту оптического интерферометра, обеспечивающего точность астрометрических наблюдений до 20 мкс дуги при единичном измерении, что на три порядка выше уровня точности измерений, достигнутого в мировой астрономии.

Основными научными задачами проекта являются: оставление каталога положений ~5000 астрономических объектов с микросекундным уровнем точности; определение абсолютных параллаксов для всех типов населения нашей Галактики и, возможно, определения параллаксов ближайших внегалактических объектов; построение инерциальной системы координат, в которой будут определены параметры движения тел Солнечной системы и звезд Галактики; исследование геометрии Вселенной (уточнение шкалы расстояний внутри и вне нашей Галактики, изучение вращения Галактики) для получения детальной картины динамических процессов в Галактике (на основе уточнения значений масс и их распределения в пространстве, включая получение количественных оценок видимого и невидимого вещества).

Ведущее научное учреждение – Институт астрономии РАН (ИНАСАН).

Проект находится в стадии проработки возможностей решения поставленных научных задач с предприятиями ракетно-космической отрасли России.

Проект “Гамма-400” (раздел НИР Федеральной космической программы России) создан для установления природы высокоэнергичного космического гамма-излучения в области энергий выше 30 ГэВ, где до настоящего времени нет экспериментальных данных. Предполагается использовать прямой метод детектирования гамма-квантов с помощью измерения энергии в калориметре и одновременных измерений координат частиц. Планируется расширить интервал регистрируемых энергий вплоть до нескольких ТэВ.

Основными научными задачами проекта являются: определение энергетических спектров гамма-квантов диффузного фона для выяснения роли обратного комптон-эффекта в формировании гамма-излучения, что позволит (в случае существенной роли электронов) получить сведения об удаленности источника космических лучей от солнечной системы; поиск особенностей энергетического спектра в области измерения энергии (до 1–2 ТэВ) для выяснения вопроса о существовании предсказываемых теорией

суперсимметрии новых частиц (нейтралино) и определения природы “черной материи”, а также гравитонов Калуцы–Клейна, которые согласно соответствующим теориям, использующим представления о многомерном пространстве, осуществляют гравитационное взаимодействие; измерение энергетического спектра гамма-излучения дискретных источников в области энергий до нескольких ТэВ, что, с одной стороны, даст дополнительные критерии оценки приемлемости предложенных механизмов генерации гамма-излучения и, с другой стороны, позволит достаточно достоверно “сшить” данные прямых измерений с данными, полученными наземными установками, регистрирующими черенковское излучение широких атмосферных ливней, генерированных первичными гамма-квантами.

Ведущее научное учреждение – Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), руководитель эксперимента д.ф.-м.н. Л.В. Курносова (ФИАН).

Проект находится в стадии проработки возможностей решения поставленных научных задач с предприятиями ракетно-космической отрасли России.

Проект “Миллиметрон” (раздел НИР Федеральной космической программы России) предполагает создание международной космической обсерватории (интерферометра “Земля–Космос–Космос”) для проведения астрономических исследований в миллиметровом, субмиллиметровом и инфракрасном диапазонах с экстремально высокой чувствительностью (до нескольких наноянских единиц потока в непрерывном спектре) и экстремально высоким угловым разрешением (до долей микросекунды дуги, а возможно до наносекунд дуги).

Основными научными задачами проекта являются: обнаружение, исследование возникновения и эволюции звезд, планетных систем и, возможно, отдельных планет; поиск проявлений жизни во Вселенной; изучение наиболее плотных областей Галактики (компактных газопылевых комплексов, глобул), исследование сложных органических соединений межзвездной среды; изучение релятивистских стадий эволюции звезд (взрывов сверхновых, нейтронных звезд и черных дыр звездных масс); изучение структуры и эволюции района сверхмассивной черной дыры в Центре нашей галактики, аналогичных и более мощных объектов в других галактиках, процессов ускорения и взаимодействия частиц сверхвысокой энергии, генерируемых космическими ускорителями в этих областях; обнаружение галактик на стадии их образования, изучение их последующей эволюции, в том числе изучение эволюции звездной, газопылевой составляющих и скрытой массы; изучение ранних этапов эволюции Вселенной

от момента рекомбинации до начала образования звезд и галактик; определение фундаментальных космологических постоянных и изучение природы скрытой массы, изучение фундаментальных свойств пространства, времени и вакуума; высокоточная астрометрия для определения расстояний и собственных движений звезд и внегалактических объектов; поиск новых видов астрономических объектов.

Ведущее научное учреждение – Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН.

Проект находится в стадии проработки возможностей решения поставленных научных задач с предприятиями ракетно-космической отрасли России.

1.3. Космическая биология и физиология

Проект “Биокосмос-1” (раздел ОКР федеральной космической программы России) является логическим развитием проекта “Бион” и этапом в реализации проекта “Бионика”. В разработке научной программы, нацеленной на проведение фундаментальных и прикладных исследований в области космической биологии и биомедицины, участвуют специалисты Росавиакосмоса, ESA, NASA, NASDA, CNES и CSA. Предусматривается, что проект будет реализован при долевом финансовом участии заинтересованных космических агентств. Планируемый срок запуска – осень 2005 г., продолжительность полета – до 18 суток.

Основные задачи: генетические, молекулярно-биологические и клеточные основы адаптации живых систем к условиям микрогравитации; значимость возраста в реакциях адаптации млекопитающих к условиям микрогравитации; механизмы развития остеопении и атрофии мышц в условиях микрогравитации; механизмы нарушений вестибулярной функции; закономерности адаптации сердечно-сосудистой системы к условиям микрогравитации и реадaptации к земной гравитации; влияние микрогравитации на состояние центральной и периферической нервной системы; влияние микрогравитации на поведение и двигательную активность животных; влияние факторов открытого космического пространства на живые системы и абиогенный синтез пептидов и нуклеотидов.

Объектами биологических и биомедицинских исследований в данном проекте являются клеточные и тканевые культуры, одноклеточные организмы, насекомые, рыбы, амфибии, семена и проростки высших растений, крысы линии Вистар-Ганновер (ориентировочно 36 особей).

Ведущим учреждением по реализации программы научных исследований и координации работ по проекту “Биокосмос-1” является Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем Российской академии наук.

Головная организация по созданию ракетно-космического комплекса – Государственный научно-производственный ракетно-космический центр “ЦСКБ-Прогресс” (г. Самара) Российского авиационно-космического агентства.

Для проведения научных исследований по проекту “Биокосмос-1” будет использован космический аппарат “Бион-М”.

Состояние работ по проекту “Биокосмос-1” следующее. Проведено всестороннее обсуждение проекта программы научных исследований, состава бортовой научной аппаратуры и научно-организационных вопросов с представителями ESA, NASA, CNES и NASDA. Достигнута предварительная договоренность о проведении в ходе 18-суточного полета в 2005 г. совместных экспериментальных исследований на грызунах (крысах) для изучения особенностей адаптации к невесомости преимущественно костно-мышечной и нервной систем у молодых и старых животных. Рассмотрен также перечень возможных экспериментов по биологии клеток, растений и водных организмов.

Проект “Бионика” (раздел НИР Федеральной космической программы России) предусматривается проведение биомедицинских исследований в условиях орбитального полета.

Основными научными задачами проекта являются: исследование фундаментальных проблем космической биологии и медицины. Разработка новых подходов к медицинскому контролю и медицинскому обеспечению пилотируемых космических полетов. Разработка и апробация новых технологий для международной космической станции.

Биологические объекты: грызуны, земноводные, рыбы, насекомые, моллюски, тканевые культуры, клеточные культуры, одноклеточные организмы.

Ведущее научное учреждение – Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем (ИМБП) РАН.

Проект находится в стадии проработки возможностей решения поставленных научных задач с предприятиями ракетно-космической отрасли России.

1.4. Исследования Земли из космоса

Проект “Росс-1” (раздел НИР Федеральной космической программы России) имеет целью создание российской спутниковой океанологической системы для исследования природы Мирового океана и мониторинга основных климато-формирующих факторов в зонах взаимодействия океана и атмосферы.

Основными научными задачами проекта являются: регистрация восходящего от подстилающей поверхности излучения в миллиметровом и сантиметровом диапазонах длин волн электромагнитного излучения при наблюдении в надир с разрешением несколько десятков километров; измерение параметров ветровых волн на морской поверхности надирным радиолокатором (скаттерометром) в сантиметровом диапазоне; измерение скорости и направления приводного ветра в миллиметровом и сантиметровом диапазонах; регистрация температурных и влажностных характеристик земных и лесных покровов в оптическом, СВЧ и ИК-диапазонах.

Проект находится в стадии проработки возможностей решения поставленных научных задач с предприятиями ракетно-космической отрасли России.

1.5. Физика космических лучей

Проект “Рим–Памела” (раздел ОКР Федеральной космической программы России) предполагает проведение исследований на околоземной орбите потоков античастиц (антипротонов, позитронов, легких антиядер), электронов и определение изотопного состава в первичном космическом излучении. Основные научные задачи направлены на решение следующих фундаментальных проблем: в области космологии – барионной асимметрии наблюдаемой Вселенной, природы темной материи (реликтовые черные дыры, слабодействующие нейтральные частицы и др.); в области физики космических лучей – генерации и распространения галактических космических лучей (ускорение частиц, межзвездная среда, взаимодействие с межзвездным газом и др.); в области физики гелиосферы и околоземного космического пространства – солнечная модуляция галактических космических лучей разных знаков, процессы на Солнце и солнечные космические лучи, частицы высоких энергий в магнитосфере Земли, аномальная компонента космических лучей.

Исследования будут проводиться с магнитным спектрометром “Памела” на борту КА “Ресурс ДК 1” № 1.

Головная организация с российской стороны по научным вопросам и по комплексу научной аппаратуры – Московский инженерно-физический институт (государственный университет) Минобразования России (Институт Космофизики).

Головная организация с итальянской стороны по научным вопросам и по комплексу научной аппаратуры – Национальный институт ядерной физики (секция Рим-2).

Главным учреждением по разработке спутника, интеграции прибора “Памела” на ИСЗ, запуску и управлению в полете является Государственный научно-производственный ракетно-космический центр “ЦСКБ-Прогресс”.

В конце 2002 года завершается наземная отработка магнитного спектрометра. Летная модель прибора “Памела” будет направлена во втором квартале 2003 г. в центр “ЦСКБ-Прогресс” для интеграции на КА “Ресурс ДК 1” № 1. Запуск КА намечен на 2003 г.

Проект ТУС (раздел НИР Федеральной космической программы России) имеет целью изучение энергетического спектра космических лучей в области ультравысоких энергий 10^{19} – 10^{20} эВ с помощью оптического детектора на борту спутника.

В области энергий около 5×10^{19} эВ ожидается обрезание спектра космических лучей (эффект Зацепина–Кузьмина–Грейзена). С помощью наземных установок получены данные о существовании частиц с энергией $>10^{20}$ эВ. Это ставит вопрос о необычном происхождении таких частиц. Наблюдение частиц с энергией $>10^{20}$ эВ может быть объяснено либо существованием новых астрофизических объектов – ускорителей заряженных частиц, находящихся в Галактике или в галактиках, принадлежащих местному скоплению (расстояния не далее 50 Мпс), либо “высыпанием” частиц “великого объединения” с массой 10^{24} эВ, из “топологических дефектов”, ожидаемых в космологической теории.

Поиск и изучение нейтрино ультравысоких энергий с помощью детектора Тус особенно интересен в связи с тем, что масса обзореваемого вещества мишени (атмосферы), где могут взаимодействовать нейтрино, исключительно велика – 10^{11} т.

Ведущее научное учреждение НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Проект находится в стадии проработки возможностей решения поставленных научных задач с предприятиями ракетно-космической отрасли России.

Проект “Нуклон” (раздел НИР Федеральной космической программы России) имеет целью изучение Физики Космоса с использованием методов прямой регистрации космических лучей в

экстремально широком диапазоне энергий и зарядов в околоземном пространстве: проверка астрофизических моделей рождения, ускорения и распространения космических лучей высоких энергий в Галактике; проверка астрофизических моделей процессов галактического внутризвездного нуклеосинтеза с нейтронным захватом, изучение химической эволюции вещества в Галактике;

Основными научными задачами проекта являются: определение энергетических спектров и химического состава космических лучей высоких энергий в экстремально широком энергетическом диапазоне 10^{11} – 10^{15} эВ; регистрация потока сверхтяжелых ядер космических лучей за пиком железа до ядер с зарядом $Z \sim 40$; регистрация потока высокоэнергичной (>10 МэВ/нуклон) солнечной и аномальной компонент состава космических лучей.

Ведущее научное учреждение – Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова.

Проект находится в стадии проработки возможностей решения поставленных научных задач с предприятиями ракетно-космической отрасли России.

Проект ПАС нацелен на проработку предложений по проведению астрофизических исследований с использованием тонкопленочных структур больших площадей.

Основными научными задачами проекта являются: регистрация частиц космических лучей ультравысоких энергий ($E \geq 10^{20}$ эВ); поиск массивных заряженных частиц “темной материи”; измерение величин и вариаций потоков космических ядер, включая радиоактивные и экзотические ядра; измерения величины и градиента околоземного магнитного поля; мониторинг потоков микрометеоритов.

Ведущее научное учреждение – Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН)

Проект находится в стадии проработки возможностей решения поставленных научных задач с предприятиями ракетно-космической отрасли России.

1.6. Планеты и малые тела Солнечной системы

Проект “Фобос–Грунт” (раздел ОКР Федеральной космической программы России) предполагает доставку на Землю образцов грунта с естественного спутника Марса – Фобоса и включает также следующие основные научно-технические задачи: определение физических и химических характеристик Фобоса, особенностей его внутреннего строения, орбитального и собственного движения; осу-

ществление посадки на небесное тело с малой гравитацией; старт с Фобоса и доставка на Землю спускаемого аппарата с образцами грунта; определение химического состава проб грунта; определение состава основных пороодообразующих элементов; исследование взаимодействия солнечного ветра с Фобосом; исследование физических условий околопланетной среды вблизи Фобоса (пылевой и газовой компоненты, космических лучей, магнитного поля); дистанционные исследования атмосферы и поверхности Марса.

Головная организация по созданию и разработке космического аппарата для экспедиции “Фобос–Грунт” – НПО им. С.А. Лавочкина Российского авиационно-космического агентства.

Головная научная организация по проекту и по задачам исследования Марса и Фобоса – Институт космических исследований РАН.

Планируемое время осуществления экспедиции – 2005–2010 гг.

Состояние работ по проекту “Фобос–Грунт” следующее: в конце 2002 г. планируется завершить разработку эскизного проекта и по результатам защиты принять решение о переходе к стадии рабочего проектирования начиная с 2003 г.

Проект МСП-2001 (детектор быстрых нейтронов “Хенд”) является российским экспериментом в составе комплексного эксперимента “Gamma Ray Spectrometer” (GRS) по измерению гамма-излучения и нейтронного излучения Марса с борта космического аппарата НАСА “2001 Марс Одиссей” с круговой орбиты и построению на основании этих измерений карт элементного состава поверхности этой планеты. Проект входит в раздел ОКР Федеральной космической программы России.

Головная научная организация по проекту – Институт космических исследований РАН.

Состояние работ по проекту “МСП-2001” следующее: в феврале 2001 г. детектор “Хенд” был доставлен на космодром NASA “Cape Canaveral” и установлен на борт КА “2001 Марс Одиссей” и в составе космического аппарата стартовал к Марсу 7 апреля 2001 г.

В настоящее время КА “2001 Марс Одиссей” находится на круговой научной орбите высотой около 400 км и наклоном около 90°. Прибор “Хенд” функционирует нормально, все его параметры в пределах нормы.

Планируемая продолжительность эксперимента по программе полета составляет 917 дней (январь 2002 г. – июль 2004 г.), но научная программа проекта может быть продлена до 2007 г. и дальше.

Проект “Марс Экспресс” (раздел ОКР Федеральной космической программы России) объединяет работы российских науч-

ных организаций, посвященные их участию в одноименной миссии Европейского космического агентства (ЕКА): подготовка предложений по научным экспериментам вместе с партнерами из стран Европейского сообщества; разработка и изготовление в России части научной аппаратуры и программного обеспечения для этих экспериментов; совместная разработка программы измерений на орбите; обработка, интерпретация данных, которые будут получены, совместная публикация научных результатов в будущем.

Российские ученые приглашены в качестве соисследователей (Co-I) в шесть научных экспериментов миссии МЭ. Это произошло не случайно. Причина в том, что их идеология, а во многом и технические решения, унаследованы от проекта “Марс-96”. Когда запуск КА “Марс-96” потерпел неудачу, наши западноевропейские партнеры ждали, что Россия начнет готовить новый аналогичный аппарат для исследований Марса. Этого не произошло, и тогда они стали работать над созданием западноевропейского аппарата для таких исследований, имея в виду осуществить измерения с приборами, аналогичными стоявшим на КА “Марс-96”. Так возникла миссия МЭ ЕКА.

Решение о реализации проекта МЭ было принято ЕКА в мае 1999 г.

Научная тематика исследований нацелена в основном на проблему изучения летучих и истории климата Марса. Важная роль летучих – особенно воды – и серьезные свидетельства об изменениях климата, как длительного, так и эпизодического характера, принадлежат к числу наиболее веских причин, по которым уделяется большое внимание исследованиям Марса. Эти вопросы связаны с проблемами самого высокого научного приоритета, включая изменения условий обитания на нашей собственной планете и происхождение жизни.

Головными научными организациями по экспериментам с российской стороны являются: Институт космических исследований РАН (эксперименты “Омега” – картирующий спектрометр; ПФС – инфракрасный Фурье-спектрометр; “Спикам” – УФ-спектрометр и “Аспера” – анализатор плазмы); Геохимический институт РАН (эксперимент HRSC – ТВ-камера для стереосъемки поверхности планеты) и Институт радиоэлектроники (эксперимент “Марсис” – длинноволновый радар); космический аппарат “Марс Экспресс” запущен 2 июня 2003 г. российской ракетой “Союз-Фрегат” с космодрома Байконур.

1.7. Космическое материаловедение

Проект “Биокристалл” (раздел НИР Федеральной космической программы России) нацелен на формирование технических требований к космическим средствам и облику научной аппаратуры для проведения приоритетных фундаментальных космических исследований в области получения кристаллов белков.

Основными научными задачами проекта являются: анализ современного состояния проблемы получения кристаллов белков в условиях микрогравитации, определение путей дальнейшего развития и совершенствования; сравнительный анализ методов и аппаратуры, используемых для выращивания кристаллов белков в земных и космических условиях; анализ критериев выбора белков, перспективных для проведения процессов кристаллизации в космосе; анализ и перспективы применения методов математического моделирования процессов массопереноса при росте кристаллов из растворов белков в земных и космических условиях; организация работ по проведению конкурса проектов и формированию программы исследований и экспериментов по проблемам получения кристаллов белков в космических условиях.

Головная научная организация – Научно-исследовательский центр “Космическое материаловедение” Института кристаллографии РАН.

Проект находится в стадии проработки возможностей решения поставленных научных задач с предприятиями ракетно-космической отрасли России.

РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПО НАПРАВЛЕНИЮ ФКИ “КОСМИЧЕСКАЯ БИОЛОГИЯ И ФИЗИОЛОГИЯ”

2.1. Окуломоторные реакции и координация головы и глаз в условиях микрогравитации

Традиционно центральное место в ряду сенсомоторных исследований отводится вестибулярным исследованиям. Уже в 1960-е годы в России выполняется широкая экспериментальная программа на животных, направленная на изучение влияний невесомости на структуру и функции вестибулярного аппарата. Результаты этих исследований, обобщенные в большом числе публикаций и монографий, подтвердили предположение о развитии глубоких изменений функций вестибулярной системы в невесомости и дали основания для развития представлений о ведущей роли этих изменений в генезе большинства регистрируемых в невесомости нарушений ориентации, межсенсорных интеграций и двигательных координаций. Эти представления легли в основу последующей программы вестибулярных исследований, выполнявшейся интенсивно в полетах экипажей Российских космических станций и на биоспутниках серии “Космос”.

Материал и методы. Вестибулярная программа, выполнявшаяся в полетах на космических станциях, включала исследования иллюзорных реакций и характеристик вестибуло-окуломоторного взаимодействия.

Исследования спонтанных и индуцированных оптокинетической стимуляцией (ОКС) иллюзорных реакций у членов экипажей пилотируемых станций “Салют” и “Мир” выполнялись в рамках российского эксперимента “Анкета”. В эксперименте участвовали 104 космонавта. Анкета заполнялась ими ежедневно, начиная с третьих суток полета и до завершения острого периода адаптации, в дальнейшем – до и после применения средств профилактики, а также во всех случаях недомогания, и в заключение – при возвращении на землю. У 31 космонавта в дополнение к Анкете в устной послеполетной беседе уточнялся характер иллюзорных реакций. Результаты подвергались

математико-статистической обработке с применением корреляционного анализа.

Исследования вестибуло-зрительного и вестибуло-окуломоторного взаимодействия на станциях проводились в рамках международных экспериментов “Оптокинез”, “Лабиринт”, “Оптоверт”, ВОГ, “Биоуправление”. Предмет исследования составляли спонтанные, оптокинетические и постоптокинетические реакции глаз, регистрировавшиеся в покое, при оптокинетических и вестибулярных раздражениях, а так же при выполнении задач зрительного слежения – саккадического и плавного. В исследованиях приняло участие 28 космонавтов. В подавляющем числе случаев регистрация движений глаз осуществлялась методом электроокулографии. В трех случаях (эксперимент ВОГ) дополнительно использовался метод видеоокулографии.

Результаты исследований. На основании результатов эксперимента были выявлены четыре формы космического адаптационного синдрома (КАС): перцептивная (66% космонавтов), перцептомоторная (11%), вегетативная (3%) и смешанная (20%); три типа адаптации сенсорных систем к невесомости: гиперсензитивный, гипосензитивный и смешанный; три типа адаптации организма к факторам полета: бурный и быстрый, торпидный и длительный, торпидный и быстрый.

Было установлено, что при переходе к невесомости практически все космонавты (98%) испытывают явления пространственной дезориентации. Иллюзии (41% случаев) имели комплексный характер и включали ориентационные, проприоцептивные и осциллопсические нарушения; в 31% случаев отмечались координатные иллюзии (изменения наклонов тела или предметов окружающего пространства); в 28% – кинетические (ротаторно-линейные движения тела или окружающего пространства). Чаще всего это были иллюзии перевернутого положения тела (26%) и движения окружающих предметов (15%); в 9% отмечались иллюзии вращательного движения тела, в 8% – смещения и наклона предметов. Большинство космонавтов (68%) связывали развитие иллюзорных и вегетативных реакций с повышенной двигательной активностью, меньшинство – с “приливом крови к голове”. Однако корреляционный анализ частоты, интенсивности и времени возникновения иллюзорных и вегетативных проявлений КАС показал отсутствие связи между ними ($r = 0,29$; $p > 0,05$). Исследования точности восприятия субъективной оптической вертикали (СОВ) в условиях темноты при неподвижных и движущихся вверх или вниз ОКС, проведенные в период адаптации к невесомости с участием 9 космонавтов, и в период реадaptации с участием 39 космонавтов, выявили возрастание ошибки воспри-

ятия СОВ до 8–18°. Следует отметить, что аналогичное увеличение ошибки до 8–12° наблюдалось также и в первые часы и сутки пребывания в иммерсии.

Исследования выявили существенные изменения глазодвигательных функций в невесомости. В начальный период адаптации у всех космонавтов отмечалось повышение глазодвигательной активности, выражавшееся в возникновении при закрытых глазах большого числа плавающих и саккадических движений. У 15 из 27 космонавтов в этот период регистрировался спонтанный нистагм. На более поздних этапах глазодвигательная активность стабилизировалась, однако в первые дни реадаптации к земным условиям она вновь была повышенной. Саккадический компонент при выполнении реакций слежения оставался достаточно сохранным (хотя амплитуда саккад, особенно вертикальных, изменялась). Однако плавное слежение за стимулом и особенно по кругу существенно нарушалось, сменяясь саккадическим.

Глубокие изменения в невесомости регистрировались в системе отолитово-цервико-окулярного взаимодействия. Исследования торзионного статического рефлекса в невесомости (противовращения глазного яблока при наклоне головы к плечу) выявили его глубокое торможение: противовращение глаз при наклоне либо отсутствовало вовсе, либо было инвертировано (глаза вращались в сторону наклона). Значительные изменения были отмечены также в характеристиках динамических вестибуло-окулярных реакций: коэффициент усиления вестибуло-окулярного рефлекса при вращении в горизонтальной плоскости существенно возрастал, а при движениях в саггитальной и фронтальной плоскостях снижался. Переход к невесомости сопровождался выраженным снижением порогов оптокинетического и вестибулярного нистагма. На первых этапах полета при сочетанной вестибуло-оптокинетической стимуляции, доминировали вестибулярные ответы. В дальнейшем выраженность вестибулярных компонентов ответа отчетливо снижалась вплоть до полного исчезновения. У 14 космонавтов выполнение в полетах исследования индуцированных линейной и синусоидальной оптокинетической стимуляцией векционных иллюзий выявили возникновение в невесомости уникального феномена – инверсии векции – когда направление иллюзии совпадало по фазе с направлением движений рисунка. Результаты проведенных исследований позволили заключить, что переход к невесомости сопровождается у космонавтов облегчением вестибулярных реакций, а также снижением статической и повышением динамической возбудимостей. В процессе адаптации вестибулярная возбудимость снижается, вести-

булярный канал в значительной мере исключается из систем сенсорного обеспечения движений. При этом существенно возрастала роль зрительной афферентации.

Справедливость этого заключения была в значительной мере подтверждена результатами исследований влияний невесомости на характеристики сложно-координированных движений головы и глаз, обеспечивающих быструю и точную установку взгляда на объекте, проецирующемся в периферическом поле сетчатки. Эти эксперименты были выполнены на 12 макаках резусах в полетах биоспутников серии “Космос” и на космонавтах участниках коротких 7-суточных (19 человек) и длительных многомесячных (29 человек) космических экспедиций. В полном соответствии с приведенными выше данными, у всех животных в первые полетные сутки обнаруживалось выраженное облегчение вестибулярных ответов на каналовые и отолитовые раздражения, проявлявшееся резким возрастанием коэффициента вестибуло-окулярного рефлекса и значительным увеличением нейрональных реакций вестибулярных ядер и вестибуло-мозжечка на адекватные вестибулярные раздражения. К 5–10-м суткам полета избыточность вестибуло-окуломоторной передачи и интенсивность нейрональных реакций вестибулярного ядра постепенно уменьшались при сохранении высокой нейрональной активности в вестибуло-мозжечке: к концу полета $K_{\text{вор}}$ у 8 обезьян был близок к 1,0. Близкие, хотя и превышающие 1,0 значения $K_{\text{вор}}$ регистрировались после полета и у 70% космонавтов – участников коротких экспедиций. После длительных полетов в значительном числе 25% случаев величина $K_{\text{вор}}$ у космонавтов была резко сниженной, у трех человек – до нуля. Это снижение, существенно осложняющее содружественную деятельность головы и глаз, сохранялось после длительных полетов до 4-х суток и более.

Проведенные исследования показали, что пребывание в условиях невесомости сопровождается специфическими окуломоторными нарушениями, развитие которых обусловлено изменениями в деятельности гравитационно-зависимых сенсорных систем (прежде всего, вестибулярной). Принято считать, что надежным информационным каналом в условиях невесомости является зрительная система, не относящаяся к гравитационно-зависимым. Однако очевидно, что в своей деятельности гравитационно-зависимые и независимые сенсорные системы функционируют в тесной связи и характер их взаимодействия определяет параметры глазодвигательных реакций, а, следовательно, и точность зрительного слежения. Изменения активности гравитационно-зависимых сенсорных систем неизбежно со-

проводятся нарушениями сенсорных взаимодействий, что, в свою очередь, провоцирует развитие аномальных спонтанных и индуцированных глазодвигательных реакций, в частности, следящих движений глаз.

2.2. Результаты исследований влияния факторов космического полета на сенсомоторные функции

Изменения сенсомоторных функций являются постоянным и закономерным спутником космических полетов даже небольшой продолжительности. Глубоко нарушая деятельность основных проприоцептивных систем, в первую очередь, вестибулярной и опорной, невесомость создает условия и потребности для широких преобразований в системах моторного контроля, выражающихся в переориентации систем управления (СУ) движения на другие, более надежные в новых условиях системы (зрение), изменениях тактики и координационной структуры движений, изменении характера моторных синергий. Эти изменения, адаптивные по своей сущности, обуславливают вторичное развитие ряда неблагоприятных симптомов, в совокупности составляющих картины синдромов “космической болезни движения”, “гипогравитационной атаксии”, “мышечной детренированности” и других, нарушающих двигательные возможности и работоспособность космонавтов в ходе полета, и особенно выраженные после длительных полетов.

С самого зарождения эры космических полетов российские ученые проводят широкие исследования базисных механизмов межсенсорных взаимодействий и деятельности систем управления движением в условиях меняющегося гравитационного окружения. С развитием практики длительных космических экспедиций эти исследования ведутся комплексно, в рамках целевых программ и включают полетные и модельные эксперименты с участием человека, пред- и послеполетные обследования членов космических экипажей, а также сложные полетные и наземные эксперименты на приматах.

Основные целевые задачи исследований составляли: количественное описание особенностей выполнения в условиях микрогравитации движений, различающихся по организации управления, составу, регулируемым параметрам, эффектору и степени сложности; получение количественных характеристик состояния в тех же условиях физиологических систем и механизмов, участвующих в формировании и реализации движений: основных про-

приоцептивных систем – вестибулярной, опорной, мышечной и мышечного аппарата, а также базисных рефлекторных механизмов; выявление факторов и основных триггерных механизмов развития двигательных нарушений в условиях микрогравитации для определения возможных путей их профилактики, с одной стороны, и определения места и роли гравитационного фактора в деятельности различных двигательных механизмов – с другой.

Наземная часть программ исследований выполнялась в основном сотрудниками ИМБП в содружестве с представителями академических институтов и университетов; полетная, осуществлялась, как правило, в рамках широкого международного содружества. В экспериментах на борту станции “Мир” принимали участие специалисты 10 стран. Выполнявшиеся совместно проекты, имели комплексный характер и составляли неотъемлемую часть Российской национальной программы.

Результаты исследований выполнения движений различной организации в условиях микрогравитации. Широкая программа исследований кинематических, временных и точностных характеристик произвольных движений, различающихся по организации (программных и следящих), составу (движения глаз, головы и руки), модальности управляющих сенсорных сигналов (зрение, слух, проприорецепция) и регулируемым параметрам (позиция, скорость, усилие), была выполнена в космических полетах в рамках российско-австрийского экспериментального проекта “Монимир”, и российско-болгарского эксперимента “Шипка”. В первом исследовании проводились с участием 9 членов длительных космических экспедиций, во втором – с участием четырех космонавтов. Результаты этих экспериментов, дополненные данными аналогичных исследований, выполненных в ходе 7–14-суточных полетов биоспутников серии “БИОН” на 10 макаках резус, а также данными многочисленных наземных экспериментов с моделированием условий микрогравитации (иммерсия, вывешивание, антиортостатическая гипокинезия), показали, что закономерным следствием гравитационной разгрузки является атаксия. Во всех упомянутых ситуациях отмечались выраженные нарушения контроля точности воспроизведения заданных параметров. Так, в условиях “сухой иммерсии” существенно возрастала величина ошибок и вариативности воспроизведения при выполнении простой двигательной задачи – поддержания определенного уровня усилия. Те же результаты были получены и при выполнении задачи поддержания соответствующей этому усилию электромиографической активности мышц голени, а также при воспроизведении “изотонических” движений в голеностопном суставе.

Резкое снижение возможностей точностного управления выявлялось еще более отчетливо при выполнении теста градации мышечных усилий, в ходе которого испытуемый производит серию последовательно возрастающих (или последовательно понижающихся) усилий от минимального (абсолютный порог шкалы) до максимального с минимальным различием между соседними усилиями (дифференциальный порог). В невесомости, а также в условиях иммерсии число различаемых градаций резко уменьшалось, а величины абсолютного и дифференциального порогов существенно увеличивались. Указанные изменения сохранялись после длительных космических полетов в течение 3–5 дней и более. Включение зрительной обратной связи повышало точность выполнения задач, однако при этом отчетливо проявлялись своиственные атаксии изменения структуры заданных движений — они утрачивали рисунок быстрого и сглаженного приближения к цели, приобретая характер медленного прерывистого движения, аппроксимирующего дистанцию до цели.

Еще более выраженными были изменения, обусловленные реальной и/или моделируемой невесомостью в характеристиках сложнокоординированных двигательных реакций, таких, как реакция фиксации взгляда, коррекционные позные ответы и другие. Исследования влияний невесомости на механизмы регуляции позы и локомоций выполнялись в рамках пред- и послеполетных обследований членов космических экипажей, а также в наземных модельных экспериментах с иммерсией и гипокинезией различной продолжительности. Лишь в одном эксперименте (“Поза”), выполнявшемся совместно российскими и французскими исследователями, механизмы регуляции позной активности исследовались на борту космической станции. Задачи исследований составляли выявление основных факторов, обуславливающих развитие нарушений, и механизмов их действия (изменения функции сенсорных систем и связанные с ними нарушения схемы тела, изменения в состоянии базисных рефлекторных механизмов, мышечного аппарата), а также в изучении роли и форм участия гравитации в регуляции вертикальной позы и локомоций. Результаты исследований, подтвердив представление о многофункциональной природе нарушений указанных функций в невесомости, позволили заключить, что на разных этапах воздействия микрогравитации механизмы этих нарушений существенно разнятся.

Тонус мышц, спинальные рефлекторные механизмы. Механизмы резкого снижения скоростно-силовых качеств скелетных мышц при переходе к невесомости и быстрого их восстановления при возвращении к условиям земной гравитации длительное время оставались неясными. Некоторые данные к пониманию этого

явления были получены в предположении его вторичного нейро-рефлекторного происхождения, которое было установлено параллельно при исследовании некоторых других характеристик состояния нервномышечного аппарата, а, именно, тонуса мышц, определяющих жесткость мышечного скелета, и их рефлекторную возбудимость. Первые же исследования, выполненные через 24 ч после завершения 2-, 3- и 4-суточных полетов, обнаружили у всех космонавтов значительное снижение поперечной жесткости четырехглавой мышцы бедра и в несколько меньшей степени – передней большеберцовой мышцы голени. Жесткость двуглавой мышцы плеча при этом не изменялась. Результаты были получены на большой группе обследуемых. Исследования характеристик сухожильного (коленного) рефлекса у членов экипажей космических полетов на кораблях “Союз” при той же длительности обнаружили у всех обследуемых также отчетливое возрастание электромиографической амплитуды рефлекса. Анализ литературы 1970-х годов позволил заключить, что оба феномена – экстензорная атония и сухожильная гиперрефлексия развиваются в невесомости как прямой непосредственный ответ на снижение гравитационных нагрузок. Это заключение хорошо согласовалось с обнаруженными в те же годы фактами а) развития у человека при переходе к невесомости флексорной установки и б) зарегистрированного в полетах по параболе Кепплера и у человека и у животных подавления ЭМГ экстензоров (“биоэлектрическое молчание”) и облегчение ЭМГ флексоров.

В 1980–1990-е годы описанные феномены вновь стали предметом интенсивных исследований. При этом, задачу их составили: а) количественная оценка развивающихся в полетах изменений; б) временная динамика их развития в полетах и в период ре-адаптации; в) их роль в развитии гипогравитационных нарушений в двигательной системе. В целях повышения корректности и точности получаемых результатов существенному усовершенствованию подверглись использовавшиеся в экспериментах методы исследования. Результаты этих исследований, выполненных на вторые сутки после окончания 7-суточного полета, выявили во всех трех головках трехглавой мышцы голени снижение поперечной жесткости на 15–20%. После длительных полетов атония мышц-разгибателей голеностопного сустава в большом числе случаев достигала уровня патологии: мышечная жесткость была полностью утрачена, при поднимании ноги мышца принимала форму капли, неполностью коррегирующуюся при максимальном произвольном сокращении. Кривая восстановления тонуса имела отчетливо двухфазный характер с относительно крутым возрастанием в течение первых трех-пяти послеполетных суток и

постепенным медленным приближением к фоновому уровню в последующие 7–11 сут.

Исследования состояния систем опорной и мышечной афферентаций после завершения космических экспедиций, определявшиеся первой – по порогам виброчувствительности основных опорных зон стопы, второй – по характеристикам – порогу вовлечения и максимальной амплитуде электромиографического ответа кривой вовлечения сухожильного (Ахиллова) рефлекса, обнаружили, что пребывание в невесомости сопровождается существенным (до 50% и более) снижением порогов виброчувствительности опорных зон стопы, регистрировавшимся у участников как коротких, так и длительных космических экспедиций, и мышечной гиперрефлексией, проявляющейся резким снижением порогов сухожильных ответов. После 140–185-суточных полетов пороги рефлекса вместо исходных 1000 г снижались до 300–200 г и более. При этом наблюдалось расширение рецептивного поля рефлекса, в некоторых случаях регистрировалась клоническая активность. Амплитуда рефлекса и градиент ее нарастания после длительных полетов изменялись неоднозначно, существенно снижаясь у одних и столь же существенно возрастая у других, что указывало на наличие комплекса факторов, определяющих, в конечном счете, искомую характеристику.

Результаты полетных исследований. В длительных полетах на станции “Мир” российские и австрийские физиологи совместно проводили исследования электромиографических параметров коленного сухожильного рефлекса непосредственно в ходе длительных полетов. В эксперименте участвовали девять российских космонавтов, длительность полетов у которых колебалась от 125 до 429 сут. Результаты исследований подтвердили справедливость предположения о существенном облегчении сухожильных рефлексов в условиях микрогравитации. Об этом свидетельствовал зафиксированный в невесомости факт преобразования рефлекторного ответа из одиночного в клонический, в результате чего длительность его возрастала с 50–80 до 500 мс на минимальное и до 2000 мс и более на максимальное раздражения. Более чем вдвое в последнем случае возрастала и длительность первичного ответа. Амплитуда рефлекторных ответов в первые дни полета выявляла тенденцию к снижению, а затем – со второго месяца и далее драматически нарастала, достигая к 60-м полетным суткам величин в 8–9 мв и выше. Эти же значения максимальных амплитуд ответа регистрировались и после завершения полета.

Одним из неотъемлемых показателей состояния систем постурального тонического контроля является физиологический тремор (ФТ), сопровождающий в условиях земной гравитации все ви-

ды деятельности, связанные с поддержанием позиции тела или его звеньев в гравитационном поле земли. Хотя генез физиологического тремора и его высокочастотной компоненты (8–12/с) остается предметом дискуссии, тесная связь тремора с механизмами рефлексов растяжения и функцией мышечных веретен представляется очевидной. В связи с этим российские и австрийские исследователи в тех же экспериментах изучали характеристики физиологического тремора руки в покое и при выполнении задач позиционирования руки в вытянутом положении (вперед) в покое и с небольшими уровнями нагружения. У всех десяти участников космического эксперимента проведенные исследования выявили в невесомости практически полное исчезновение высокочастотной компоненты ФТ. “Высокочастотное” молчание возникало сразу же при переходе к микрогравитации и сохранялось на всем протяжении полета, сколь бы длительным он ни был. При этом полетные регистрации выявляли наличие регулярного тремора низкой частоты (3–5 Гц), усилившегося по мере увеличения сроков полета. Одномоментная смена ведущих частот в работе контрольных систем при переходе к микрогравитации прямо указывала на смену ведущих механизмов (уровней) регуляции, а также более опосредованно – на наличие триггерного фактора, обеспечивающего выбор одной системы в условиях 1G, и другой в условиях 0G. Подтверждением справедливости этого предположения служит факт немедленного возвращения высокоамплитудной компоненты ФТ при возвращении космонавтов на Землю, которая в первые послеполетные дни была резко акцентированной во всех исследуемых ситуациях и движениях.

Данные нейрофизиологических исследований позволили предположить, что три выявленные в невесомости феномена являются взаимосвязанными и обусловлены единым фактором, а именно, дезактивацией (или резким снижением активности) системы тонического мышечного контроля, триггером для развития которой могут являться гравирецепторные системы – отолитовая и опорная, специально ориентированные на восприятие и анализ гравитационных нагрузок и жестко встроенные в механизмы организации позных синергий.

Результаты наземных экспериментов. Проверка и развитие этой гипотезы составили исходную цель систематической серии наземных исследований, выполнявшихся с использованием двух наземных моделей гипогравитации, а именно иммерсии и АНОГ (антиортистатической гипокинезии), предмет исследований в которых составили мышечный тонус и активность двигательных единиц (ДЕ) при выполнении целевых двигательных задач.

Мышечный тонус (жесткость). Очевидно, что указанные си-

туации различаются степенью опорной разгрузки. В иммерсии вес равномерно распределяется по поверхности тела, исключая возникновение опорного градиента; в АНОГ опорная нагрузка сохраняется, но существенно перераспределяется, адресуясь, в основном, к большим, не связанным с поддержанием вертикальной стойки зонам спины и боковых поверхностей. В дополнительной серии экспериментов использовалась комплексная ситуация, в которой испытуемые днем в течение 12 ч находились в иммерсии, а ночью (12 ч) – в АНОГ. В экспериментах участвовали 15 мужчин; длительность иммерсионного и комплексного воздействий составляла 7 сут, АНОГ – 120 сут.

Результаты исследований выявили закономерное снижение показателей поперечной жесткости всех трех головок трехглавой мышцы во всех трех ситуациях опорной разгрузки, однако динамика и глубина изменений в различных условиях существенно различались. В иммерсии снижение жесткости развивалось стремительно: уже к шестому часу воздействия (более, чем у половины испытуемых оно достигало максимальных значений, составлявших 40–50% от исходного). В АНОГ снижение жесткости развивалось медленно. Максимальные величины снижения, составлявшие в среднем 30–40%, достигались, как правило, в интервале между 14-ми и 31-ми сутками. При комплексном ежедневном воздействии иммерсии и АНОГ глубина и скорость развития изменений были меньше, чем в чистой иммерсии, и больше, чем в АНОГ. Поперечная жесткость передней большеберцовой мышцы снижалась и в иммерсии, и в АНОГ существенно позже, при этом глубина снижения не превышала 10–15%.

Двигательные единицы. Существенный вклад в понимание природы указанных выше феноменов внесли исследования порядка рекрутирования двигательных единиц (ДЕ) при выполнении задачи удержания небольшого усилия (порядка 10–12% от максимального произвольного), проводившиеся в тех же экспериментах. И в иммерсии, и в АНОГ обследуемые сохраняли полностью способность поддерживать заданное усилие в течение заданного времени. Анализ характеристик активности ДЕ показал существенные изменения, выражавшиеся в увеличении средней длительности межимпульсных интервалов (МИИ) и их вариативности, связанных, в основном, с появлением в гистограмме низкочастотных ДЕ. При этом изменение угла наклона линии регрессии зависимости между стандартным отклонением и величиной МИИ свидетельствовали о том, что увеличение вариативности МИИ опережало рост их длительности. В целом изменения активности ДЕ указывали на то, что в условиях иммерсии задача

удержания заданного малого усилия выполнялась другими ДЕ и что система контроля активности ДЕ существенно дестабилизировалась. Последнее, как известно, является постоянным спутником состояний, характеризующихся сниженным афферентным притоком. В АНОГ изменения активности ДЕ имели отчетливый двухфазный характер. В первые 30 сут, как и в иммерсии, наблюдалось возрастание средней длительности ДЕ и еще большее увеличение их вариативности, что было связано с появлением на гистограмме МИИ большого процента чрезвычайно коротких (70–90 мс) и, напротив, чрезмерно длинных (250–350 мс) интервалов. В целом, изменения характеристик активности ДЕ в первый месяц АНОГ, как и в иммерсии, отражали, в основном, изменения порядка рекрутирования ДЕ и дестабилизацию активности пула. В дальнейшем, с нарастанием деструктивных процессов в мышцах и нейромышечных синапсах в активности ДЕ регистрировались изменения, отражавшие нарушения в работе мышечной периферии – снижение контрактильных возможностей мышечных волокон атрофической природы (отсюда – высокий процент дуплетов) и нарушения нервно-мышечной передачи (в результате – чрезмерно длительные МИИ).

Спинальные рефлекторные механизмы. Исследования характеристик рефлекторных реакций в иммерсии и АНОГ, подтвердили справедливость представлений о состоянии гиперреактивности, спинальных рефлекторных систем в условиях гипогравитации. В обеих ситуациях в первые же дни воздействия пороги сухожильного (Ахиллова и коленного) рефлексов, а также пороги *H*-рефлекса закономерно снижались. Изменения амплитуды ответов в различных экспериментальных ситуациях были неоднозначны. В иммерсии амплитуда *H*-рефлекса в первые сутки возрастала, однако это возрастание было нестойким, и на третьи сутки воздействия величина ответа не отличалась от фоновой. В АНОГ при относительно небольших изменениях порогов лидирующими были изменения амплитуд ответов, в течение первых 5–14 дней воздействия возраставшие в 4 раза и более (несколько меньше в системе Н-ответа), и близкие последнему изменения амплитуды прямого мышечного ответа. Начиная с пятых суток, величины ответа, оставаясь высокими, выявляли тенденцию к снижению, и к 60–90-м суткам амплитуда возвращалась к исходным значениям. Аналогичной была динамика изменений амплитуд прямого мышечного ответа. Близость картины изменений параметров рефлекторных реакций таковым прямого мышечного ответа указывала на их связь с процессами, развивающимися в мышечных волокнах. Это предположение было подтверждено в экспериментах с 360-суточной АНОГ, в которой в одной из двух

групп обследуемые в течение первых 120 суток не использовали профилактических средств, а в другой – в течение всех 12 месяцев использовали физические тренировки. При этом, у испытуемых, в течение четырех первых месяцев не применявших средств профилактики, порог сухожильного рефлекса к концу этого периода был выше исходного, а амплитуда – ниже таковой. С началом физических тренировок порог рефлекса в группе падал, достигнув тех же величин в 100 г, что и в группе А, а амплитуда его также неуклонно возрастала, достигнув к 360-м суткам столь же необычно высоких значений, что и в группе А.

В целом, данные проведенных исследований позволили заключить, что в условиях невесомости устранение опоры является пусковым стимулом для снижения (выключения?) активности тонической системы с последующим вторичным развитием ряда физиологических и структурных эффектов, составляющих в целом картину гипогравитационного синдрома.

2.3. Физические и радиобиологические основы для совершенствования норм радиационной безопасности космических полетов

Развертывание и функционирование международной космической станции (МКС), ужесточение требований к обеспечению радиационной безопасности персонала, работающего в условиях повышенного радиационного фона, и перспективы межпланетных полетов привели к необходимости расширения и уточнения знаний в области радиационной безопасности космических полетов. В этом направлении был выполнен цикл исследований, направленных на совершенствование методов и средств обеспечения радиационной безопасности человека в космическом пространстве. Ниже кратко излагается ряд наиболее существенных результатов этих исследований.

На основе ежесуточного мониторинга радиационной обстановки на орбитальном комплексе (ОК) “Мир” сформирована база данных, включающая баллистические характеристики орбиты, среднесуточную мощность поглощенной дозы, значения геомагнитных и космофизических индексов. Впервые в мировой практике получены данные ежедневного контроля радиационной обстановки, охватывающие период длительностью свыше 12 лет. На основе анализа данных, систематизированных в этой базе, обнаружены квазипериодические вариации мощности поглощенной дозы от протонов радиационного пояса Земли с периодами около одного и двух лет. С учетом обнаруженных вариаций и ци-

кличности солнечной активности разработана динамическая модель радиационных характеристик протонов радиационного пояса Земли. Использование этой модели для расчетной оценки поглощенной дозы на станции “Мир” позволило оценить ее точность. Сопоставление результатов вычислений с соответствующими данными измерений показало, что расхождение рассчитанных и измеренных значений не превышает 30%. Такая точность вполне достаточна для оценок радиационной опасности в процессе полета орбитальной станции, выполняемых на основе контроля и прогноза уровней облучения космонавтов в процессе профессиональной деятельности, включая периоды выполнения космических полетов.

Подчеркнем, что особенности профессионального облучения космонавтов определяются двумя факторами: характер облучения во время полета; дискретность выполнения полетов в процессе профессиональной деятельности.

В соответствии с этими особенностями можно сформировать две категории их профессионального радиационного риска (РР): полетный радиационный риск, определяемый вероятностью гибели космонавта, как в полете, так и после его завершения; профессиональный риск, обусловленный отдаленными последствиями облучения.

Как следует из определения, полетный РР состоит из двух компонентов: рисков, обусловленных проявлениями последствий облучения до конца полета и отдаленными последствиями облучения (пожизненный риск).

Полетный РР связан с ближайшими последствиями облучения солнечными космическими лучами (СКЛ), генерируемыми стохастическим источником космической радиации – солнечными протонными событиями (СПС). Поэтому возникает вероятностный компонент полетного риска, действие которого завершается в момент прекращения полета. Можно заключить, что этот компонент полетного риска следует использовать для управления радиационной безопасностью в процессе текущего полета. После его завершения вероятность возникновения СПС обращается в нуль, а суммарная доза за завершившийся полет, включая дозу от произошедших СПС, дает вклад в профессиональный РР.

Последний учитывает вероятность проявления вреда в течение всей жизни человека, вызванного воздействием радиационного фактора. В нормативах для наземных применений, в основу оценки риска положены количественные данные по вероятности развития радиационно-индуцированного рака, обусловленного профессиональным облучением в процессе работы человека на атомных предприятиях и облучением при радиаци-

онных авариях. Аналог полетному риску в наземных нормативах отсутствует.

Таким образом, в космическом полете имеет место дуализм РР – полетный риск и профессиональный риск. В связи с этим возникает вопрос: как эту величину использовать для управления радиационной безопасностью? В настоящее время в качестве характеристики опасности в полете принимают пожизненную вероятность смерти от отдаленных последствий при условии исключения с заданной надежностью гибели космонавта в период полета. Это достигается учетом специфики радиобиологических эффектов, формирующих РР, и соответствующей структурой нормативов. Основным эффектом, определяющий вероятность гибели космонавта в процессе полета, – лучевая болезнь, вызванная поражением кроветворных органов. Дозиметрический функционал, используемый для получения количественных оценок этого компонента РР, должен отражать распределенность костного мозга по скелету и его репарационные способности к восстановлению после облучения. В качестве такого функционала определена обобщенная доза, которая по сути есть аналог рекомендованной МКРЗ эффективной дозы для оценки риска стохастических эффектов. На основе обобщенной дозы разработана модель радиационной гибели космонавта к концу полета. Расчеты для орбитальных станций показали, что в рамках костномозговой формы радиационного поражения вероятность гибели (полетный радиационный риск) чрезвычайно мала и значение ее даже в годовом орбитальном полете за минимальной толщиной защиты не превысит 10^{-3} . Приведенные оценки свидетельствуют, что для ограничения риска, обусловленного проявлением ближайших последствий, следует выбирать не вероятность гибели, а снижение работоспособности, вызванное облучением.

Для оценки обусловленного отдаленными эффектами профессионального РР, могут быть использованы линейные модели, основанные, например, на фиксированном значении коэффициента риска или более совершенная модель обобщенной дозы. Рассмотрим оценку опасности на основе обобщенной дозы, учитывающей различную биологическую эффективность космических излучений, различный характер распределения дозы во времени и по глубине тела космонавтов и, при необходимости, учет комбинированного действия радиации и других факторов космического полета. Для этих целей была разработана модель радиационной скорости смертности млекопитающих, определяющая характер изменения зависимости коэффициентов смертности от возраста животных после острого и хронического облучения. На основе этой модели и уточненных уровней облучения космонав-

тов во время орбитальных космических полетов рассчитаны значения суммарного РР в течение их жизни от всех причин, включая РР развития опухолей, и оценены наиболее вероятные значения сокращения продолжительности предстоящей жизни после завершения полетов.

В отличие от прежних подходов, при которых нормирование предельных уровней облучения космонавтов исходило из требования ограничения РР смертности во время полета и сохранения работоспособности космонавтов непосредственно после острых радиационных воздействий при СПС, настоящая концепция обеспечения безопасности длительных космических строится на новой основе. Главным требованием выступает ограничение суммарного радиационного риска в течение всей жизни космонавтов, который не должен превышать 10% и который определяется дополнительной радиационно обусловленной заболеваемостью и смертностью от всех причин, а не только канцерогенезом. Например, патологические изменения в коре головного мозга и в хрусталике, вызванные облучением, усиливаются в отдаленном периоде.

Результаты выполненных экспериментальных исследований, показали, что при действии на нейроны коры головного мозга ускоренных ионов в сравнительно малых дозах коэффициенты относительной биологической эффективности (ОБЭ) могут достигать 100. Столь же большие значения коэффициентов ОБЭ обнаружены и при воздействии высокоэнергетичных ионов на хрусталик глаза при оценке вероятности развития катаракт у животных. Анализ данных 45-летнего медицинского наблюдения облученных в 1950-е годы большими дозами профессиональных работников атомных предприятий выявил существенное увеличение частоты вегетососудистой дистонии, астенического синдрома и существенное снижение работоспособности. В дополнение к этим данным имеет место также увеличение частоты заболеваний центральной нервной и сердечно-сосудистой систем, отмечаются серьезные нарушения кровообращения, приводящие к развитию церебрального атеросклероза и к увеличению частоты инсультов. Изложенные последствия облучения, отчетливо выявляющиеся при дозах, превышающих 1,50 Зв, послужили основанием для рекомендации по снижению доз на кроветворные органы за всю карьеру космонавтов в четыре раза по сравнению с прежним нормативом и ограничить значением 1,0 Зв. Учитывая большую опасность воздействия космических излучений на хрусталик и высокие значения коэффициентов ОБЭ в отношении развития катаракты, предельное значение дозы на хрусталик за карьеру рекомендовано ограничить дозой 2,0 Зв, а предельное значение дозы на кожу космонавтов в течение всего периода про-

фессиональной деятельности ограничить значением 6,0 Зв. При этом основным критерием являлось требование отсутствия значимого снижения работоспособности в процессе полета и в отдаленном периоде до конца жизни.

2.4. Цитогенетические нарушения в лимфоцитах крови членов экипажей ОК “Мир”

Увеличение длительности и дальности космических полетов (КП) приводит к возрастанию радиационной нагрузки на организм космонавтов. Как показали дозиметрические измерения, эквивалентные дозы облучения космонавтов при КП длительностью один год могут достигать 100–300 мЗв. Поэтому одной из актуальных проблем космической биологии и медицины является оценка опасности радиационных воздействий в относительно невысоких дозах для человека, в частности, индуцированных космическими лучами изменений в генетическом аппарате клеток. Для ее решения был выполнен цикл исследований цитогенетических нарушений в лимфоцитах периферической крови космонавтов, принимавших участие в полетах на ОК “Мир”, основанный на анализе частоты нестабильных aberrаций хромосом.

В рамках выполнения программы было проанализировано 44607 метафаз лимфоцитов из образцов крови 21 космонавта, большинство из которых совершали неоднократные полеты. Обнаружено 777 клеток, содержащих 816 различных aberrаций хромосом, в том числе 123 клетки со 126 дицентриками, 311 ацентрических фрагмента, 31 атипичных моноцентриков и 344 хроматидных aberrаций. Спонтанный уровень aberrаций был исследован у 17 космонавтов.

Чтобы выяснить, возвращается ли уровень aberrаций хромосом у космонавтов через некоторое время после КП до исходного, была выделена группа случаев “до полета без спонтанного уровня”, т.е. из всех дополетных данных исключались случаи спонтанного уровня. Таким образом, была сформирована группа космонавтов, у которых проведен анализ aberrаций хромосом спустя 1–1,5 года после КП. В среднем частота дицентриков и центрических колец у космонавтов через 1–1,5 года после полета снижается до $0,17 \pm 0,04\%$, практически достигая уровня спонтанной частоты ($0,15 \pm 0,03\%$). Частоты других видов хромосомных aberrаций также практически не отличаются от контроля. Объединенные указанные группы составили группу “до полета”, которая охватывает все дополетные данные, включая не только

спонтанную частоту хромосомных aberrаций до первого полета, но и до каждого последующего. Выборку этой группы составляют 24549 проанализированных метафаз, из них 386 клеток ($1,57 \pm 0,08\%$) содержали 407 ($1,66 \pm 0,08\%$) aberrаций хромосом, 39 ($0,16 \pm 0,03\%$) клеток, в которых обнаружено 40 ($0,16 \pm 0,03\%$) дицентрических aberrаций, а также всего 160 ($0,65 \pm 0,05\%$) ацентрических фрагментов, 8 ($0,03 \pm 0,01\%$) атипичных моноцентрика и 192 ($0,78 \pm 0,06\%$) aberrаций хроматидного типа.

Проведенный анализ показал, что у космонавтов дополетный уровень клеток с дицентриками и центрическими кольцами, являющимися маркерами радиационного воздействия, превышает спонтанный уровень этого показателя для людей, профессионально не контактирующих с источниками ионизирующих излучений. На основании анализа выборки из 118 человек – жителей Московской области (проанализировано 48124 метафазных клеток) обнаружено, что частота клеток с дицентриками у жителей Московского региона составляет 0,02 дицентрика на 100 клеток. Это достоверно отличается от соответствующего показателя у космонавтов до полета (критерий Стьюдента $t = 2,9$; $p = 0,005$). Спонтанная частота ацентриков у космонавтов также превышает контрольный уровень этого типа aberrаций для жителей Московского региона. Причины такой высокой спонтанной частоты дицентриков и ацентриков у космонавтов не ясны. Можно предположить, что это вызвано более частыми рентгенодиагностическими процедурами в период предполетной подготовки, но этот вопрос требует специального изучения.

Анализ результатов исследования лимфоцитов крови космонавтов после первого КП для группы из 17 космонавтов, у которых проанализировано всего 12332 метафаз, выявил 237 ($1,92 \pm 0,12\%$) aberrантных клеток, из которых 56 ($0,45 \pm 0,06\%$) клеток с дицентриками, 84 ($0,68 \pm 0,07\%$) ацентрических фрагмента и 84 ($0,68 \pm 0,07\%$) – повреждения хроматидного типа. Наряду с этими данными, были проанализированы также результаты цитогенетического обследования космонавтов после 2, 3 и 4 КП, а также средние значения частот хромосомных aberrаций разных типов в контроле (до и после полетов).

Результаты этого анализа показали, что после КП общая частота хромосомных нарушений в лимфоцитах периферической крови космонавтов достоверно возрастает за счет дицентриков и кольцевых aberrаций хромосом. В частности, частота клеток с дицентриками и центрическими кольцами увеличивается до $0,41 \pm 0,04\%$, превышая дополетный уровень ($0,16 \pm 0,03\%$) примерно три раза. В тоже время уровень ацентриков и хроматидных aberrаций по сравнению с исходным практически не изменя-

ется, составляя $0,65 \pm 0,05\%$ и $0,78 \pm 0,06\%$ до полетов и $0,73 \pm 0,06\%$ и $0,80 \pm 0,06\%$ после полетов соответственно. В целом прослеживается тенденция к волнообразному изменению указанных параметров, т.е. происходит увеличение частоты aberrаций после первого полета по отношению к спонтанному уровню, затем через 1–1,5 года ее уменьшение, за которым вновь следует увеличение количества хромосомных aberrаций после каждого очередного полета и т.д. Это связано с тем, что aberrации хромосом, индуцированные ионизирующим излучением космического пространства, накапливаются за время полета, а после него клетки, содержащие хромосомные aberrации, естественным образом элиминируют из циркулирующей крови.

Спонтанный уровень aberrаций хромосомного типа у космонавтов превышает этот показатель для жителей Московской области. В частности, частота дицентриков и ацентриков у космонавтов в контроле составляет $0,15 \pm 0,03\%$ и $0,65 \pm 0,07\%$ соответственно. После КП в лимфоцитах крови космонавтов в среднем наблюдается достоверное увеличение клеток с дицентриками и центрическими кольцами, являющимися маркерами радиационного воздействия. Частота ацентриков и aberrаций хроматидного типа после КП не изменяется. В межполетном периоде длительностью 1–1,5 года происходит снижение частоты aberrаций хромосом в лимфоцитах крови космонавтов до спонтанного уровня за счет элиминации поврежденных клеток. После повторных полетов уровень хромосомных aberrаций вновь возрастает. К настоящему времени не выявлено отчетливой связи между индивидуальной частотой хромосомных aberrаций у космонавтов и длительностью космического полета, что может быть связано с низкой интенсивностью космического излучения, с недостаточным количеством наблюдений, элиминацией клеток, содержащих нестабильные aberrации хромосом, или какими-либо другими причинами.

2.5. Системы жизнеобеспечения и оптимальный изотопный состав среды обитания космонавтов в условиях длительных экспедиций

Создание систем жизнеобеспечения космических экипажей на основе замкнутого круговорота веществ создает качественно новую, не свойственную земной природе, ситуацию, когда длительность обращения биогенных химических элементов сокращается от тысячелетий до нескольких суток. В таких системах в условиях длительных экспедиций будут происходить процессы многократного поглощения и выделения одних и тех же атомов

веществ, входящих в состав то организма человека, то растений и животных, то окружающей среды в соответствии с числом циклов круговорота веществ в системе. Такая ситуация для организма в природе никогда не существовала, в экологии человека и других организмов не рассматривалась и биологические последствия ее трудно прогнозировать.

Вполне возможно, что такие последствия могут быть связаны с избирательным отношением организмов и фазовых превращений веществ не только к биогенным химическим элементам, но и изотопам этих элементов, что может привести к изменению их соотношений в организмах и разных частях системы жизнеобеспечения с непредсказуемыми последствиями.

Знание закономерностей фракционирования стабильных изотопов системами жизнеобеспечения, растительными, животными организмами и человеком, знание биологических особенностей изотопов биогенных химических элементов позволит создать устойчивую оптимальную среду обитания космонавтов.

Как известно, в условиях космического полета на космонавта воздействует широкий спектр неблагоприятных факторов: невесомость, психологический стресс, ионизирующая радиация, повышенный шумовой фон и т.д. Поиск новых средств и методов, снижающих степень неблагоприятного воздействия таких факторов на организм и направленных на повышение работоспособности космонавта, является одной из важнейших задач при обеспечении длительных космических полетов. Одним из способов может явиться создание среды обитания с оптимальным изотопным составом биогенных химических элементов.

В состав среды обитания пилотируемых космических летательных аппаратов (атмосферы, воды, пищи), растительных и животных организмов, а также членов экипажей входят такие биогенные химические элементы, как водород, бор, углерод, азот, кислород, фтор, натрий, магний, кремний, фосфор, сера, хлор, калий, кальций, ванадий, хром, марганец, железо, кобальт, никель, медь, цинк, селен, бром, молибден, йод. Большинство из перечисленных химических элементов имеют стабильные изотопы. Так, водород имеет два стабильных изотопа, кислород – три, сера – четыре, цинк – пять, кальций – шесть, молибден – семь стабильных изотопов.

До последнего времени проектанты систем жизнеобеспечения не принимали во внимание роль стабильных изотопов биогенных химических элементов среды обитания космонавтов. Это естественно, поскольку изотопы имеют одинаковую структуру электронных оболочек. Однако несмотря на идентичность элек-

тронных оболочек, стабильные изотопы по крайней мере некоторых биогенных химических элементов (H_2 , C, O_2) обладают различными химическими, биохимическими и биологическими характеристиками. Особенно сильные различия проявляются при сравнении биологического действия обычной и тяжелой (по водороду) воды. Тяжелая по водороду (дейтериевая) вода обладает токсическими свойствами: подавляет рост и развитие высших растений; при замене обычной воды на дейтериевую (тяжелую) воду в организме млекопитающих последние погибают. Вместе с тем вода, в которой снижены концентрации дейтерия, проявляет положительную биологическую активность.

Логично предположить, что стабильные изотопы всех биогенных химических элементов, входящих в состав среды обитания космонавтов, должны проявлять различные биохимические свойства. И хотя в процессе эволюции растения, животные и человек адаптировались к окружающей среде обитания, остается неизвестной степень токсичности или биологической активности того или иного стабильного изотопа биогенного химического элемента.

До настоящего времени не было проведено систематического анализа биологической активности стабильных изотопов биогенных химических элементов, не определены оптимальные концентрации того или иного стабильного изотопа в процессах метаболизма в растениях, животных и человека, не рассмотрена роль систем жизнеобеспечения в создании оптимального изотопного состава искусственной среды обитания космонавтов.

В ГНЦ РФ–ИМБП РАН исследования по оптимальному изотопному составу среды обитания космонавтов в условиях длительных экспедиций проводились в трех направлениях: 1) исследование изменений изотопного состава среды обитания ОК “Мир”; 2) разработка метода получения бездейтериевой воды для условий длительных космических экспедиций и исследование ее медико-биологических свойств; 3) исследование изменений изотопного состава биогенных химических элементов в организме человека, находящегося в условиях, имитирующих длительный космический полет.

1. Исследования, проведенные во время 16–27-й экспедиций показало, что питьевая вода, регенерированная из конденсата атмосферной влаги системой СРВ-К, отличается по изотопному составу от природных вод. Конденсат атмосферной влаги (представляющий собой смесь сконденсированных паров воды, выделенных космонавтами в результате перспирации и транспирации) также характеризуется измененными концентрациями стабильных изотопов кислорода $^{18}O_2$ и водорода – дейтерия. Вода, полу-

ченная на борту корабля “Шаттл” и переданная на борт ОК “Мир”, на 100–150‰ обогащена легким изотопом водорода – протием и на 20–30‰ тяжелым изотопом кислорода $^{18}\text{O}_2$. Изменения изотопного состава может быть объяснено фракционированием их системами жизнеобеспечения, экипажем, а также потреблением питьевой воды, доставляемой транспортным кораблем “Шаттл” на станцию “Мир”.

2. Метод получения бездейтериевой воды включает следующие процессы: очистка воды от химических примесей, электролиз воды, изотопный обмен протий – дейтерий, конденсация паров воды, минерализация (насыщение воды макро- и микроэлементами). Выбор метода получения бездейтериевой воды обусловлен теоретическими коэффициентами разделения изотопов дейтерия и протия. Максимальным теоретическим коэффициентом разделения изотопов дейтерия и протия обладает метод электролиза воды, при котором на катоде вначале разряжаются протоны с образованием газообразного (легкого) водорода, а затем в зависимости от степени разложения воды электролита происходит разряд смеси протона и дейтрона.

Методика получения воды с пониженным содержанием дейтерия (а, следовательно, и трития) состояла в электролизном до определенной степени разложении воды на кислород и водород с последующим синтезом ее в результате окисления (сжигания) последнего в кислороде, образующемся при электролизе воды.

Экспериментальный стенд включал в себя электролизер с циркулирующим электролитом, катодное и анодное пространство которого разделено катионообменной МФ-4, циркуляционный насос, расходную емкость для циркулирующего электролита, газо-жидкостные сепараторы, осушители газообразных продуктов электролиза, реактор высокотемпературного окисления водорода, конденсатор и приемную емкость для бездейтериевой воды. Сконденсированную воду со сниженным содержанием дейтерия подвергали химическим и физико-химическим исследованиям для определения ее химического и изотопного состава. Помимо воды с пониженным содержанием дейтерия использовалась вода, концентрация дейтерия в которой была несколько выше обычной среднеокеанической. Вода с повышенными концентрациями дейтерия готовилась с помощью той же установки, что и бездейтериевая вода, использованием воды из камеры концентрирования. Во избежание влияния структуры воды все образцы подвергались стандартизации: очистке сорбционным методом и высокотемпературному нагреву с последующим охлаждением до комнатной температуры.

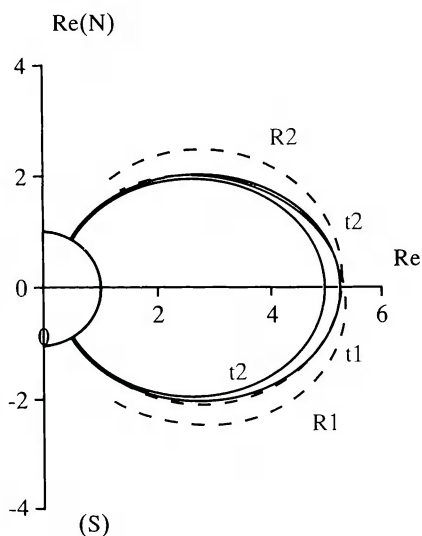


Рис. 1.8. Движение спутников R_1 и R_2 вдоль силовой линии магнитного поля

синяя линия – внешняя и внутренняя границы; красная – проекция орбиты спутника R_1 ; зеленая – то же, что и для красной линии для спутника R_2 ; t_1 и t_2 – синхронные вход и выход спутников R_1 и R_2 ; сплошная кривая – внутри, а пунктирная – вне трубки

Fig. 1.8. Blue curves – internal and external boundaries of the selected flux tube. Red curve – projection of the first satellite R_1 trajectory (solid curve – inside of the flux tube, dotted curve – outside of flux tube). Green curve – the same for second satellite R_2 . Symbols t_1 and t_2 (respective to the color) are markers of satellites entry and exit to from selected magnetic flux tube

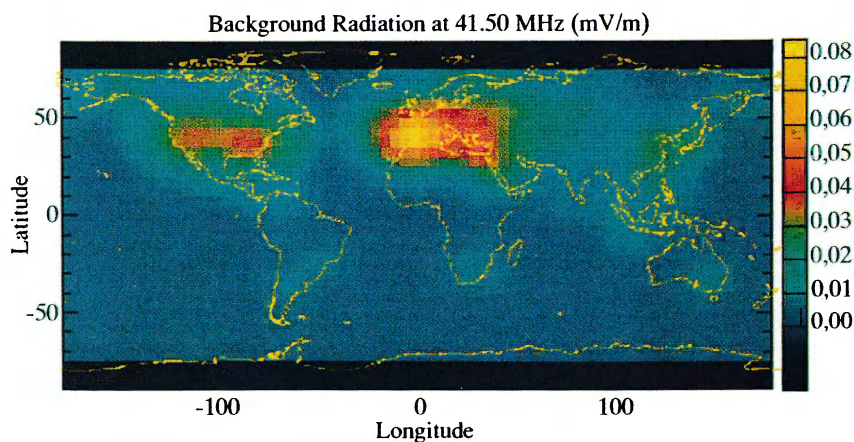


Рис. 5.10. Карта радиофонов глобального радиозагрязнения околоземного пространства для частоты 41,5 МГц и компиляция спутниковых измерений радиофонов

Fig. 5.10. The maximal background is produced by man-made sources, predominantly, by work of radio transmitters. To estimate this background, we made use of the "global radio-wave pollution" analysis of the near-earth space and compilation of the satellite radio-background measurements. It is exemplified here by the radio-background map for the frequency 41.5 MHz

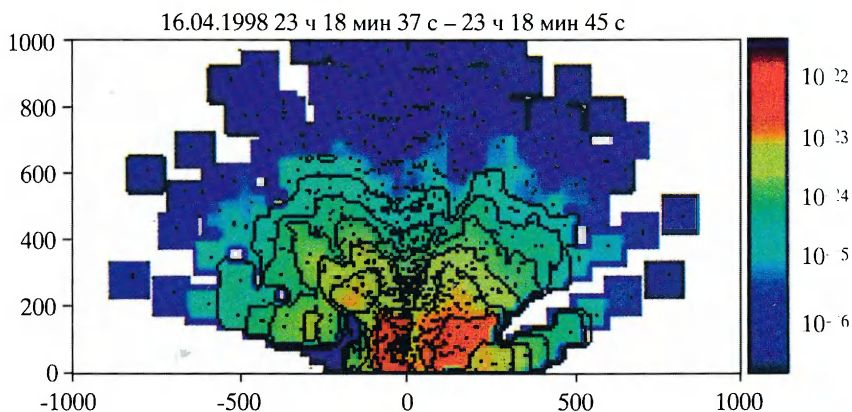


Рис. 3.7. Примеры функции распределения ионов в низкоширотном пограничном слое, демонстрирующие одновременную двустороннюю инжекцию плазмы в переходной области. Горизонтальная ось – скорость в поперечном направлении магнитного поля; вертикальная ось – скорость поперек направления поля

Fig. 3.7. An example of ion velocity distribution in magnetic coordinate system within LLBL on 16.04.1996, as measured on Interball. Horizontal axis is along the local magnetic field direction, vertical axis is perpendicular magnetic field line. Simultaneous injection of magnetosheath-like plasma is seen along magnetic field line and in opposite direction

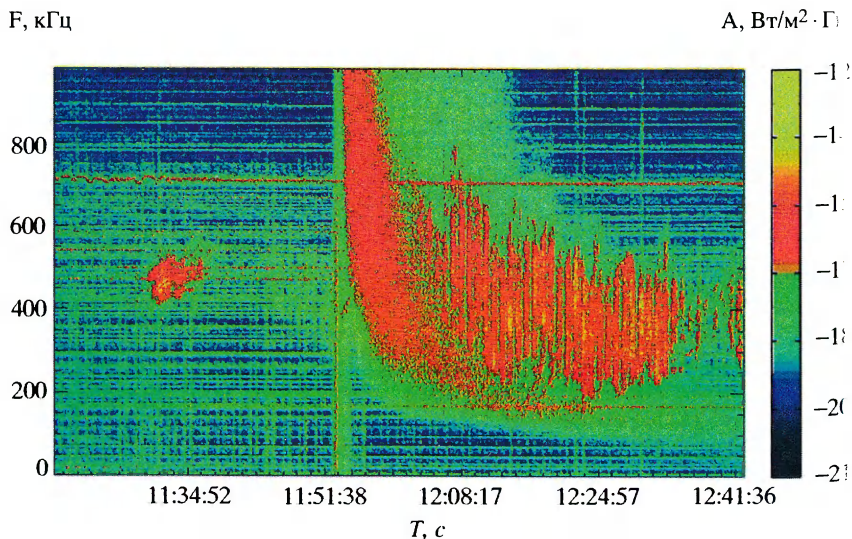


Рис. 3.9. Радиовсплеск III-го типа и начало АКИ
Fig. 3.9. AKR triggering by type III solar radio bursts

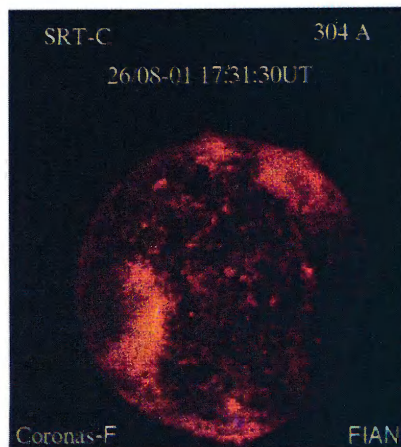
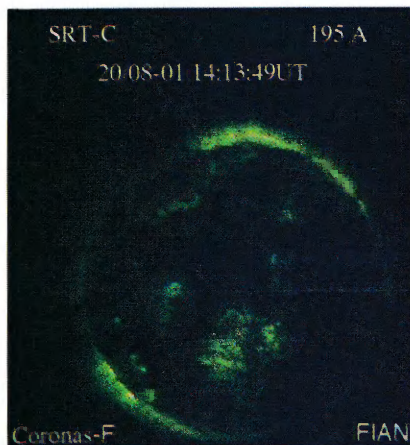
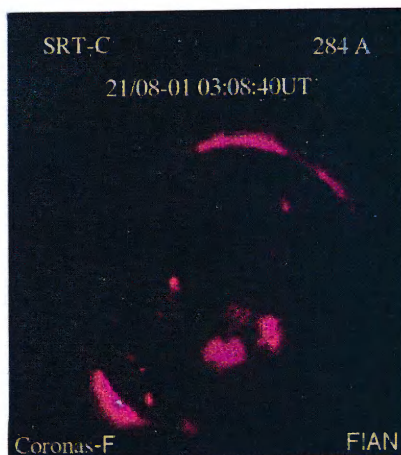
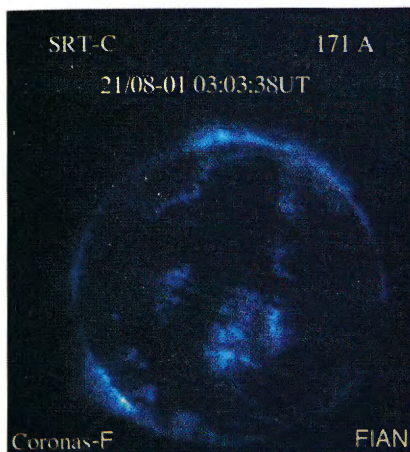


Рис. 3.13. Изображение Солнца в каналах рентгеновского телескопа, соответствующих температурным слоям в интервале 0,05–2 МК (эксперимент “Спирит”)

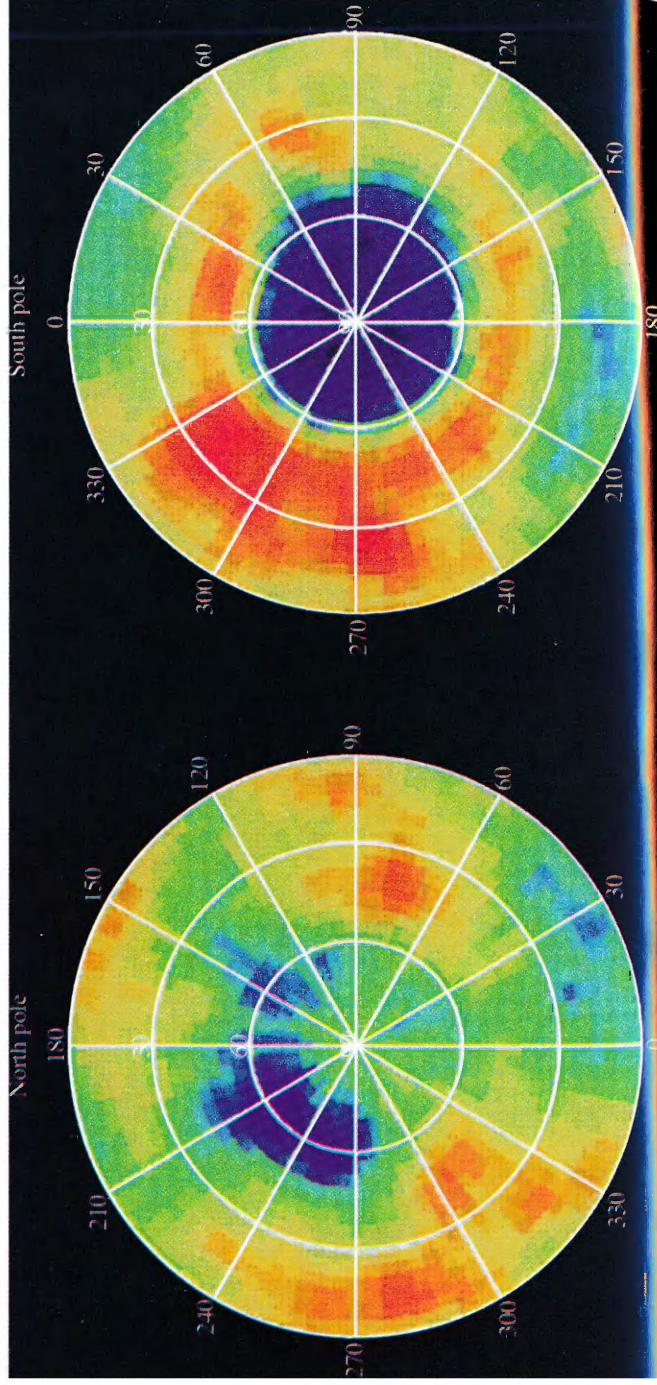
Fig. 3.13. A pair of simultaneous solar images in 175 and 304 Å obtained by the SPIRIT Herschel telescope on 03/01–2002 at 02 : 54 UT (a) and XUV solar images in 171, 195, 284 and 304 Å spectral bands of the SPIRIT Ritchey-Chretien telescope (b)

Рис. 4.2. Сезонные изменения потока нейтронов излучения Марса

верхние карты соответствуют поздней зиме на севере (слева) и позднему лету на юге (справа); нижние карты соответствуют ранней весне (слева) и ранней осени на юге (справа); испарение слоя углекислоты на севере обнаружило обширную область северной "вечной мерзлоты" (две карты слева), которая по размеру превосходит область южной "вечной мерзлоты" (две карты справа)

Fig. 4.2. Maps of seasonal variation of neutron flux from Mars. Upper maps correspond to late winter at north (left) and late summer at south (right)

Down maps correspond to early spring at north (left) and early fall at south. Evaporation of carbon dioxide deposits open a huge northern permafrost region (two left maps), which is larger than the area of Southern Permafrost Region (two right maps)



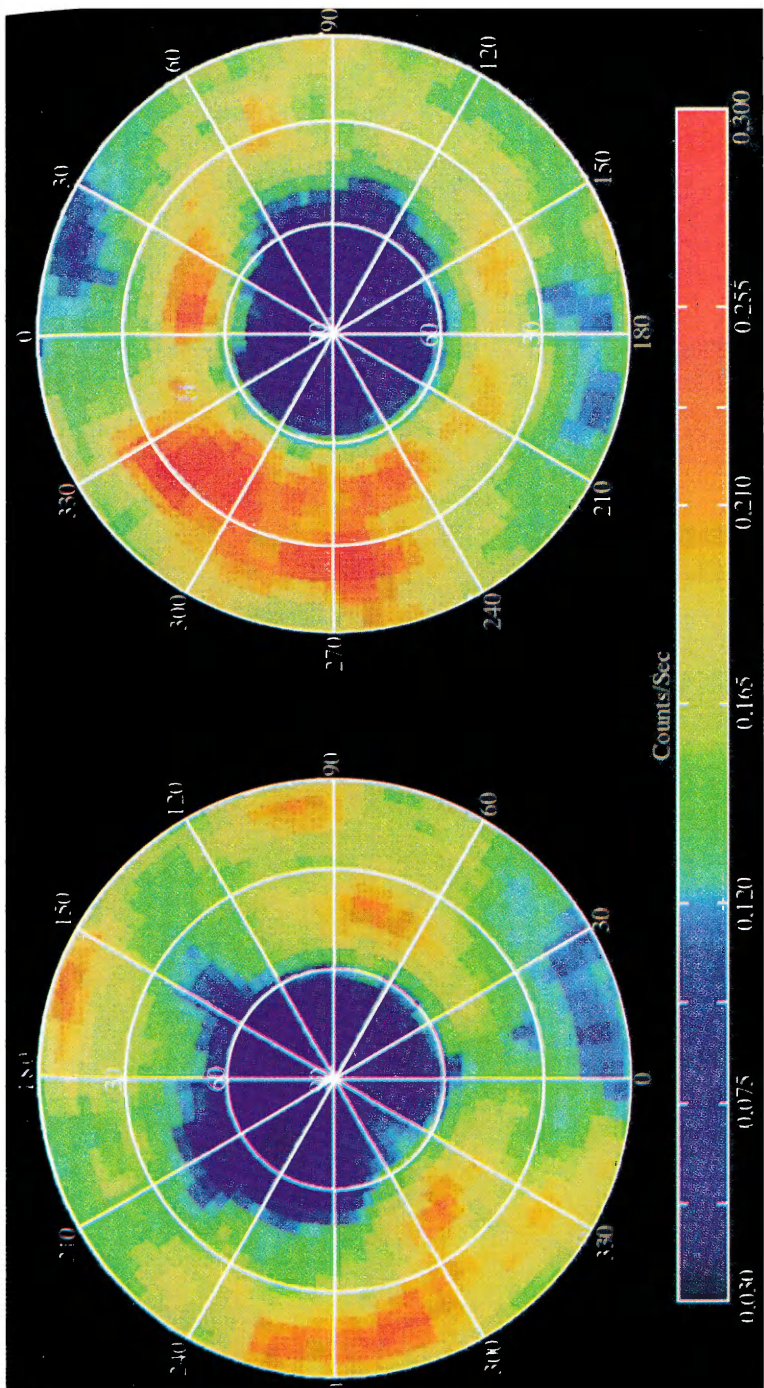
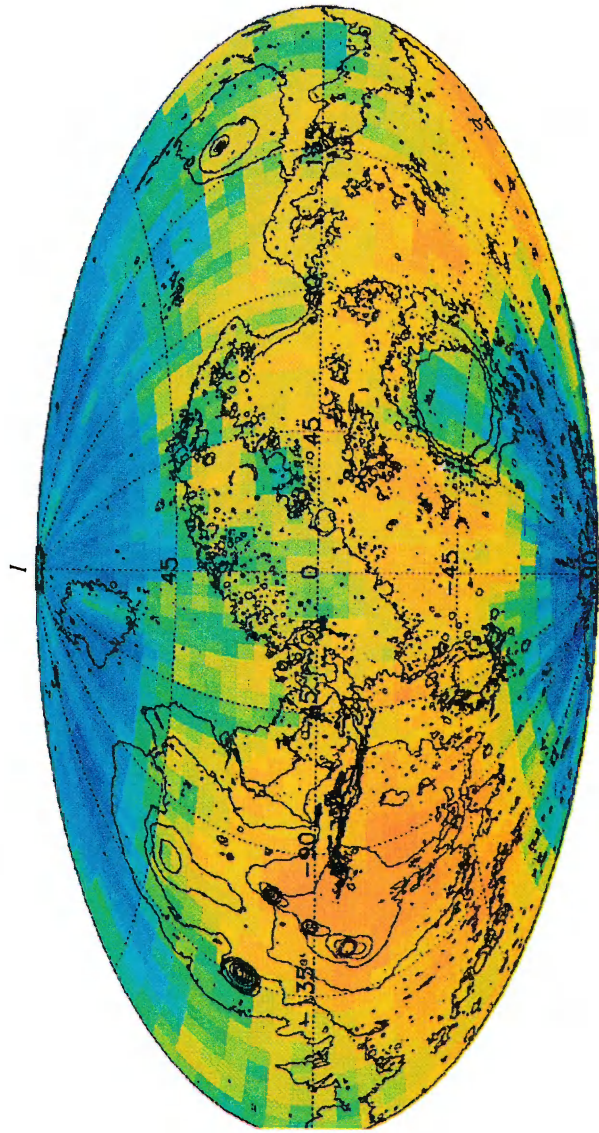
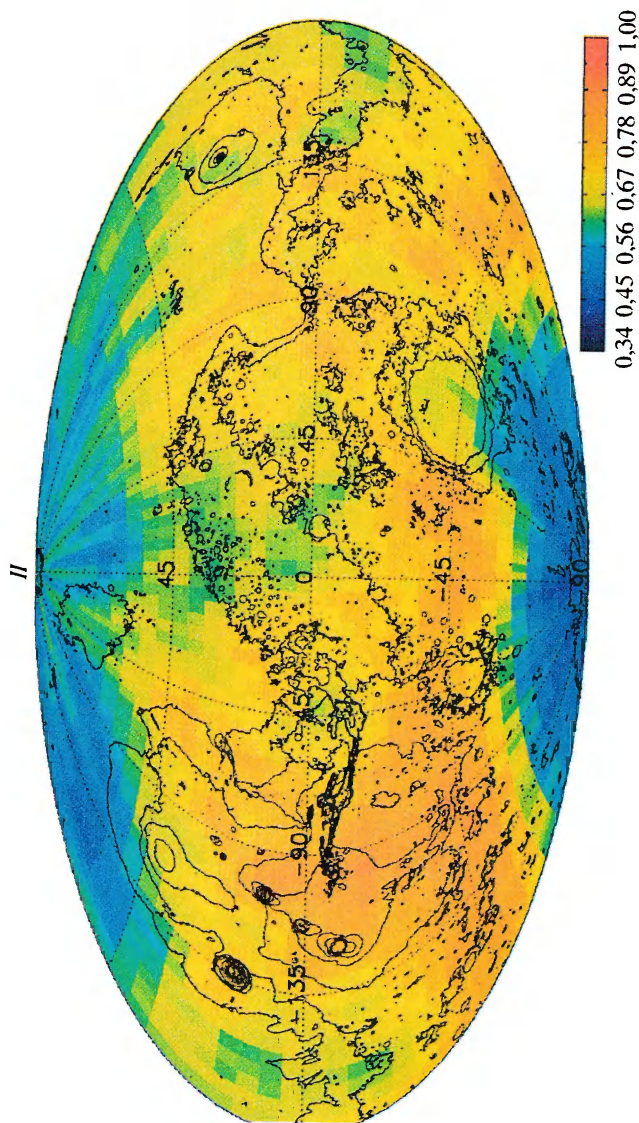


Рис. 6.7. Карты, полученные с помощью прибора "Хенд" для нейтронов высоких энергий (отсчеты/с) от Марса в энергетических диапазонах 0.85–2 (I) и 3.1–7.3 МэВ (II), и профили высоты поверхности Марса по данным лазерного высотомера проекта "Марс Глобал Сервейор"

Fig. 6.7. "Hend" Maps of high energy neutrons from Mars at energy ranges 0.85–2.0 MeV (I) and 3.1–7.3 MeV (II). The altitude profiles are also shown according to data from Mars Orbital Laser Altimeters on Mars Global Surveyor





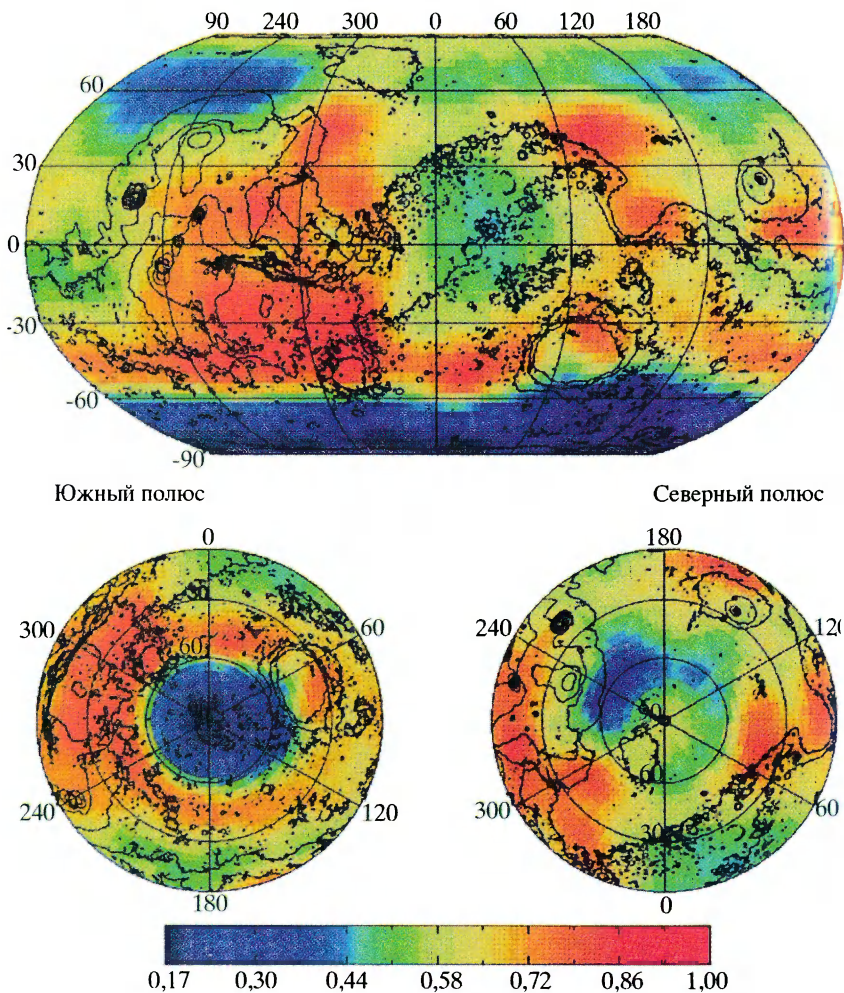


Рис. 4.1. Карта излучения эпитепловых нейтронов с поверхности Марса полученная с помощью российского прибора "Хенд" на борту КА "2001 Марс Одиссей". Синий цвет – районы с высоким содержанием водяного льда в приповерхностном слое планеты

Fig. 4.1. Map of epithermal neutrons from the surface of Mars, which was measured by Russian space instrument HEND on board NASA spacecraft "2001 Mars Odyssey". Blue color corresponds to regions with high content of water ice in the upper-most subsurface

Изотопный состав регенерированной воды определяли методом масс-спектрометрии. Малые вариации изотопного состава кислорода и водорода (dD) и кислорода (dO_2) выражали в относительных единицах – промиллях отклонения от стандарта (SMOW). Отрицательные значения dD и $d^{18}O_2$ означают пониженные значения концентраций дейтерия и тяжелого изотопа кислорода $^{18}O_2$ в анализируемом образце относительно SMOW, положительные значения dD и $d^{18}O_2$ относятся к повышенным их значениям.

Содержание дейтерия в противековой воде, полученной методом электролиза, снижено на 60–82% по сравнению со стандартом SMOW. В дистиллированной воде отмечено снижение концентрации дейтерия на 7%, что можно объяснить как процессом дистилляции, так и тем, что исходная природная (водопроводная) вода имеет несколько пониженные содержания дейтерия по сравнению со среднеокеанической водой. Полученную электролизным методом воду с пониженным и повышенным содержанием дейтерия использовали для исследований ее влияния на рост и развитие высших растений (арабидопсис) и физиологический статус японского перепела.

При культивировании арабидопсиса проведено исследование зависимости продолжительности полного цикла вегетации и его отдельных фаз под воздействием различных концентраций дейтерия в воде, используемой для полива. Установлено, что использование воды с измененным изотопным составом привело к изменению цикла развития растений арабидопсиса. Так, наступление наиболее важной фазы развития – цветения – отмечено в возрасте 17 дней в варианте с бездейтериевой водой, в 19 дней в контрольном варианте и в 21–22 дня – в варианте использования воды с повышенной концентрацией дейтерия.

При сопоставлении параметров растений было обнаружено, что с уменьшением концентрации дейтерия в воде наблюдается формирование растений с большими показателями массы, числа побегов, стручков и семян в них. Совокупная семенная продукция одного растения арабидопсиса составила в среднем 322 семени при поливе бездейтериевой водой, 141 семя при поливе обычной дистиллированной водой и 95 семян при поливе водой с несколько повышенным ($dD = +355\text{‰}$) содержанием дейтерия.

Экспериментальные данные по биологической оценке бездейтериевой воды показали ее положительное влияние на рост и развитие японского перепела. Рост птицы, потреблявшей бездейтериевую воду (первая группа), была выше темпов роста птиц, употреблявших дистиллированную воду (вторая группа).

Отмечено положительное влияние бездейтериевой воды и на продуктивность птиц: яйцекладка у самок первой группы началась на 44-е сутки, у самок второй группы на 49-е сутки; яйценоскость несушек первой группы составила за 25 дней 65 штук яиц, в то время как у второй – 46 шт., фертильность у самок первой группы наступила на 44-е сутки, а у самок второй группы на 7 дней позже, выживаемость птенцов второго поколения для первой группы, составила 88,2%, а для второй группы 52,9%.

При забое птиц оценивалось состояние внутренних органов. Показано, что общий вес птиц и вес большинства внутренних органов птиц (самцов) первой группы были выше. Визуальный осмотр и взвешивание внутренних органов птиц показал, что у самцов первой группы были хорошо развиты гонады, в отличие от птиц второй группы, у которых отмечались лишь зачатки гонад.

Результаты исследований воды с пониженными концентрациями дейтерия свидетельствуют о ее биологической активности и о существовании ингибирующего (тормозящего биохимические процессы) механизма действия дейтерия даже в незначительных концентрациях. Особенно ярко этот эффект проявляется при исследовании репродуктивной функции, что можно объяснить повышенными значениями водородной связи, присущими дейтерию, и как следствие, затруднениями редупликации ДНК и РНК.

3. Ранее нами было показано, что функционирование систем жизнеобеспечения (СЖО) экипажей космических аппаратов и обменные процессы в автотрофных и, в меньшей степени, в гетеротрофных организмах сопровождаются изменением изотопного состава водорода и кислорода (протия, дейтерия, $^{16}\text{O}_2$ и $^{18}\text{O}_2$). Однако, остается неизвестным происходит ли фракционирование стабильных изотопов других биогенных химических элементов: К, Mg, Ca, Fe и т.д. Можно предположить, что в условиях невесомости изотопный состав и этих биогенных химических элементов, потребляемых человеком с водой, пищей и кислородом, будет изменяться в процессе метаболизма.

Изменения изотопного состава биогенных химических элементов в среде обитания свидетельствуют о биологической неравноценности стабильных изотопов. За последние годы накоплены экспериментальные данные, подтверждающие токсическое действие дейтерия в воде и тяжелого изотопа кислорода $^{18}\text{O}_2$. Вопрос о возможной биологической неравноценности (а возможно и токсичности) тяжелых стабильных изотопов других биогенных химических элементов остается открытым. Тяжелые изотопы биогенных химических элементов должны либо накапливаться в организме и изменять скорости и направление биохимических процессов (по аналогии с дейтерием), либо претерпе-

вать стадии фракционирования и выводиться из организма с продуктами обмена (пути и механизмы выведения пока не известны), либо быть индифферентными в процессах метаболизма. Высказывалось мнение о том, что в биологических системах фракционирование стабильных изотопов не происходит.

В СЖО на основе замкнутого круговорота веществ в условиях длительных экспедиций будут происходить процессы многократного поглощения и выделения одних и тех же атомов веществ, входящих в состав организма человека и окружающей среды. Изменение изотопного состава биогенных химических элементов будет реализовываться в соответствии с числом циклов круговорота веществ в системе и коэффициентов фракционирования. В условиях невесомости процесс фракционирования стабильных изотопов биогенных химических элементов в процессе метаболизма может протекать со скоростями, отличными от земных условий (например, при деминерализации костной ткани).

Исследование фракционирования и путей выведения тяжелых стабильных изотопов биогенных химических элементов проводилось в условиях Земли в ходе 240-суточного эксперимента по программе "Sfincss-99", что служило фоном для космических экспериментов по определению степени влияния условий гермообъекта на процессы метаболизма (декальцинации, деадейтеризации и др.). Изотопному анализу подвергались продукты питания, отходы жизнедеятельности (фекалии, моча, волосы, ногти), а также кровь (эритромаасса). Было обнаружено фракционирование стабильных изотопов биогенных химических элементов (магния, кремния, кальция, железа, меди) в организме обследуемых, что свидетельствует о биологической их неравноценности.

Общей закономерностью фракционирования стабильных изотопов в организме человека является увеличение доли тяжелых фракций и снижение легких в отходах жизнедеятельности. Такую закономерность, можно объяснить выведением из организма тяжелых изотопов. Иными словами, организм освобождается в первую очередь от тяжелых фракций изотопов и использует преимущественно их легкую фракцию. Однако увеличение доли тяжелых фракций стабильных изотопов в эритромассе пока остается необъяснимым. Трудно объяснить эффектом является и отсутствие заметных изменений изотопного состава таких биогенных химических элементов, как сера, хлор и калий.

Закономерности, найденные при исследовании оптимального состава биогенных химических элементов применительно к условиям искусственной среды обитания космонавтов, могут найти широкое применение в медицинской практике и сельском хозяйстве.

2.6. О физиологических механизмах изменений костной системы человека в космическом полете

Скелет человека на протяжении миллионов лет биологической эволюции формировался при участии земной силы тяжести. И это принципиальным образом сказалось на форме скелета, общей массе и структуре костей человека, архитектонике костной ткани. Их настоящее состояние адекватно отражает приспособительное развитие в процессе эволюции средств противостоения механической деформации, обусловленной возросшим влиянием силы тяжести после выхода живых организмов из водной среды обитания на сушу. Это хорошо подтверждается ретроспективным анализом исследований в эволюционной и сравнительной физиологии. Они свидетельствуют о наличии явной зависимости удельной массы скелета наземных животных от размеров их тела (принцип подобия Галилея) и об отсутствии таковой у обитателей водной среды, где выталкивающая сила противодействует силе земного тяготения. Не только действие силы тяжести как таковой, но и механические стимулы, создаваемые в костной ткани усилиями скелетных мышц при локомоциях или при поддержании вертикальной позы на Земле, образуют в совокупности то “внешнее механическое поле”, величина которого (она, строго говоря, не поддается измерению) формирует устойчивость костей к механическим нагрузкам в фило- и онтогенезе.

Важно, что и во взрослом состоянии наземные животные так же весьма чувствительны к механической стимуляции. Еще в XIX и начале XX вв. многие видные естествоиспытатели (J. Lamarck (1809), Ч. Дарвин (1859), J. Wolff (1892), W. Roux (1905), К.Э. Циолковский (1935), И.И. Шмальгаузен (1940) и др.) отмечали, что животные обладают способностью адаптировать костномышечные структуры к физической активности, в которую они вовлечены. При этом морфологические и физиологические модификации тканей и органов у взрослых животных, возникающие под влиянием меняющихся функциональных требований, принято называть функциональной адаптацией. Поэтому следовало ожидать, что в условиях воздействия факторов космического полета (уменьшение весовой нагрузки, гипокинезия, изоляция и др.) в результате адекватного адаптивного ремоделирования костной ткани ее масса будет уменьшаться.

О том, что дефицит движений может и на Земле стать причиной заболевания, хорошо известно клиницистам. Состояние, возникающее у больных, вынужденных длительное время находить-

ся на постельном режиме, определяется как “иммобилизационный остеопороз”.

Остеопороз – заболевание, выражающееся уменьшением костной массы в организме, изменением структуры костей и снижением их прочности, в связи с чем существенно повышается риск перелома костей. Как и многие другие недуги нашего организма, остеопороз в значительной степени определяется наследственностью или генетическими особенностями человека. Но степень их проявления во многом зависит от других факторов риска и их выраженности относительно каждого человека. Одним из существенных факторов риска остеопороза является гипокинезия.

В любом случае, остеопороз – серьезная медицинская и медико-социальная проблема, главным образом, в связи с часто возникающими на этой почве переломами. Последующее лечение и реабилитация таких больных требует и значительных материальных затрат. Например, в развитых странах они достигают \$10 млрд и более в год. Последнее обстоятельство, а именно медико-социальные и экономические аспекты остеопороза, придает совершенно иной масштаб и фундаментальность этой частной, на первый взгляд, задаче диагностики и предупреждения остеопении в космической медицине.

В работе представлены обобщенные результаты исследований состояния костной ткани у российских космонавтов после космических полетов длительностью 5–7 месяцев, а также результаты проведенного в последние два года анализа возможных механизмов наблюдаемых изменений, в том числе на основе опыта, накопленного лабораторией в клинике метаболических остеопатий.

С помощью аппаратуры для трансмиссионной остеоденситометрии (dual-energy X-ray absorptiometry – DEXA) QDR-1000/W (Hologic, США) измеряли проекционную минеральную плотность костной ткани (МПК) в г/см², и содержание костных минералов (СКМ, г), которые отождествляются с величиной костной массы, в различных сегментах скелета. По результатам сканирования всего тела проводили региональный анализ костной массы в области черепа (включая шейные позвонки), рук, ребер, грудного и поясничного отделов позвоночника, таза и ног. По программе субрегионального (локального) анализа с более высоким разрешением исследовали поясничный сегмент позвоночника и проксимальный эпифиз бедренной кости.

Как показано ранее, направленность и выраженность изменений минеральной плотности костной ткани и их локализация в различных участках скелета зависят от их положения относительно вектора гравитации, функционального профиля и типа

структуры ткани. Закономерно снижение МПК (уменьшение костной массы) в трабекулярных структурах костей нижней половины скелета, где среднегрупповые потери минеральной плотности за полет составили в поясничных позвонках: $-5,63 \pm 0,82\%$, проксимальном отделе бедренной кости, в частности – в шейке бедра: $-8,17 \pm 1,24\%$ и в костях таза: $-11,99 \pm 1,22\%$.

В сегментах верхней половины скелета (кости черепа, руки, ребра, иногда шейные и грудные позвонки) изменения МПК (в костях черепа – СКМ) либо отсутствуют, либо имеют отчетливую положительную тенденцию. Феномен рассматривается как вторичная реакция на закономерное в условиях микрогравитации перераспределение жидких сред в краниальном направлении. Учитывая гипотезу о возможном повышении в невесомости интракраниального давления и данные о стимулирующем влиянии локального венозного застоя на костеобразование, можно допустить, что наблюдаемый феномен отражает ситуацию, способствующую аккумуляции минералов в костном интерстиции и, возможно, в мягких тканях головы.

Установлены высокие межиндивидуальные различия в направленности и выраженности изменений костной массы у космонавтов, связанные, скорее всего, с наследственными факторами. Действительно, в современной литературе накапливается все больше данных, которые позволяют ассоциировать индивидуальную вариабельность изменений (как и широту диапазона нормы) с полиморфизмом генов, ответственных за синтез белков костного матрикса, в частности рецепторов витамина D, интерлейкина-6, коллагеназы и, возможно, коллагена и рецепторов эстрогенов. Более того, с различными полиморфизмами упомянутых и некоторых других генов ассоциируется “предрасположенность” к сниженной МПК, развитию остеопороза и переломам на этой почве.

Клинико-физиологическая оценка обнаруженных изменений учитывает регламент ВОЗ, дифференцирующий остеопеничные состояния у человека по признаку МПК как норма–остеопения–остеопороз. На этом основании можно констатировать, что среднегрупповые значения костной массы у космонавтов после полета в сегментах нижней половины скелета, как правило, не выходят за пределы нормы, т.е. показатели МПК не уменьшаются ниже 1SD от значений пиковой костной массы в молодом возрасте (Т-масштаб по классификации ВОЗ). Индивидуальный анализ позволяет выявить случаи, преимущественно с исходно низкой костной массой у космонавтов, когда снижение МПК в поясничных позвонках после полета выходит за пределы $-1SD$, но не опускается ниже $2,5SD$ по Т-критерию, и это квалифицируется как локальная остеопения.

Восстановление МПК у космонавтов после полетов длительностью 5–7 месяцев происходит спонтанно в процессе общих реабилитационных мероприятий, и это требует, как установлено, значительного времени (1–3 года). Тем не менее, эту скорость репарации костной массы следует считать достаточно высокой, поскольку в клинике при остеопорозе, развивающемся с такой же или даже меньшей скоростью, трудно добиться восстановления даже при значительных терапевтических вмешательствах.

При рассмотрении биомеханических и метаболических гипотез генеза наблюдаемых изменений, и, в первую очередь, остеопении, имеющей в целом физиологический характер и признаки адаптивной реакции был проведен анализ возможного участия различных уровней и механизмов регуляции метаболизма костной ткани. А именно, собственно костных, предполагающих сложный характер обмена Ca^{2+} между кристаллической структурой, лабильным пулом аморфного кальция и интерстициальной жидкостью, тканевых (внекостных) и системных, где целесообразно различать (условно) иерархию взаимосвязанных систем волуемо-, осмо-, и ионорегуляции и сопряженную с ней системную регуляцию обмена Са остеотропными гормонами (паратгормон, кальцитонин, кальцитриол и др).

Проведенный анализ результатов собственных исследований и литературных данных позволяет в соответствии с биомеханической гипотезой полагать, что первичные (пусковые) реакции развиваются на локальном (собственно костном) уровне. Так, можно допустить, что отмеченное в опытах с животными на биоспутниках “Космос” снижение прочности костей при неизменной минерализации на ранних этапах полета (до трех недель) может быть связано с изменениями физико-химических параметров связи коллаген–кристалл. Наблюдаемый в таких же опытах феномен торможения ранней стадии дифференцировки остеобластов, который может быть реализован при участии местных факторов регуляции, рассматривается как следствие дефицита механической (деформирующей) нагрузки и, в свою очередь, ведет к снижению уровня новообразования в процессе адаптивного ремоделирования костной ткани. Подобные явления на тканевом уровне в сочетании с высокой скоростью их развития могут стать причиной изменения “качества кости”, что во многом, наряду с потерей костной массы, определяет риск перелома костей.

Вероятность того, что изменения имеют преимущественно, или, по меньшей мере изначально локальный характер, подтверждается их отчетливой зоно- или ткане-специфичностью. Последнее может отражать фенотипические особенности метаболизма различных костных органов и тканевых структур. Их свя-

зывают с различием в количестве и пространственном распределении неколлагеновых белков (НКБ), свойственным разным костным органам. В то же время, НКБ как позиционные регуляторы определяют специфику взаимодействия костных клеток и регуляции их чувствительности к внешним факторам, включая нейрогуморальные влияния и механические нагрузки.

Все большее распространение и экспериментальные подтверждения находит точка зрения, согласно которой реакция костной ткани в космическом полете в значительной степени опосредована локальными факторами регуляции костного метаболизма. Данные об изменениях активности костных клеток *ex vivo* подтверждаются результатами их изучения в культуре *in vitro*, экспонированных в условиях микрогравитации. В опытах на органной культуре эмбриональной кости мыши показано снижение после космического полета скорости минерализации остеоида и утилизации глюкозы в культуре одновременно с повышением минеральной резорбции. Установлено также, что в культуре преостеобластоподобных клеток (линия MN-7) под влиянием микрогравитации замедляется синтез коллагена типа I и щелочной фосфатазы. На станции "Мир" в исследованиях на культуре хрящевых клеток отмечено уменьшение размеров колоний, снижение механической устойчивости культуральной конструкции и уровня синтеза гликозаминогликанов. Эти данные можно рассматривать как подтверждение возможности локального торможения остеобластического гистогенеза в условиях микрогравитации.

Однако некоторые изменения тканевых (внекостных) факторов например, снижение кальцийсвязывающей способности белков крови, снижение всасывания Са в кишечнике и реабсорбции в почечных канальцах, а также отдельные фазы перестройки систем волюмо- и ионорегуляции (как результат перераспределения жидких сред) могут провоцировать мобилизацию Са из кости для стабилизации его концентрации в крови, тем самым увеличивая суммарную потерю костной ткани.

Таким образом, на основе анализа данных сформулирована гипотеза о генезе остеопении. Представляется, что потеря костной массы в космическом полете обусловлена преимущественно локальным торможением остеогенеза вследствие дефицита механической стимуляции костей и относительной (или абсолютной) активацией резорбции, которая провоцируется системной перестройкой волюмо- и ионорегуляции, связанной, в свою очередь, с перераспределением жидких сред организма в краниальном направлении.

Кроме того, анализ результатов выявил ряд проблем, требующих решения. Отсутствие нормативных данных о минеральной

плотности различных звеньев скелета стимулирует исследования, направленные на формирование российской популяционной нормы. Высокая индивидуальная вариабельность изменений костной массы делает необходимым поиск генетических критериев прогноза риска развития остеопении. Значительная сложность прогноза риска травмы, которая обусловлена принципиально нелинейным типом связи минерализация–механика и вероятным изменением “качества” кости в космическом полете, требует специальных исследований.

Результаты проведенных исследований по гравитационной физиологии костной системы существенно расширяют представления о патогенезе некоторых форм остеопороза (на Земле). Есть основание считать, что одним из звеньев патогенеза остеопороза в некоторых ситуациях дефицита механической нагрузки (сенильный, иммобилизационный, посттравматический) может быть локальное торможение процессов остеобластического гистогенеза на ранних стадиях трансформации остеопрогениторных клеток в преостеобласты и дифференцировки последних в зрелые остеобласты. Сказанное может служить указанием на предпочтительность применения для профилактики и лечения указанных форм остеопороза препаратов, стимулирующих остеогенез.

2.7. Гравичувствительность эндотелиальных клеток человека *in vitro*

К настоящему времени не вызывает сомнения влияние измененной гравитации на состояние различных физиологических систем организма человека. Исследования, проведенные в модельных экспериментах и в условиях реального космического полета, свидетельствуют, что, вряд ли найдется система, неизменно функционирующая в условиях моделируемой и реальной микрогравитации. Однако вопрос о механизмах влияния гравитационного фактора на организм человека на клеточном уровне до сих пор остается открытым.

Известно, что одним из эффектов микрогравитации является перераспределение крови в организме, снижение объема циркулирующей крови и изменение регуляции сосудистого тонуса, что, в свою очередь, проявляется в последующем ортостатической неустойчивостью и снижением физической работоспособности. Одной из причин этого явления считается изменение реактивности периферических сосудов, в котором непосредственно участвуют клеточные элементы сосудистой стенки.

С одной стороны, именно эндотелий является одним из основных регуляторов сосудистого тонуса (через его взаимодействие с сосудистыми гладкомышечными клетками) и, следовательно, может играть не последнюю роль в поддержании нормального функционирования сердечно-сосудистой системы в условиях невесомости. С другой стороны, общая масса эндотелиальных клеток (ЭК) в организме взрослого человека достаточно велика и может достигать 1,5 кг, что позволяет сравнивать эндотелий с такими органами, как печень, легкие и т.д. Кроме того, эндотелий является не только мишенью большинства из известных биологически активных соединений, но и способен продуцировать многие из них, активно влияя как на локальные реакции, так и на состояние организма в целом. Тем не менее, несмотря на очевидную необходимость изучения возможных реакций эндотелия на измененную гравитацию, подобная информация на сегодняшний день в литературе отсутствует. Между тем, исследования в этой области могли бы не только расширить сложившиеся представления о клеточной биологии эндотелия и сосудистой стенки человека, но и помочь в разработке комплекса мер по устранению негативного воздействия невесомости на сердечно-сосудистую систему космонавтов.

Цели данной работы включали: разработку культуральной модели, позволяющей исследовать реакции эндотелия человека на измененную гравитацию и, поиск ответа на вопрос, способны ли эндотелиальные клетки воспринимать гравитационный стимул?

В ходе серии пилотных экспериментов была разработана модель, позволяющая культивировать ЭК человека в условиях гипогравитации и исследовать морфофункциональные изменения эндотелия на разных стадиях формирования монослоя. В качестве объекта исследования была выбрана культура ЭК пупочной вены человека. Методики выделения ЭК и основные приемы, используемые при работе с клетками известны. Клетки культивировали до образования монослоя в CO_2 -инкубаторе (5% CO_2 , 95% воздух, влажная атмосфера) при +37 °C. Конфлюэнтные первичные культуры ЭК снимали трипсином-ЭДТА (GIBCO) и пересеивали с разведением 1 : 10 в покрытые желатиной (Sigma) культуральные флаконы с площадью поверхности 25 мм² (Costar). Через 18 ч среду культивирования заменяли на свежую. При этом, флаконы заполняли полностью средой, не оставляя пузырьков воздуха, после чего дополнительно герметизировали эластичной пленкой "Парафилм" и закрывали крышками.

Постоянное изменение вектора гравитации создавали с помощью горизонтального клиностата с частотой вращения

3–5 об/мин. Клиностамирование клеток осуществляли на протяжении 7–15 сут непосредственно в CO_2 -инкубаторе. Состояние культур контролировали с помощью фазово-контрастной компьютерной видеомикроскопии (Diaphot-TMD, Nikon).

Первая и, пожалуй, основная проблема, состояла в необходимости дополнительной отработки адекватных контролей. Это связано с тем, что в ходе клиностамирования помимо самого эффекта измененной гравитации присутствует, на первый взгляд несущественный эффект постоянного перемешивания среды культивирования, особенно заметный при длительных экспериментах. В статической культуральной системе, обычно используемой при работе с прикрепленными к подложке клетками, культуры достаточно быстро “кондиционируют” тонкий слой среды. Это связано, во-первых, с утилизацией содержащихся в ней питательных веществ и, во-вторых, с секрецией в среду продуктов клеточного метаболизма, в том числе биологически активных (цитокинов, ростовых факторов и т.п.). При этом даже при использовании избыточных (в пересчете на число клеток) объемов среды в статических условиях культуры реально используется лишь ее незначительная “донная” часть. Поэтому, для преодоления данного артефакта перемешивание среды культивирования в ходе длительных экспериментов становится необходимым. Для этого использовали платформу горизонтального ротатора с достаточно высокой частотой вращения (50–80 об/мин). Ротатор периодически (через 1–2 ч) включается на 1–2 мин с помощью электронного таймера. При отсутствии в системе пузырьков воздуха скорость движения среды минимальна и действие фактора потока жидкости нивелировано несмотря на высокую частоту вращения ротатора. Это подтверждается отсутствием волокон напряжения (stress fibers), характерных для клеток, активированных потоком жидкости в открытой культуральной системе.

Известно, что одним из наиболее изученных проявлений ответа эндотелия на измененное микроокружение является изменение скорости пролиферации клеток. В совокупности с данными, полученными при исследовании эффектов гипо- и микрогравитации на пролиферативную активность других типов культивируемых клеток, позволяет предположить, что если ЭК чувствительны к гравитационному стимулу, они должны отвечать соответствующим изменением скорости роста. Для проверки данного предположения нами были исследованы некоторые параметры пролиферации и формирования монослоя в культуре ЭК в условиях длительного клиностамирования.

Полученные данные свидетельствуют, что скорость роста ЭК значительно (в среднем в два раза, различия статистически

достоверны) снижена при воздействии гипогравитации по сравнению с контролем. Аналогичная закономерность была выявлена и при пассировании культур, формирование монослоя в которых происходило в условиях предшествующей гипогравитации: сниженная пролиферативная активность ЭК в условиях гипогравитации сохраняется на протяжении всего времени субкультивирования.

Морфологический анализ культур позволил выявить еще одну интересную особенность формирования монослоя при клиностаტიровании. Клетки, растущие в условиях гипогравитации, выглядят более распластанными и достигают состояния преконфлюэнтного монослоя при более низкой плотности, чем контрольные. Однако в последующие несколько суток плотность таких культур продолжает нарастать, и они практически догоняют контрольные. Максимальная плотность эндотелиальных монослоев, сформированных в контрольных культурах и культурах в условиях клиностаტიрования, по результатам нескольких экспериментов достоверно не отличается и составляет 750–800 клеток на 1 мм². Возможно, сниженные темпы роста ЭК в условиях гипогравитации несколько компенсируются увеличением степени распластанности клеток, что способствует более раннему формированию межклеточных контактов, необходимых для нормального функционирования эндотелия.

Таким образом, проведенное исследование показало, что пролиферативная активность эндотелия человека снижается в условиях длительного клиностаტიрования по сравнению с традиционными условиями культивирования. Полученные результаты свидетельствуют, что, наряду с чувствительностью к механическим факторам, эндотелий человека способен к восприятию гравитационного импульса. Кроме этого, выявленное изменение степени распластанных клеток под воздействием гравитации позволяет думать об изменении структур цитоскелета.

Для визуализации актиновых филаментов (F-актина) клетки фиксировали 4%-ным параформальдегидом на фосфатном буфере Дульбекко с добавлением 1%-ного тритона X-100 и окрашивали РИТЦ-фаллоидином. После отмывки и заключения в Мовиол (Fluka) препараты исследовали и фотографировали на флюоресцентном микроскопе Photomicroscope-III (Opton). Для изучения миграционной активности клеток была использована хорошо зарекомендовавшая себя ранее модель репарации механически поврежденного монослоя. Стадии реэндотелиализации поврежденного участка контролировали с помощью фазовоконтрастной компьютеризированной видеомикроскопии в контрольных конфлюэнтных культурах ЭК F-актин был представлен организо-

ванной сетью филаментов, расположенных преимущественно в периферической части цитоплазмы и направленных вдоль границ клеток. Уже через 1–2 ч после начала клиностатирования актиновый цитоскелет претерпевает ряд заметных изменений: филаменты истончаются и начинают перераспределяться в область межклеточных контактов. На протяжении 6–12 ч центральная часть клеток практически освобождается от актиновых фибрилл и волокон напряжения. В то же время в краевой зоне формируется непрерывная линия F-актина, четко контрастирующая границы клеток. В последующие 12–24 ч существенных изменений не происходит. В течение всего указанного промежутка времени в цитоплазме также выявляются глыбки деполимеризованного актина.

В большинстве ЭК описанные изменения цитоскелета сопровождаются формированием так называемого волнистого края (*ruffled edge*), обогащенного F-актином. Утрата волокон напряжения и формирование волнистого края способствуют усилению клеточной подвижности, поэтому была исследована миграционная активность клеток на модели механически поврежденного монослоя. В течение первых 30 мин в опытных культурах происходит активная миграция ЭК в область повреждения, сопровождающаяся репарацией до 50% деэндотелиализованного участка. В эти же сроки в контроле наблюдается лишь незначительная миграция клеток. Различия в миграционной активности культур сохраняются и в последующие 2–3 ч.

Сходные с представленными изменения организации актинового цитоскелета ЭК, степени распластанности клеток и скорости репарации механически поврежденного монослоя были описаны нами ранее в ответ на добавление цАМФ-повышающих препаратов. Поэтому, полученные результаты позволяют предположить, что воздействие гипогравитации на эндотелий человека связано с изменением активности систем вторичных посредников, в частности, аденилатциклазы и сопровождается изменением многих звеньев клеточного метаболизма.

Известно, что миграционная активность, адгезия и межклеточное взаимодействие связаны со способностью клеток экспрессировать на поверхности молекулы адгезии. Именно поэтому была поставлена цель изучить экспрессию на поверхности ЭК представителя семейства селектинов – E-селектина, и двух представителей семейства иммуноглобулинов – ICAM-1 и VCAM-1. Известно, что разные классы молекул клеточной адгезии ЭК способны взаимодействовать с соответствующими рецепторами на поверхности гетерологических клеток, например, лимфоцитов. В различных комбинациях эти и другие синтезируемые обо-

ими клеточными типами биологически активные субстанции способны определить как направленность, так и интенсивность межклеточных взаимодействий.

С помощью гистохимических методов и антител с флюоресцентной меткой было показано, что контрольные клетки не содержали Е-селектин и VCAM-1, но были ICAM-положительны. Уже через 6–8 ч клиностатирования содержание ICAM-1 достоверно возрастало. Кроме того, гипогравитация потенцировала эффекты цитокинов (TNF- α , интерлейкин-1) на экспрессию ICAM-1. Клиностатирование само по себе не влияло на экспрессию Е-селектина и VCAM-1, однако при этом происходило уменьшение экспрессии молекул адгезии при активации эндотелия цитокинами.

Поскольку обнаруженная модификация плотности молекул адгезии на поверхности ЭК должна приводить к изменению адгезивных свойств эндотелия в отношении клеток крови, эти свойства были исследованы в отношении ко-культуры лимфоцитов периферической крови человека. Эксперименты показали, что как контрольные, так и клиностатированные культуры слабо поддерживают спонтанную адгезию лимфоцитов. После стимуляции лимфоцитов ФГА степень их адгезии на поверхности эндотелия возрастала в 15–20 раз. Взаимодействие не стимулированных лимфоцитов с ЭК, стимулированными цитокинами, была более заметной, но подавлялась при длительной гипогравитации.

Обнаруженные при длительном клиностатировании изменения экспрессии клеточных молекул адгезии могут двояко модифицировать адгезивные свойства клеток. С одной стороны, снижение экспрессии Е-селектина негативно влияет на первые этапы клеточного взаимодействия эндотелия с лимфоцитами, поскольку снижается чувствительность распознавания. С другой стороны, постоянное изменение вектора гравитации потенцирует эффекты цитокинов и стимулирует экспрессию ICAM-1 – рецепторов CD11a/CD18 на мембране лейкоцитов. Теоретически это может приводить к увеличению адгезии активированных клеток, но практически не проявляется. Причиной этого может быть то, что уровень базальной адгезии практически близок к нулю, и в этих условиях способность лимфоцитов к адгезии может проявиться только после дополнительного внешнего воздействия.

Полученные результаты, а также литературные данные свидетельствуют о том, что гравитационный стресс существенно меняет подвижность механочувствительных клеток в культуре, экспрессию молекул адгезии и межклеточное взаимодействие. Таким образом гравитационные эффекты могут проявляться не

только в изменении цитоскелета, но и рецепторных структур на поверхности клетки, приводящих к модификации взаимодействия гомо- и гетерологических клеток. Возможная модификация эндотелиальных клеток в условиях микрогравитации может приводить к изменениям регуляции сосудистого тонуса и иммунологических реакций во время длительного космического полета.

2.8. Исследование влияния условий невесомости на постэмбриональное развитие птенцов японского перепела

Первые эксперименты по изучению влияния условий космического полета на эмбриональное и постэмбриональное развитие японского перепела были проведены в 1990 и 1992 гг. на ОК “Мир”. В этих экспериментах была показана возможность получения нормальных жизнеспособных птенцов японского перепела в невесомости. Полученные результаты позволили сделать вывод о том, что невесомость не оказывает непосредственного влияния на протекание морфогенетических процессов на протяжении всего цикла развития эмбрионов японского перепела. Однако первое появление новорожденных птенцов японского перепела в условиях невесомости выявило новую проблему в гравитационной биологии – проблему адаптации новорожденных организмов к среде, где отсутствует вектор гравитации. Исследования поведения новорожденных птенцов японского перепела в условиях невесомости показали, что они не могут самостоятельно существовать в агравитационной среде. Наблюдения за поведением птенцов, показали, что все их врожденные инстинкты могут реализоваться только в случае их ориентирования в пространстве. В условиях Земли основным фактором, обеспечивающим ориентацию птенцов, является гравитация. Ее отсутствие с первых минут жизни вне яйца приводит к полной дезориентации птенца, что влечет за собой обесценивание врожденных двигательных инстинктов. Частичная компенсация отсутствия гравитационного фактора с помощью плотной фиксации птенцов в пространстве (в лотке инкубатора или в руке космонавта) позволяет им сохранить некоторые врожденные инстинкты (склеивание корма, нахождение взглядом твердой поверхности и попытки с помощью движения крыльями достичь этой поверхности). Это позволило предположить, что наличие специальных устройств и приспособлений для сохранения ориентации птенцов в пространстве, сделает возможным содержание птенцов в условиях реального космического полета.

В 1999 г. на борту ОК “Мир” в рамках программы полета словацкого космонавта в совместном российско-словацком эксперименте “Перепел СК-6” была предпринята попытка использования искусственной силы тяжести, как фактора способного обеспечить выживание и последующую адаптацию птенцов японского перепела в условиях невесомости.

Для проведения эксперимента перепелиные яйца, инкубированные на Земле до 13 и 14 суточного развития эмбрионов, в количестве 60 штук (по 30 яиц на каждый срок), были доставлены на борт ОК в транспортном инкубаторе, обеспечивающем необходимые условия инкубирования (температура – $37,5 \pm 0,5$ °C, влажность $65 \pm 5\%$). После овоскопирования целые яйца в количестве 56 штук (27 яиц первого срока и 29 яиц второго срока) были переложены в прибор “Инкубатор-1М” для дальнейшего инкубирования на борту ОК “Мир” с целью выведения птенцов. Для содержания птенцов на борту ОК “Мир” словацкие специалисты изготовили и поставили на борт центрифугу, в которой были размещены 12 индивидуальных блоков содержания птенцов (БСП): 6 птенцов на уровне 0,4g и 6 – на уровне 0,8g. (рис. 2.1).

Для проведения исследований поведения птенцов в условиях искусственной силы тяжести по программе эксперимента сразу после вылупления первые двенадцать птенцов были пересажены в индивидуальные клетки БСП. К сожалению, из-за неисправности БСП их пребывание в условиях искусственной силы тяжести ограничилось 15-ю часами. После чего птенцы были пересажены в ячейки “Инкубатора 1-М”, где и находились до окончания эксперимента. Вылупившиеся птенцы находились в условиях невесомости от 4 до 5 суток. В этом эксперименте впервые живые птенцы японского перепела были доставлены с орбиты на Землю.

Экспериментальный материал для исследований был представлен 10 птенцами, возвращенными на Землю в контейнерах возврата птенцов (КВП) и 20 птенцами, погибшими на борту ОК “Мир” и зафиксированными в спирто-глицериновой смеси. Исследование живых птенцов полетной группы было проведено через 10 часов после приземления спускаемого аппарата космического корабля “Союз-ТМ”.

В лаборатории ГНЦ РФ-ИМБП РАН была проведена видеозапись поведения трех птенцов японского перепела, доставленных на Землю с борта ОК “Мир”.

В методику обработки биологического материала входили: визуальный осмотр птенцов с подробным описанием особенностей их развития; проведение патолого-анатомического вскры-

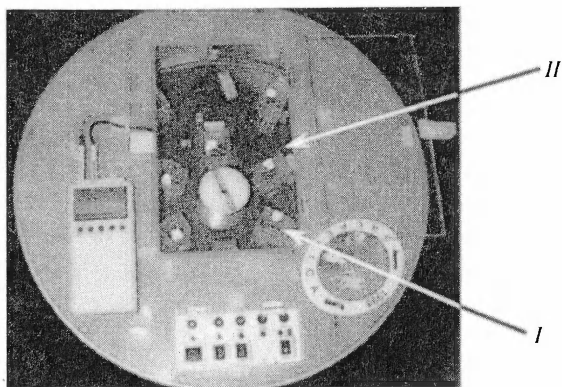


Рис. 2.1. Внешний вид бортовой центрифуги с расположенными внутри блоками содержания птенцов

I – уровень 0,4 g; II – уровень 0,8 g

тия с взятием образцов органов и тканей на гистологические исследования; выделение нижних конечностей для изучения развития опорно-двигательного аппарата птенцов.

Образцы биологического материала, зафиксированные на борту ОК “Мир”, дофиксировали и обезвоживали с последующим окрашиванием костной и хрящевой тканей по методу Dawson.

В эксперименте “Перепел-СК6”, к сожалению, по техническим причинам не удалось провести весь объем запланированных исследований. Птенцы японского перепела после вылупления на борту ОК “Мир” находились в условиях искусственной силы тяжести только 15 часов, поэтому ответа на главный вопрос, сможет ли искусственная сила тяжести обеспечить условия для нормального постэмбрионального развития новорожденных организмов в невесомости, получено не было. Однако несмотря на это, данный эксперимент имеет большое значение для изучения онтогенеза птиц в агравитационной среде. В эксперименте еще раз была показана возможность выведения птенцов в невесомости из яиц, доставленных с Земли. При этом для выведения птенцов были использованы перепелиные яйца, прошедшие более 2/3 времени инкубации на Земле, а эмбрионы находились на такой стадии развития, когда их чувствительность к неблагоприятным факторам среды очень высока. Несмотря на это, выводимость птенцов оказалась значительно больше прогнозируемой (табл. 2.1). Средняя выводимость птенцов составила 64,3%. Птенцы вылуплялись на 17,5–18-е сутки, что соответствует норме развития. Выведение птенцов было активным. Из таблицы видно,

Таблица 1

**Результаты инкубирования яиц японского перепела на борту ОК "Мир"
в эксперименте "Перепел-СК6"**

Срок развития эмбрионов в перепелиных яйцах	Заложено яиц на инкубирование, шт.	Вывелось птенцов		Количество погибших эмбрионов	Яйца с проклюнутой скорлупой
		шт.	%		
14-суточный	27	21	77,8	6	0
13-суточный	29	15	51,7	6	8

что выводимость птенцов из яиц первого срока составила 77,8%, а из яиц второго срока – 51,7%.

При проведении исследований поведения птенцов, доставленных с орбиты на Землю, были обнаружены существенные изменения: отказ от пищи и воды, неуверенность в движениях. Обращала на себя внимание ненормальная поза птенца в покое: голова опущена на уровень лап и наклонена влево. При движении у птенцов наблюдалась крайняя дискоординация: ходьба шаткая с опрокидыванием тела вперед или назад, падение на правый или левый бок. Крылья птенцов не были прижаты, как обычно, к туловищу, а несколько отставлены в сторону. При хождении фаланги пальцев птенцов были согнуты. При подбрасывании вверх птенец приземлялся на заднюю часть тела, а не на лапы. К сожалению, наблюдения за поведением птенцов в условиях земной гравитации составили только 1,5 ч, так как они стали погибать.

При визуальном осмотре птенцов из полетной группы не было обнаружено каких-либо отклонений в их развитии. Однако следует сказать, что по внешнему виду эти птенцы отличались от птенцов из контрольной группы: оперение эмбриональное (пух), на лапах следы мекония, мышцы тела вялые, особенно шейные. Биометрические исследования птенцов из полетной группы показали, что птенцы сильно истощены. Вес птенца в полетной группе в среднем составил $5,8 \pm 0,7$ г, тогда как масса тела контрольного птенца в среднем равнялась $8,2 \pm 0,1$ г. Это было обусловлено тем, что вылупившиеся в невесомости птенцы не могли самостоятельно кормиться и для питания полетные птенцы использовали только оставшиеся запасы желтка, втянутого в брюшную полость перед вылуплением из яйца.

Исследование состояния опорно-двигательного аппарата у птенцов, развивавшихся в отсутствии функциональной гравитационной нагрузки с момента рождения, представляет большой интерес. Были проведены морфологические исследования ниж-

них конечностей у 14- и 16-суточных эмбрионов, а также у птенцов, проживших в невесомости 4–5 суток. В наземных условиях скелет конечностей эмбрионов к 14-м суткам полностью сформирован и анатомически соответствует строению скелета взрослой птицы. В этот период происходит кальцификация хрящевого стержня путем откладывания извести в межклеточное пространство и внутри костного мозга на внутреннюю поверхность перихондральной кости. Окостенение из центральной точки диафиза распространяется к эпифизам, которые остаются хрящевыми и обеспечивают рост кости в длину. К 16-м суткам развития этот процесс замедляется. С момента вылупления скелет получает новый стимул роста, когда в метафизах длинных костей начинается использование запасов пролиферирующих хондроцитов в связи с переходом их в состояние набухания и последующей резорпции. У птенцов, вылупившихся в условиях невесомости и проживших в безопорной среде от 4 до 5 сут, наблюдалось отставание в росте отделов скелета конечностей по сравнению с птенцами лабораторного контроля. Длина бедренной кости у птенцов из полетной группы была на 24,1% меньше, чем у птенцов из лабораторного контроля. Длина участков окостенения скелета у птенцов из полетной группы была также меньше по сравнению с длиной участков окостенения у птенцов из контрольной группы (например, в бедренной кости на 23,1%). Однако процент окостенения костей нижних конечностей (отношение участка окостенения к общей длине кости, выраженная в процентах) у птенцов из полетной группы не отличается от такого у птенцов из лабораторного контроля (полетной группе – $87,23 \pm 0,98\%$, в контрольной группе – $89,81 \pm 1,74\%$). Возможно, это связано с тем, что $\frac{2}{3}$ времени развития эмбрионов прошла в условиях гравитации на Земле, что и сказалось на процессе остеогенеза скелета птенцов.

В экспериментах, проведенных на борту ОК “Мир” ранее, были получены данные, указывавшие на то, что процесс окостенения у 14- и 16-суточных эмбрионов, а также у птенцов, после вылупления находившихся в условиях невесомости от 2 до 3 сут, отставал от контроля. Электрограмма мышечной ткани (на примере *m. gastrocnemius*) нижних конечностей у птенцов, проживших в невесомости от 4 до 5 сут, показала наличие волокон на стадии дифференцировки: Z-линии имели зигзагообразные форму или были удвоенные, слабовыраженные полосы I и A, митохондрии местами были увеличены в размере и образовывали цепочки, по длине превышающие один саркомер, внутренние мембраны митохондрий уплотнены и вакулизованы, в саркотубулярном аппарате встречались расширенные трубочки, в цитоплазме миофибрилл имелись многочисленные жировые вакуоли.

Несмотря на столь короткий отрезок постэмбрионального периода развития птенцов, полученные результаты показывают выраженное начало дегенеративных изменений в антигравитационной мускулатуре, что укладывается в известное положение патофизиологии “атрофия от бездействия”, которое было выведено эмпирически из условий ограничения или прекращения функции ранее функционировавшего органа.

Данный эксперимент показал, что воздействие невесомости на животные организмы связано не только с влиянием на поведенческие реакции организма, но и на его функциональное состояние. Поэтому для адаптации и выживания животных организмов в невесомости необходимо компенсировать изменения условий среды обитания (отсутствие вектора гравитации). Для животных профилактика негативного действия невесомости на физиологическом уровне является сложной проблемой. Первая попытка ответить на этот вопрос оказалась не удачной, требуется продолжение исследований. Исследования искусственной силы тяжести в качестве средства профилактики важно не только для решения вопросов, связанных с созданием систем жизнеобеспечения космических экипажей (гетеротрофного звена), но и в целом для пилотируемой космонавтики, так как позволяет глубже понять пределы и возможности адаптации животных организмов в невесомости.

2.9. Рост и развитие пшеницы в ряду поколений в условиях полета на борту ОК “Мир”

В течение последних 30 лет учеными различных стран проведено большое количество исследований по разработке биологических систем жизнеобеспечения (БСЖО) человека вне земной биосферы. Такие системы могут иметь различную биоценотическую структуру в зависимости от назначения, продолжительности функционирования, габаритов, энергообеспеченности. В случае длительного существования человека за границами биосферы (межпланетные космические полеты, внеземные поселения) одной из основных функций БСЖО будет воспроизводство пищи растительного и животного происхождения. В состав звена высших растений таких систем должны входить зерновые культуры (пшеница, рис) для обеспечения рациона человека углеводами и растительными белками. Необходимым этапом разработки звена высших растений БСЖО является исследование продуктивности зерновых культур при культивировании в гермообитаемых объектах, в том числе и в условиях космического полета.

Ряд полетных экспериментов по выращиванию пшеницы в различных вегетационных устройствах был проведен до начала работ по культивированию пшеницы “от семени до семени” в оранжерее “Свет” на борту ОК “Мир”. Так, в 1988 г. проведено исследование роста и развития пшеницы сорта Эритроспермум-841 в установке “Светоблок-М” при 19-суточном выращивании на борту ОК “Мир”. Отмечено снижение массы опытных растений и площади листовой поверхности в 2–2,5 раза по сравнению с контролем. Причины угнетения роста растений не установлены, так как в данной установке не были предусмотрены контроль за параметрами среды и активная вентиляция. В 1991 г. в этой же установке осуществлено культивирование суперкарликовой пшеницы в условиях космического полета в течение 157 сут. Полученное растение имело один побег на стадии трубкования. Поскольку освещенность в приборе “Светоблок-М” является низкой для семенного воспроизводства пшеницы и в контрольном эксперименте семена получены не были, опытное растение доращивали на Земле в условиях более высокой интенсивности освещения. Однако сформированный в условиях космического полета колос оказался стерильным.

В 1993 г. был проведен эксперимент по выращиванию суперкарликовой пшеницы из пророщенных на Земле семян в установке PGU на борту “Спейс Шаттл”. Растения выращивались в течение 10 сут. По результатам послеполетных измерений было показано, что условия космического полета вызывали снижение уровня фотосинтеза у растений, что привело к снижению массы полетных растений на 25% по сравнению с контролем.

В рамках научной программы СТС-63 в 1995 г. был осуществлен эксперимент по культивированию растений в установке “Астрокультура”. Растения *Brassica rapa* и суперкарликовой пшеницы (в возрасте 4 дней) были высажены в единую камеру и культивировались в условиях космического полета в течение 8 сут. Показано, что корнеобитаемая среда при проведении полетного эксперимента отличалась повышенной гипоксией. В условиях космического полета активность алкогольдегидрогеназы в тканях корней повышалась на 248–304% в корнях пшеницы и на 334–579% в корнях брассики по сравнению с контролем.

Первый эксперимент по культивированию суперкарликовой пшеницы в оранжерее “Свет” был проведен в 1995 г. в рамках научной программы “Мир-Шаттл”. В полетном эксперименте длительностью 90 сут под влиянием комплекса факторов внешней среды на фоне низкой суммарной облученности посева (из-за неисправности оборудования) цикл нормального онтогенетического развития растений был нарушен. Растения имели меньшие

размеры, формировали 12–16 листьев с узкой листовой пластиной против 7 в наземном предполетном контроле и не образовали колосьев. Послеполетный эксперимент показал, что при моделировании основных параметров среды, зафиксированных во время космического полета, были получены растения, отличающиеся по своим характеристикам от полетных. В частности, растения формировали колосья, но они были стерильными. Таким образом, в полете растения пшеницы подвергались стрессовому воздействию не только светового фактора, но и иных факторов.

В 1996–1997 гг. был проведен эксперимент по культивированию суперкарликовой пшеницы “Оранжерея-2” в рамках научной программы “Мир–НАСА”. Длительность полного цикла вегетации суперкарликовой пшеницы и его отдельных стадий в полетном эксперименте была такой же, как и в наземных контрольных экспериментах. При одинаковой массе сухого вещества одного растения число побегов с колосьями было в 2,7 раза выше в полетном варианте по сравнению с предполетным контролем. Отмечено уменьшение высоты побегов у опытных растений в два раза. Во всех сформировавшихся в условиях космического полета отсутствовали семена. Строение колоса имело существенные различия по сравнению с данными предварительных наземных контролей: масса колосьев была в два раза ниже, отмечено уменьшение длины соцветия и остей кроющих цветочных чешуй, снижение числа колосков в колосе, увеличение среднего числа цветков в колосках.

Экспериментально показано, что основные существенные изменения продукционных и морфометрических характеристик полетных растений суперкарликовой пшеницы были вызваны в большей степени не специфическими факторами космического полета, а фитотоксическим воздействием этилена, содержание которого на момент проведения эксперимента в атмосфере ОК “Мир” составляло 0,3–1,8 мг/м³. Повышенное содержание этилена в атмосфере космической станции являлось причиной аномального формирования мужской генеративной сферы пшеницы.

С учетом накопленного опыта в рамках российской научной программы в 1998–1999 гг. был подготовлен и проведен полетный эксперимент “Оранжерея-4” по исследованию роста, развития и репродукции пшеницы при выращивании в оранжерее “Свет” на борту ОК “Мир”.

В наземных экспериментах установлено, что среди карликовых сортов пшеницы имеются сорта, пригодные для культивирования в космической оранжерее “Свет” и отличающиеся частичной устойчивостью репродуктивной сферы к воздействию этиле-

Таблица 2.2
Основные характеристики пшеницы сорта "VIIIЮ-Апогей"
при культивировании в оранжерее "Свет"
в полетном и наземных экспериментах

Показатель	Эксперимент		
	полетный	наземный (без этилена)	наземный (этилен 1,1 мг/м ³)
Длительность полного цикла вегетации, сут	70–82	80–83	75–80
Масса сухого вещества 1 растения, г	3,64	3,05±0,86	1,70±0,28
Число побегов с колосьями на 1 растение, шт.	2,4	2,8±0,4	3,0±1,0
Высота растения, см	35,3±3,1	44,8±2,8	27,7±1,1
Длина соломины, см	26,2±2,0	36,2±3,1	18,9±4,2
Длина колоса, см	8,3±1,8	6,5±0,7	5,6±1,0
Число колосков в зрелом колосе, шт.	16,0±2,0	16,0±2,0	11,0±2,5
Число цветков в колоске, шт.	4,0±1,0	4,0±1,0	4,0±1,0
Количество зерен с растения, шт.	42,3	68,3	13,1
Масса зерновки, мг	18,1±6,1	32,0±9,1	29,9±5,0

на в воздухе в концентрации 1,1 мг/м³. Из них для проведения полетного эксперимента был выбран сорт "VIIIЮ-Апогей", который был выведен специально для выращивания в оранжерейных установках различных биорегенеративных систем жизнеобеспечения.

В табл. 2.2 приведены основные характеристики растений пшеницы сорта Апогей, выращенных в оранжерее "Свет" в условиях космического полета при проведении эксперимента "Оранжерей-4", в сравнении с данными наземных исследований. Обращает на себя внимание тот факт, что длительность полного цикла вегетации растений в условиях космического полета, как и в случае культивирования в оранжерее "Свет" на борту ОК "Мир" суперкарликовой пшеницы, существенным образом не менялась.

При сопоставлении морфометрических и продукционных характеристик пшеницы сорта "Апогей" видно, что некоторые величины этих показателей в полетном эксперименте занимают промежуточное положение по сравнению с данными наземных исследований (табл. 2.2). Основным результатом эксперимента является получение 508 семян с 12 растений, что на 38% ниже показателя при лабораторном культивировании, но в то же время на 69% выше, чем в варианте выращивания в атмосфере с повышенным содержанием этилена (1,1 мг/м³). Масса полученных в полетном эксперименте семян ниже, чем в наземных исследова-

ниях на обоих этапах. Определить количественно, какой из факторов космического полета вызвал эти изменения, не представляется возможным, так как содержание этилена в атмосфере ОК “Мир” во время проведения эксперимента по культивированию пшеницы сорта Апогей не измерялось. По-видимому, его концентрация была ниже величины 1 мг/м^3 , ранее отмечаемой в полетных условиях и поддерживаемой нами в газовой среде вегетационной камеры при исследовании зависимости продукционных характеристик данного сорта от влияния этилена в наземных условиях. Снижение концентрации этилена в атмосфере станции могло быть обеспечено за счет функционирования каталитического фильтра ПКФ-Т, впервые установленного на борту ОК “Мир” в ноябре 1998 г. и работавшего в высокотемпературном режиме. Результаты данного космического эксперимента впервые показали возможность получения зернового урожая пшеницы при культивировании растений в течение полного цикла вегетации в условиях космического полета. Это подтверждает ранее сделанный вывод о том, что невесомость не оказывает непосредственного влияния на элементарные генетически детерминированные биологические процессы, в том числе рост, развитие и размножение растений.

Исследования роста и развития растений в ряду поколений в условиях космического полета были проведены в 1999 г. в рамках российского эксперимента “Оранжерея-5”. В оранжерею “Свет” на борту ОК “Мир” были высеяны земные и “космические” семена пшеницы Апогей, полученные в эксперименте “Оранжерея-4”. Полной биологической зрелости в возрасте около 80–90 сут достигли 20 растений из земных семян и 1 растение из космических семян.

В наземных и полетных условиях при повторном выращивании в использованном ранее вегетационном сосуде растения пшеницы из земных семян имели меньшие биометрические показатели по сравнению с первой вегетацией (табл. 2.3). Так, снижение массы сухого вещества растения составило во второй вегетации около 40% и в полетном, и в контрольных экспериментах. Такой показатель, как количество зерен с одного растения, оказался более чувствительным к условиям повторного культивирования без смены вегетационного сосуда: в полетных экспериментах снижение составило около 50%, а в наземных экспериментах около 60%. Сравнительный анализ растений пшеницы первого и второго космических поколений, выращенных при проведении полетного эксперимента “Оранжерея-5” (табл. 2.4) показал, что в целом единственное растение второго космического поколения не имело морфологических отличий от растений первого косми-

Таблица 2.3

Основные характеристики пшеницы сорта "VIIIЮ-Апогей" из земных семян при культивировании в оранжерее "Свет" в двух циклах вегетаций

Показатель	Вегетация			
	первая (эксперимент "Оранжерея-4")		вторая (эксперимент "Оранжерея-5")	
	полет	контроль	полет	контроль
Масса сухого вещества 1 растения, г	3,64	3,05±0,86	2,29	1,8±0,6
Высота растения, см	35,3±3,1	44,8±2,8	33,9±5,9	31,8±6,2
Длина колоса, см	8,3±1,8	6,5±0,7	6,8±0,4	5,2±1,1
Число колосков в зрелом колосе, шт.	16,0±2,0	16,0±2,0	15,0±2,0	11,0±3,0
Количество зерен с растения, шт.	42,3	68,3	20,7	15,9

Таблица 2.4

Сравнение характеристик растений пшеницы сорта "VIIIЮ-Апогей" из земных и космических семян при культивировании в оранжерее "Свет" в полетном эксперименте "Оранжерея-5"

Тип семян	Масса сухого вещества растения, г	Число побегов с колосьями на 1 раст., шт.	Высота растения, см	Длина колоса, см	Количество зерен с растения, шт.
Земные (первое космическое поколение)	2,29	2,1	33,9±5,9	6,8±0,4	20,7
Космические (второе космическое поколение)	1,21	2,0	27,0	5,0	5 + ?

ческого поколения и от растений в наземных контрольных экспериментах. Размерные и массовые характеристики растения второго космического поколения были меньше, чем у растений первого космического поколения. Со слов космонавта С. Авдеева озерненность растения второго космического поколения изначально была несколько выше, но впоследствии при предуборочном высушивании растений в космической оранжерее "Свет" часть зерен из его колосьев была утеряна.

Таким образом, в полетных экспериментах с пшеницей Апогей, проведенных в оранжерее "Свет" на борту ОК "Мир" в период 1998–1999 гг., получены первые положительные результаты исследований роста и развития растений в ряду поколений в усло-

виях космического полета. Получение нормально развитого растения, эмбриологическая и постэмбриологическая стадии развития которого прошли в условиях космического полета, безусловно, является завершением определенного этапа в развитии космической биологии и экологии растений. Можно считать доказанным, что при выращивании растений в условиях микрогравитации возможно многократное прохождение циклов онтогенетического развития растений. Следующим этапом полетных исследований с растениями будет, по-видимому, изучение процессов микроэволюции и отдаленных генетических последствий длительного культивирования растений в космосе. При проведении таких исследований потребуются уделить более глубокое внимание оценке влияния на растения таких факторов окружающей среды, как космическое излучение, состав атмосферы орбитальной станции, возможное переувлажнение корнеобитаемой среды растений из-за влияния микрогравитации на процессы распределения воды в субстратах оранжерей.

РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПО НАПРАВЛЕНИЮ ФКИ “ФИЗИКА КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ И СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ”

3.1. Проект “Интербол”

По спутниковым данным проекта “Интербол” проведены исследования важного явления, как термализацию потока горячей плазмы в распределенной области над полярными каспами (“застойная область”) – с “дальнодействующими” вихревыми дорожками и локальными разрывами – солитонами. Просачивание плазмы сквозь структурированную границу и вторичное пересоединение флюктуирующих магнитных полей в высокоширотном турбулентном пограничном слое объясняют основной приток плазмы солнечного ветра в магнитосферную ловушку. Термализация ионов в отличие от ударной волны сопровождается генерацией каскадов когерентных альвеновских волновых пакетов с масштабами от ионного гирорадиуса до радиуса кривизны магнитного поля, а также “диамагнитных полостей” (с масштабами от нескольких сотен до нескольких тысяч километров) с размагниченной и нагретой плазмой внутри. В отличие от колмогоровской турбулентности эта “кипящая” плазма характеризуется степенными частотными спектрами с двумя наклонами (1,2 и 2,4). Обнаружена самоорганизация флуктуаций в пограничном слое – синхронизация трех-волновых распадов на выделенных масштабах.

Несмотря на близкие масштабы и спектральные характеристики, топологии “застойных зон” над летним и зимним каспами отличны друг от друга. Летом (при положительном угле наклона геомагнитного диполя, т.е. к Солнцу) горловина каспа открыта для прямого взаимодействия потока плазмы переходной области с магнитопаузой, имеющей форму выступа над каспом (рис. 3.1). Причем и “застойная” зона, и турбулентный погранслой на ее внутренней границе располагаются большей частью вне магнитосферы. Зимой (отрицательные углы наклона диполя) гладкая магнитопауза, расположенная почти вдвое дальше от Земли, не является жесткой преградой для развитой турбулентности, включая “диамагнитные полости”. Магнитопауза становится толще и

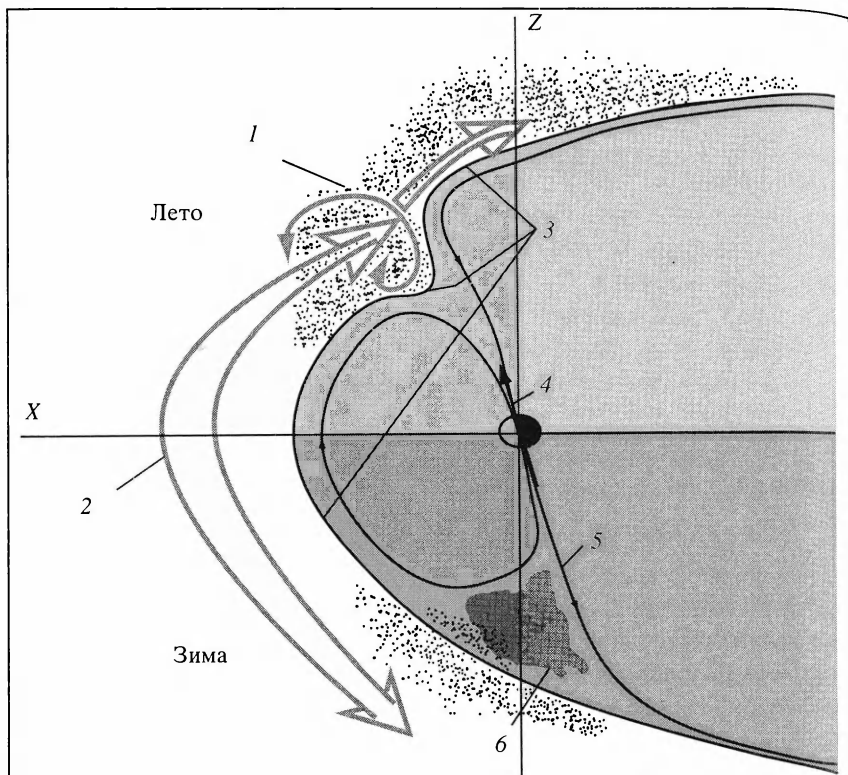


Рис. 3.1. Границы магнитосферы в плоскости полуденного меридиана (в геоцентрической солнечно-магнитосферной системе координат)

Лето в северном полушарии (верхняя полуплоскость) – положительный угол наклона геомагнитного диполя – к Солнцу; зима в южном полушарии (нижняя полуплоскость) – отрицательный наклон диполя; 1 – турбулентный пограничный слой; 2 – обтекающий поток; 3 – магнитопауза; 4 – магнитный диполь; 5 – магнитное поле; 6 – плазменные шары

совпадает с границей обтекающего потока. Прямо под ней регулярно встречаются “плазменные шары” – полости с почти размагниченной нагретой плазмой из переходной области размером в несколько радиусов Земли. Предположительно, микропересоединение флюктуирующих полей и просачивание плазмы сквозь структурированную магнитопаузу наиболее эффективно для наполнения “плазменных шаров”. Глобальное пересоединение как основной источник плазмы в них не согласуется с имеющимися данными. Открытие “плазменных шаров” (“plasma balls”) вполне соответствует самому названию проекта “Интербол” (Interball), которое напрямую связано с “огненными шарами” Фэрфилда (‘Fireballs’).

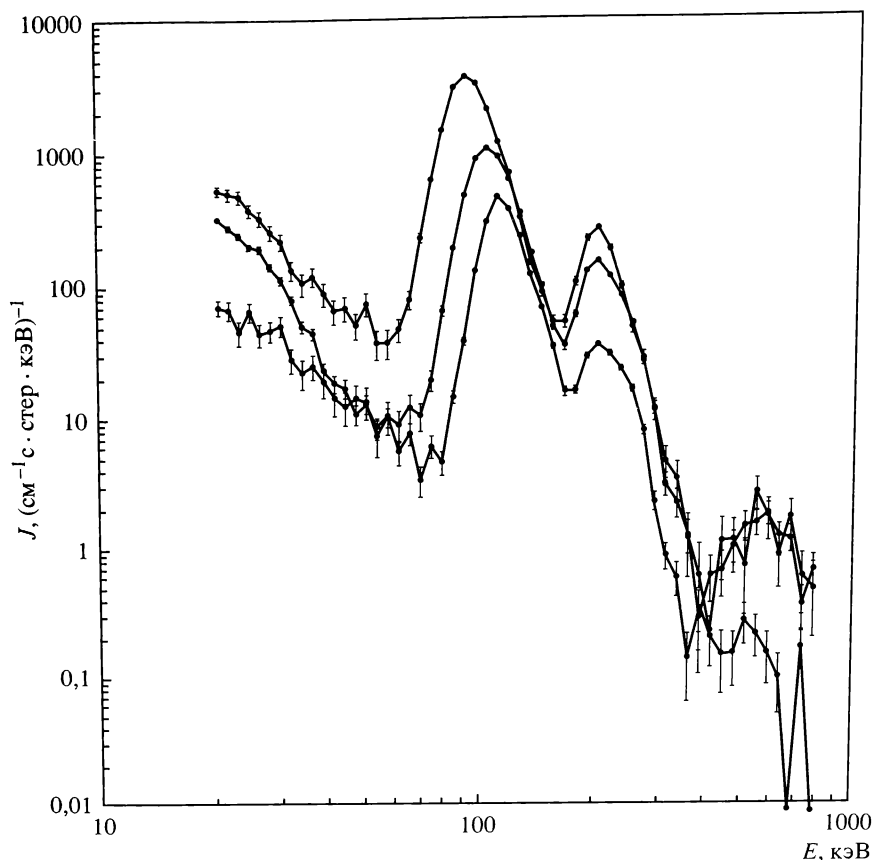


Рис. 3.2. Примеры спектров ПМИ около ударной волны

Изучение тонких временных и спектральных свойств энергичных частиц. В 2000–2002 гг. основное внимание уделялось изучению явлений почти моноэнергетических ионов (ПМИ) и тонких дисперсионных структур в спектрах энергичных ионов и электронов, открытых благодаря рекордно высокому энергетическому разрешению эксперимента ДОК-2 на хвостовом и авроральном зондах проекта “Интербол”. Было показано, что пучки ПМИ могут генерироваться вблизи токовых слоев в различных частях магнитосферы за счет ускорения во всплесках сильного, потенциального электрического поля, возникающего при разрыве волокон этих слоев. В частности, это происходит во множественных актах спонтанного пересоединения магнитного поля в плазменном слое хвоста и при столкновениях токовых слоев солнечного ветра с околоземной ударной волной. На рис. 3.2 приведены примеры таких спектров ПМИ в окрестности ударной волны.

Высокое энергетическое и временное разрешение ДОК-2 позволило обнаружить в авроральных областях магнитосферы тонкие дисперсионные структуры в спектрах ионов и электронов и выяснить их природу. Эти структуры представляют собой узкие линии (ПШПМ до 16%) с энергией, монотонно уменьшающейся со временем. В спектрах ионов в отличие от спектров электронов обычно наблюдаются пары линий с отношением энергий 1:2. Известно, что дисперсионные структуры возникают в результате градиентного дрейфа частиц, импульсно инжектированных на ночной стороне магнитосферы. Ионы и электроны, дрейфуя вокруг Земли в противоположные стороны, встречаются со спутником в некоторый момент времени. В ряде случаев наблюдались частицы, совершившие несколько полных оборотов. Энергия регистрируемых частиц зависит от длины пути и скорости дрейфа, которая пропорциональна энергии на единицу заряда частицы. Пары пиков в спектрах ионов соответствуют протонам и альфа частицам. Анализ дисперсионных структур позволяет точно определить момент ускорения частиц, оценить по ширине пиков длительность процесса ускорения и получить спектры ускоренных протонов, альфа частиц и электронов в конкретном событии (рис. 3.3).

В некоторых событиях изменение энергии пиков со временем представляло собой периодические синусоидальные колебания, наложенные на нормальную, гладкую гиперболу. Периоды колебаний были 3–7 мин. Как выяснилось, временные вариации энергии пика в таких событиях полностью коррелируют с вариациями локального магнитного поля. Колебания магнитного поля были поперечными, преимущественно в долготном направлении (восток–запад). Соотношение фаз таково, что энергия пика возрастает, когда вариация магнитного поля направлена к востоку. Дано простое объяснение этому явлению в рамках модели градиентного дрейфа ионов. Анализ таких, “волнистых” дисперсионных структур позволил получить оценку амплитуды колебаний силовых линий по долготе.

Исследование сильных и быстрых флюктуаций солнечного ветра. Российскими учеными в 2000–2002 гг. впервые было обращено особое внимание на события с очень резкими (короче 10 мин) и большими по амплитуде возрастаниями/спадами потока ионов (плотности) солнечного ветра, в большинстве случаев не сопровождающиеся изменением других его параметров (скорости, температуры, величины и направления магнитного поля). Рассмотрена “встречаемость” таких событий в зависимости от их амплитуды, их статистические свойства, связь с явлениями в солнечной короне и “геоэффективность” таких событий.

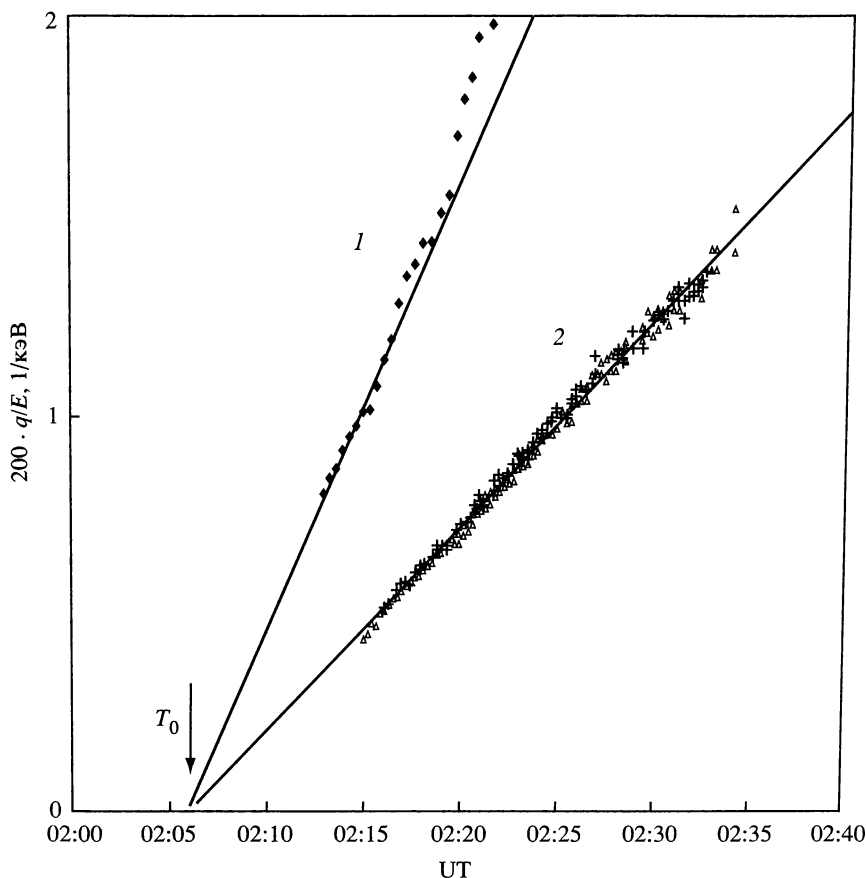


Рис. 3.3. Пример определения момента инжекции частиц $T_0 = 2 \text{ ч } 06 \text{ мин } 04 \text{ с}$ для дисперсионных структур энергичных ионов и электронов для события 28.06.1997 в авроральной области

1 – электроны; 2 – ионы

Был выполнен детальный анализ нескольких десятков случаев одновременного наблюдения на спутниках “Интербол-1” и “Магистр-4” больших и быстрых вариаций потока ионов солнечного ветра в форшоке перед околоземной ударной волной. Особенностью этих наблюдений было сравнительно малое расстояние между спутниками (1–5000 км).

Сопоставление наблюдений в форшоке при различном расположении спутника и его субспутника позволило впервые по плазменным данным определить корреляционную длину структур в плоскости, перпендикулярной направлению движения солнечного ветра. Эта длина составляет по нашим данным приблизительно 13000 км (т.е. около двух радиусов Земли).

Рассмотрение измерений потока ионов с высоким временным разрешением позволило, также впервые, показать, что вариации плазмы в форшоке представляют собой быстрые магнито-звуковые волны, бегущие вверх по потоку от ударной волны со скоростью около 80 км/с, но сносимые вниз солнечным ветром с гораздо большей скоростью (около 400 км/с). Осуществлена также оценка скорости мелкомасштабных квазигармонических структур в форшоке по наблюдениям на двух спутниках.

Был проведен событийный и статистический анализ абсолютных и относительных низкочастотных и высокочастотных вариаций в магнитослое потока (плотности) плазмы и модуля магнитного поля как для утреннего, так и для вечернего фланга магнитосферы по данным спутника “Интербол-1”.

Изучена зависимость амплитуды вариаций поля и плазмы от положения спутника относительно границ магнитослоя, т.е. радиальные профили вариаций. При этом получено, что амплитуда высокочастотных вариаций плотности плазмы примерно постоянна во всем магнитослое, а амплитуда вариаций поля падает от магнитопаузы к ударной волне.

Рассмотрена также зависимость вариаций плазмы и поля от внешних условий – в первую очередь от направления межпланетного магнитного поля. Впервые было обнаружено, что амплитуда вариаций и плазмы и магнитного поля в магнитослое значительно возрастает, если поток солнечного ветра входит в магнитослой пересекая квази-параллельную околоземную ударную волну.

Изучение механизмов формирования ионосферного джета по наземным и спутниковым данным. Впервые экспериментально подтвержден физический механизм формирования поляризационного джета (“струи”) за счет инжекции энергичных частиц при вспышке суббури. Ряд различных физических механизмов был предложен для формирования поляризационного джета (PJ) – узкой полосы направленного к полюсу электрического поля вдоль плазмопаузы, вызывающего сверхзвуковой дрейф и нагрев плазмы, неоднородности концентрации, слабую субавроральную красную дугу. Зависимость времени появления поляризационного джета в районе ст. Якутск от времени начала суббури с $AE > 500$ нТ показана на рис. 3.4 для случаев, когда длительность временной задержки между рассматриваемыми событиями не превышает 3 ч.

Штриховая линия на рис. 3.4 соответствует отсутствию задержки. Анализ многолетних наземных измерений PJ на широтной цепочке ионосферных станций в Якутии ($3 < L < 5$; $MLT = UT + 9h$) позволил выявить ряд случаев одновременных измерений PJ с наземных станций и энергичных частиц со спутников AMPTE/CSE и “Интербол-2”. Такие одновременные измерения очень редки, так

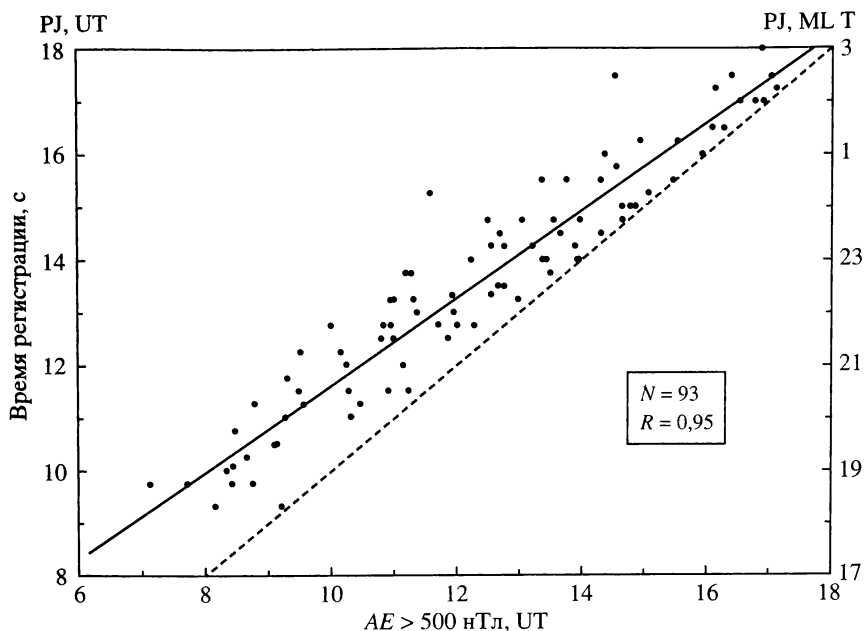


Рис. 3.4. Время начала наблюдения поляризационного джета (PJ) в Якутске в зависимости от времени начала суббури с $AE \geq 500$ нТл для случаев со временем задержки менее трех часов. Штриховая линия обозначает отсутствие задержки

как требуют совпадения прохождения спутника над станцией, появления здесь PJ, и, конечно, проведения соответствующих измерений как на спутнике, так и с Земли. В результате сопоставления показано, что по крайней мере для этих случаев сильных суббурь, явление PJ каждый раз сопровождалось мощной инжекцией ионов с энергиями до ~ 50 кэВ и интенсивностью $\sim 106 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с} \cdot \text{стер} \cdot \text{кэВ}$. При этом вблизи области инжекции в околополуденном секторе местного времени наблюдались ионы без дисперсии в широком диапазоне энергий, а в вечернем секторе – с дисперсией в форме “носовых структур” (nose events). Поляризационный джет наблюдался около экваториальной границы проникновения энергичных ионов в магнитосферу.

Скорость градиентного дрейфа ионов с энергией ~ 20 кэВ, образующих “носовую структуру”, близка к скорости смещения к западу переднего фронта формирования PJ по измерениям ионизондов на различных долготах. Таким образом, впервые был экспериментально подтвержден физический механизм формирования поляризационного джета за счет инжекции энергичных частиц при сильной вспышке суббури. Определено время формиро-

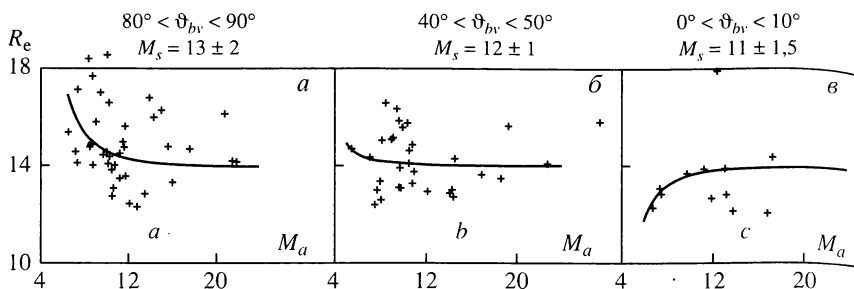


Рис. 3.5. Эффект приближения ударной волны

а и б – при уменьшении альвеновского и звукового чисел Маха; в – при параллельности направления межпланетного магнитного поля скорости ветра

вания поляризационного джета ~5–10 мин. Следовательно, это есть проявление вспышки суббури и инъекции энергичных частиц на субавроральных широтах, а не фазы затухания суббури, как считалось ранее. На этой основе построена количественная модель поляризационного джета в магнитосфере и в ионосфере на его квазистационарной стадии, которая согласуется со всеми его средними характеристиками.

Разработана полуэмпирическая теория формирования поляризационного джета. Показано, что само наличие джета существенно искажает траектории частиц внешнего радиационного пояса, что может приводить к генерации электрического поля, в свою очередь, самосогласованно поддерживающего ток в джете.

Определение положения ударной волны. Проанализировано ~450 пересечений околоземной ударной волны космическим аппаратом “Wind” и ~850 пересечений космическим аппаратом “Магистрон-4” (спутник “Интербол-1”). Экспериментально обнаружены: 1) эффект приближения околоземной ударной волны к планете при уменьшении Альвеновского числа Маха. Этот эффект реализуется только в случаях, когда направление межпланетного магнитного поля практически параллельно скорости солнечного ветра (правая панель). В остальных случаях околоземная ударная волна удаляется от планеты при уменьшении альвеновского (и звукового) чисел Маха в соответствии с общепринятыми представлениями (левая и средняя панели) (рис. 3.5); 2) асимметрия положения околоземной ударной волны в плоскости терминатора. Исследована зависимость этого эффекта от параметров солнечного ветра. Показано, что сечение околоземной ударной волны плоскостью терминатора асимметрично только при значительном различии магнитозвуковой скорости и максимальной из альвеновской и звуковой скоростей в потоке солнечного ветра (α , e на рис. 3.6). Эффект пропадает при малом различии упомянутых выше скоростей

(*a, в, д*) и при течении солнечного ветра вдоль межпланетного магнитного поля (*a, б*). Если направление межпланетного магнитного поля квазиперпендикулярно скорости солнечного ветра, то отношение осей эллипсоида сечения околоземной ударной волны может достигать $\sim 1,1$ (*e*). Кроме того, при типичном для околоземно-

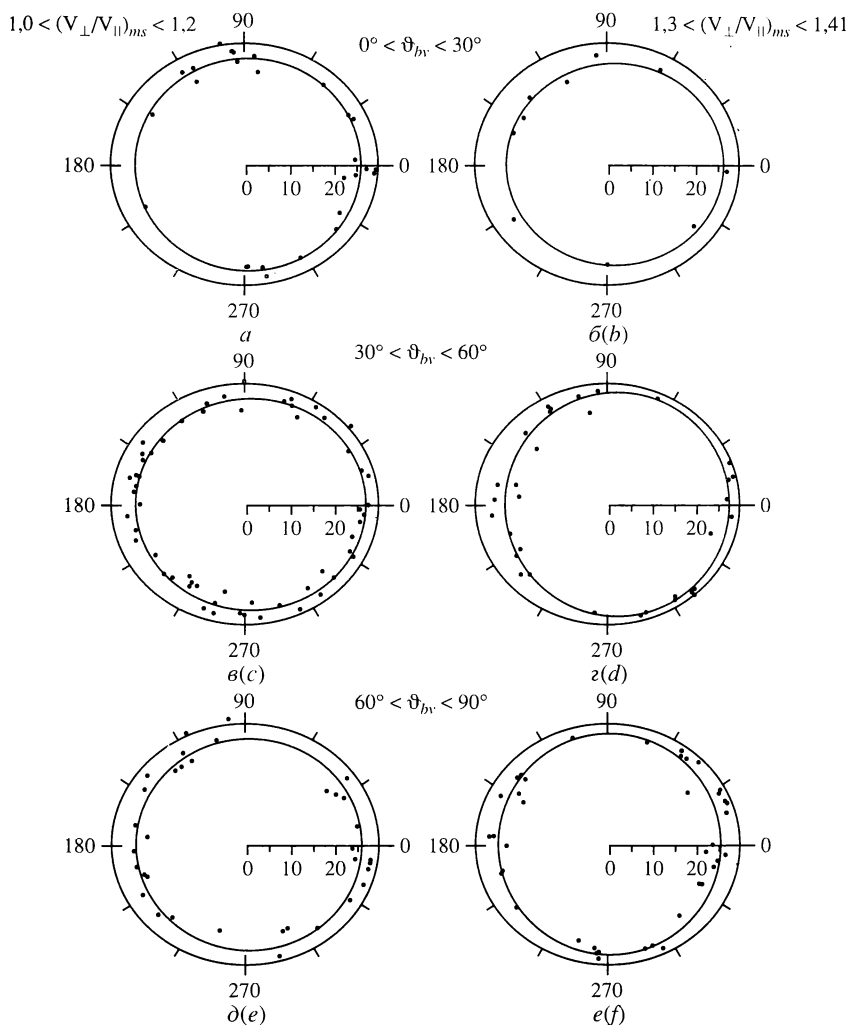


Рис. 3.6. Асимметрия положения околоземной ударной волны в плоскости терминатора

a и *б* – при течении солнечного ветра вдоль межпланетного магнитного поля; *в* и *д* – при малом различии магнитозвуковой скорости и максимальной из альвеиновской и звуковой скоростей в потоке солнечного ветра; *г* и *е* – при значительном различии упомянутых скоростей

го солнечного ветра угле ($\sim 45^\circ\text{C}$) между направлением солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, эллипсоид сечения околоземной ударной волны не только вытянут в направлении, перпендикулярном магнитному полю, но и на $\sim 1,5$ радиуса Земли сдвинут в “утреннем” направлении (z) (рис. 3.6).

Характеристики плазмы переходной области вблизи каспа на больших высотах. Газодинамическая модель и глобальное МГД моделирование предсказывают свойства плазмы переходной области вблизи магнитопаузы. Однако эти модели по разному включают в себя магнитное поле, и, как следствие, предсказанные свойства плазмы переходной области будут отличаться в тех областях, где магнитное поле переходной области играет существенную роль. Было проведено сравнение экспериментальных данных, полученных с помощью космических аппаратов “Интербол” и “Полар” в области высокоширотной магнитопаузы вблизи каспа на больших высотах в условиях сильного северного межпланетного магнитного поля, и параметрами плазмы, полученными из газодинамической модели и МГД-моделирования для этой области магнитосферы. В этих условиях магнитное поле играет существенную роль в процессах пересоединения и формирования “истощенного слоя” (depletion layer) в переходной области вблизи магнитопаузы. Показано, что наблюдаемые параметры плазмы, полученные на обоих аппаратах, отклоняются от модельных предсказуемым образом, однако в общем случае совпадение между экспериментом и МГД-моделированием лучше, по сравнению с параметрами, полученными из газодинамической модели. Этот факт объясняется тем, что газодинамическая модель не включает в себя процессы пересоединения, тогда как МГД включает.

Характеристики сильно структурированного низкоширотного пограничного слоя. Анализ функций распределения ионов в сильно структурированном низкоширотном пограничном слое (НШПС), выделенном ранее в качестве одного из двух основных типов НШПС, показал, что распространенное представление о том, что пограничный слой находится на открытых силовых линиях и что ввод плазмы из переходной области происходит вдоль открытой силовой трубки (ФТЕ, или явления переноса потока), не является единственно возможным. Наблюдения ионов в НШПС в проекте “Интербол” с прибором СКА-1 показывают, что по крайней мере, в ряде случаев, функции распределения ионов имеют два или три компонента, два из которых движутся в противоположных направлениях относительно направления магнитного поля. Эти наблюдения свидетельствуют в пользу многократного пересоединения, концепция которого до сих пор не получила достаточного экспериментального подтверждения (рис. 3.7, см. цветную вклейку).

Изучение тонкой структуры аврорального километрового излучения. Изучена тонкая структура Аврорального километрового излучения (АКИ), с использованием многокомпонентных измерений электромагнитного поля в частотной полосе 4 кГц–1 МГц (эксперимент “Polrad” на борту спутника “Интербол-2”). Особое внимание уделено измерениям около источника АКИ: при условиях, когда низкочастотная граница диапазона излучений опускалась достаточно низко, до локальной гирочастоты электронов. Анализ электрического поля показывает, что большая часть мощности АКИ заключается в быстро переменном сигнале во времени и по частоте (мерцающая компонента). Мощность постоянного составляющей (континуума) ниже, по крайней мере, на порядок величины. Для мощных пакетов АКИ относительный вклад мерцающей компоненты увеличивается. Пространственная структура зоны генерации имеет, по крайней мере, три характерных масштаба вдоль и поперек магнитного поля.

Наблюдения низкоамплитудных АКИ со слабой мерцающей компонентой в широкой частотной полосе и слабо зависящих от времени подтверждают классическую теорию генерации АКИ в крупномасштабной полости с низкой плотностью плазмы. Размер этой полости по высоте – несколько тысяч километров – и по широте/долготе определяется областью высыпания энергичных электронов в зоне полярных сияний. Выско – амплитудные АКИ с доминирующей мерцающей компонентой предполагают наличие мощных короткоживущих источников с малым масштабом. Такие источники образуются из-за сильной неоднородности потока ускоренных частиц. Другой возможный механизм генерации источников с малым масштабом – гипотеза самоподдерживающегося АКИ, предложенная Кальвертом. Согласно этой гипотезе, АКИ непосредственно формирует полости плотности электронов, которые, в свою очередь, усиливают излучение. В этом, случае амплитудная зависимость естественно объясняется мерцающей компонентой АКИ (рис. 3.8).

АКИ и солнечные радиовсплески III-го типа. Были изучены солнечные радиовсплески III-го типа и одновременное АКИ с помощью прибора “Polrad” на борту спутника “Интебол-2” в период с июля 1997 по октябрь 1998 г. Было найдено, что начало увеличения интенсивности АКИ лишь иногда совпадает с прибытием изучаемых радиовсплесков к Земле. Разница во времени их регистрации может достигать десяти минут.

На рис. 3.9 (см. цветную вклейку) показан пример начала АКИ и радиовсплеска III-го типа. Одновременные данные со спутника “Geotail” показывают, что АКИ наблюдалось постоян-

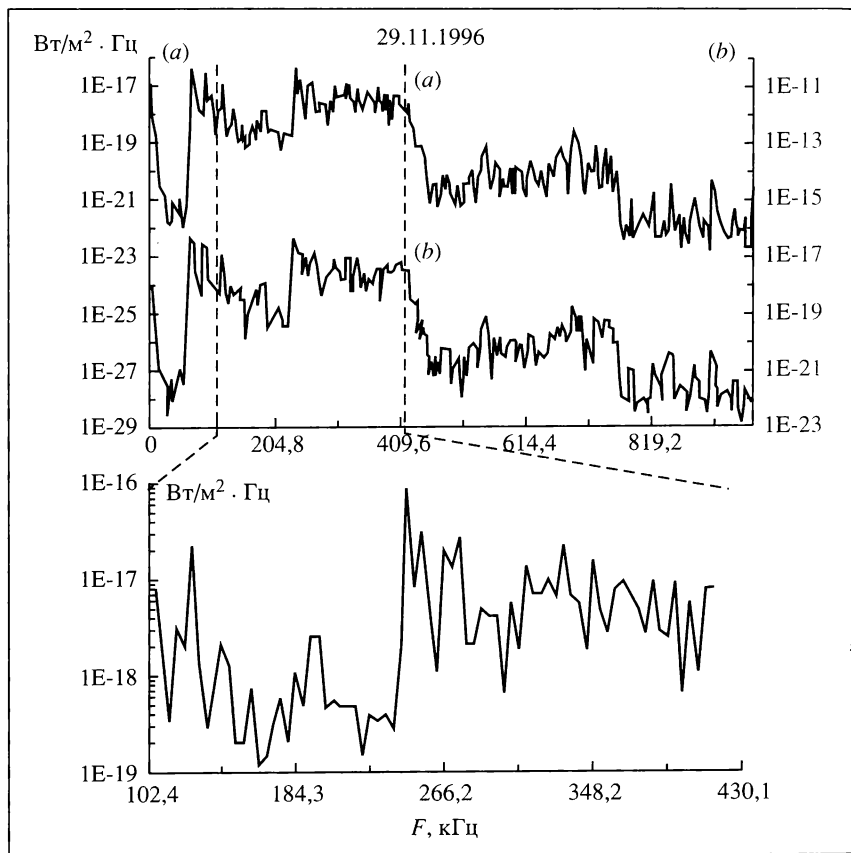


Рис. 3.8. Мерцающая компонента аврорального километрового излучения

но в течение относительно долгого времени даже перед прибытием этого радиовсплеска. На спутнике “Интербол-1”, расположенном близко к “Geotail”, сильные вариации и магнитного поля и плазмы начинают регистрироваться за 10 мин до прихода радиовсплеска III-го типа. Это должно приводить к высыпанию энергичных электронов в области полярного сияния и к генерации АКИ. Результаты наблюдений могут быть суммированы следующим образом: совпадение интенсификации АКИ и прибытия радиовсплесков III-го типа наблюдалось приблизительно в 10% случаев в период с октября 1996 г. по октябрь 1998 г. АКИ становятся более интенсивным и более широкополосными вскоре после регистрации радио всплеска III типа; совпадение радиовсплесков III-го типа и АКИ не имеют четкой причинно-следственной связи. Вариации параметров солнечного ветра, отмеченные в двух

случаях с дрейфом источника радио всплесков III-го типа, могут быть возможной причиной магнитосферных неустойчивостей, которые, в конце концов, вызывают генерацию АКИ. Параметры солнечного ветра, физические процессы в магнитном хвосте и на ударной волне и в переходной области должны также приниматься во внимание при изучении условий возникновения и интенсификации АКИ.

3.2. Проект “Коронас-Ф”

Международная программа “Коронас” (Комплексные Орбитальные Околоземные Наблюдения Активности Солнца), в рамках которой осуществлен запуск околоземной космической солнечной обсерватории “Коронас-Ф” предназначена для исследований Солнца на разных фазах 11-летнего солнечного цикла. Предыдущий спутник “Коронас-И” (запущен в 1994 г.) наблюдал Солнце вблизи минимума его активности. Спутник “Коронас-Ф” будет изучать солнечную активность вблизи максимума текущего 23-го цикла. Он выведен на орбиту 31 июля 2001 г. с следующими параметрами: наклонение – 82,49°, минимальное удаление от поверхности Земли – 500,9 км, максимальное удаление от поверхности Земли – 548,5 км, период обращения 94, 859 мин. Такая орбита обеспечивает повторяющиеся периоды непрерывных наблюдений за Солнцем длительностью приблизительно 20 суток, что особенно важно для задач гелиосейсмологии и патрулирования солнечных вспышек. Стабилизация ориентации космического аппарата оказалась в 3–5 раз лучше запланированной (несколько угловых секунд за секунду), что позволяет достичь высокого пространственного разрешения наблюдений Солнца.

Основными научными задачами проекта “Коронас-Ф” являются наблюдения глобальных колебаний Солнца и изучение сейсмологии его недр и внутреннего строения, комплексные исследования мощных динамических процессов активного Солнца (активные области, вспышки, выбросы плазмы) в широком диапазоне длин волн от оптики до гамма, изучение солнечных космических лучей, ускоренных активизацией Солнце, условий их выхода, распространения в межпланетном магнитном поле и воздействия на магнитосферу Земли.

Состав комплекса научной аппаратуры

В соответствии с задачами проекта научная аппаратура космического аппарата включает четыре основные группы приборов: прибор для регистрации глобальных колебаний Солнца,

Таблица 3.1
Приборное оснащение спутника Коронас-Ф

Прибор	Назначение	Организация-разработчик	Руководитель эксперимента
Гелиосейсмология			
Спектрофотометр "Дифос".	Гелиосейсмологический мониторинг	ИЗМИРАН	В.Н. Ораевский
Построение монохроматических изображений с высоким угловым разрешением			
Солнечный рентгеновский телескоп СРТ-К	Исследование пространственной структуры и динамики верхней атмосферы Солнца по узкополосным XUV-изображениям	ФИАН	И.И. Собельман И.А. Житник
Рентгеновский спектрогелиограф РЕС-К	Диагностика горячей плазмы солнечной атмосферы по изображениям в спектральных линиях X- и XUV диапазонов спектра	ФИАН	И.И. Собельман И.А. Житник
Спектрофотометр "Диогенесс"	Исследование рентгеновского излучения активных областей и вспышек на Солнце	ЦКИ ПАН*	Я. Сильвестр
Измерение потоков и поляризации электромагнитного излучения			
Рентгеновский спектрометр "Ресик"	Исследование рентгеновского излучения Солнца с высоким спектральным разрешением	ЦКИ ПАН*	Я. Сильвестр
Солнечный спектрополяриметр СПР-Н	Исследование поляризации рентгеновского излучения солнечных вспышек	ФИАН НИИЯФ	И.И. Собельман И.П. Тиндо С.И. Свертилов
Вспышечный спектрометр "Ирис"	Исследование вспышечной активности Солнца в рентгеновском диапазоне спектра	ФТИ	Г.Е. Кочаров
Гамма-спектрометр "Геликон"	Исследование вспышечной активности Солнца в рентгеновских и гамма-лучах	ФТИ	Е.П. Мазец
Рентгеновский спектрометр РПС	Исследование рентгеновского излучения солнечных вспышек и их предвестников	ИКИ РАН МИФИ	В.М. Панков Ю.Д. Котов
Амплитудно-временной спектрометр АВС	Исследование рентгеновского и гамма-излучения солнечных вспышек	МИФИ	Ю.Д. Котов
Солнечный ультрафиолетовый радиометр СУФР-Сп-К	Исследование вариаций интегрального потока ультрафиолетового излучения Солнца	ИПГ	Т.В. Казачевская
Ультрафиолетовый солнечный спектрофотометр ВУСС-Л	Исследование ультрафиолетового излучения Солнца вблизи резонансной линии водорода	ИПГ	А.А. Нусинов

Таблица 3.1 (окончание)

Прибор	Назначение	Организация-разработчик	Руководитель эксперимента
Исследования солнечных корпускулярных потоков			
Комплекс приборов для исследования солнечных космических лучей СКЛ	Исследование солнечных космических лучей	НИИЯФ МГУ	С.Н. Кузнецов
*ЦКИ ПАН – Центр космических исследований Польской академии наук.			

приборы рентгеновского диапазона для построения спектральных изображений активных областей на Солнце с пространственным разрешением порядка 2–3 угл. с; приборы для измерения потоков электромагнитного излучения активных областей и вспышек; приборы для исследования солнечных корпускулярных потоков. Широкий диапазон измерений электромагнитного спектра и потоков солнечных космических частиц, как нейтральных (нейтронов), так и заряженных (электронов, протонов и ядер), позволит получать наиболее полную картину физических процессов в активных областях на Солнце. Перечень научных приборов спутника “Коронас-Ф” и их основное назначение приведены в табл. 3.1:

Спектрофотометр “Дифос”. Спектрофотометр “Дифос” предназначен для измерения флуктуаций интенсивности оптического излучения Солнца для получения спектра собственных колебаний. Измерения интенсивности проводятся одновременно в шести оптических спектральных диапазонах: 350, 500, 650, 850, 1100 и 1500 нанометров с шириной полосы 10% от значения центральной частоты. Осуществлена значительная модернизация фотометра по сравнению с проектом “Коронас-И”: значительно увеличен (больше, чем на порядок) чувствительность фотоприемников, расширен спектральный диапазон наблюдения (почти в два раза) при одновременным увеличением спектральных каналов с трех до шести. Наблюдения глобальных колебаний Солнца ведутся в широком спектральном диапазоне, включающем наиболее информативную линию ультрафиолетового диапазона, в которой интенсивность излучения от глобальных колебаний Солнца заметно превышает интенсивность излучения в других линиях. На рис. 3.10 приведено сравнение каналов прибора “Дифос” с приборами “Soho”.

На рис.3.11 показаны относительные амплитуды мод 5-минутных колебаний Солнца на длине волны 350 нм за период

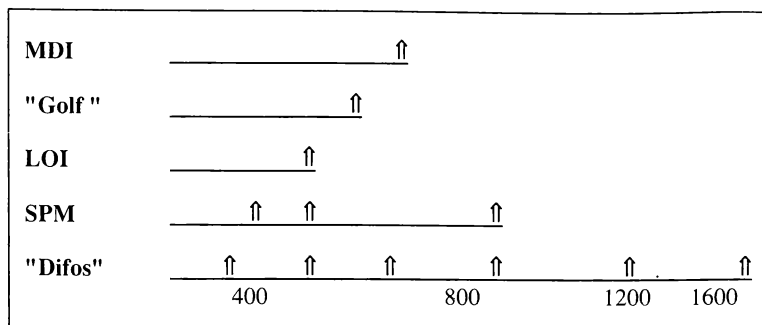


Рис. 3.10. Сравнение каналов спектрофотометра “Дифос” (“Коронас-Ф”) с приборами SOHO

28–30 ноября 2001 г. по результатам обработки данных спектрофотометра “Дифос”. Аналогичные результаты получены для всех других каналов. После усреднения по модам получены средние значения относительных амплитуд A для каждого из 6-ти каналов и построена их зависимость от длины волны λ , которая показана на рис.3.12. Все точки легли на гладкую кривую, которая аппроксимируется зависимостью $\lambda^{-1.2}$. Аналогичный результат установлен для другого интервала наблюдений 30 ноября – 3 декабря 2001 г. (вторая кривая на рисунке, помеченная квадратиками). Сравнение результата с прибора “Дифос” с результатами в диапазоне наземных наблюдений дает хорошее совпадение. По наземным измерениям отношение амплитуд глобальных колебаний на длинах волн 500 и 680 нм составило 1,6, а для измерений прибором “Дифос” – 1,54. Для другой пары длин волн – отношение амплитуд на длинах волн 500 и 870 нм для наземных наблюдений составило 2,2, а по данным прибора “Дифос” – 1,93.

Спектральные изображения полного диска Солнца в рентгеновском диапазоне (эксперимент “Спирит”). Комплекс аппаратуры эксперимента “Спирит” включает многоканальный телескоп СРТ-К и спектрогелиограф РЕС-К. Основной задачей эксперимента является одновременное получение рентгеновских спектральных изображений солнечного диска и короны, соответствующих монотемпературным слоям плазмы солнечной атмосферы в широком температурном интервале $T_E = 0,05\text{--}50$ МК (1 МК = 10^6 К) с высоким пространственным, спектральным и временным разрешениями. Такие наблюдения Солнца послужили основой для исследования трехмерной структуры и динамики солнечной атмосферы, определения физических параметров и вариаций содержания элементов в плазмен-

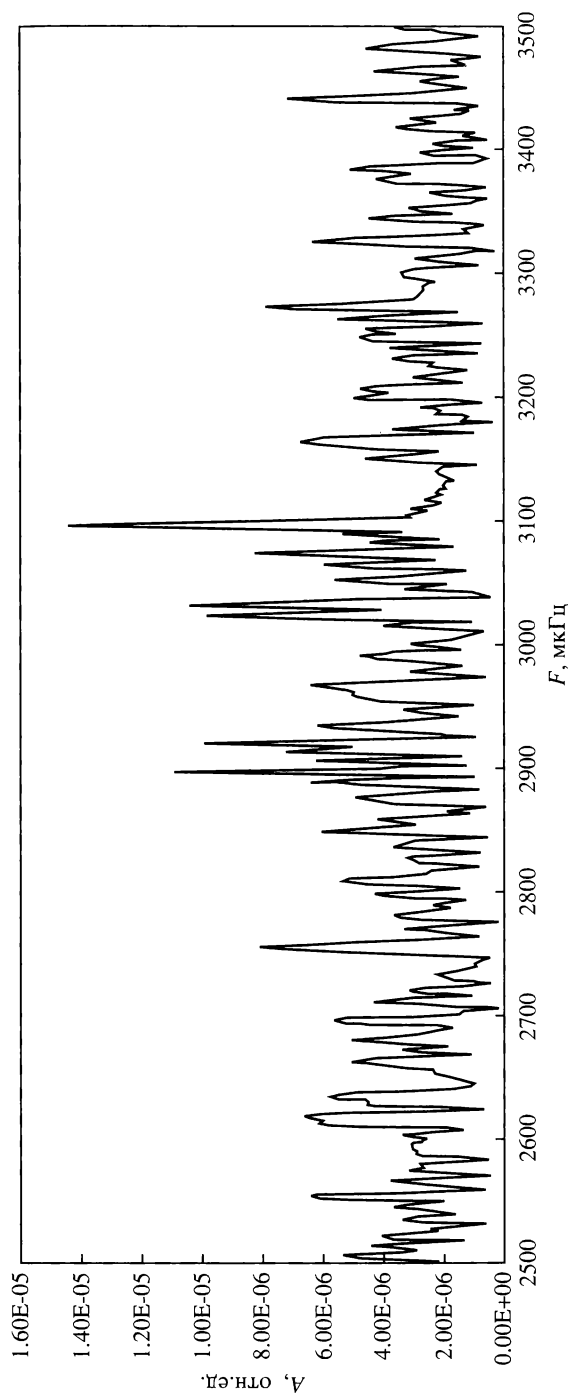


Рис. 3.11. Относительные амплитуды мод пятиминутных колебаний Солнца на длине волны 350 нм по результатам обработки данных спектрофотометра "Дифос"

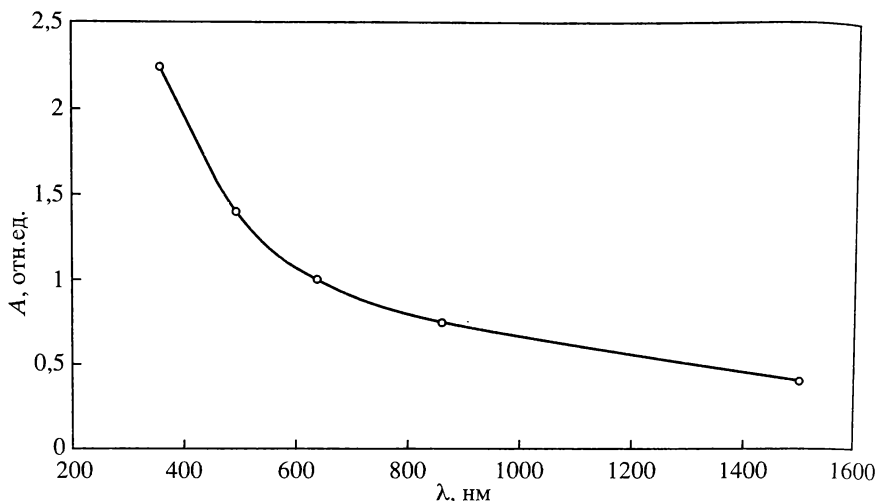


Рис. 3.12. Зависимость относительной амплитуды A собственных колебаний Солнца от длины волны λ .

ных образованиях и явлениях – активных областях, корональных дырах, вспышках, выбросах корональных масс, ярких точках, протуберанцах и т.д.

В приборах СРТ-К и РЕС-К использована многослойная фокусирующая оптика, системы тонкопленочных и пористых спектральных фильтров и приемники на основе открытых микроканальных пластин и охлаждаемых ПЗС-матриц. Важной особенностью комплекса приборов стала возможность одновременного получения изображений всего Солнца в нескольких спектральных каналах. Основные характеристики измерительных каналов приведены в табл. 3.2. Узкополосные каналы, центрированные на длины волн 171, 175, 195, 284 и 304 Å относятся к телескопу СРТ-К; остальные каналы – к спектрогелиографу РЕС-К. Канал MgXII дает монохроматические изображения в линии 8,42 Å с угловым разрешением $6'' \times 6''$. Спектрогелиограммы в областях длин волн 177–207 Å и 285–335 Å дают одновременные спектры плазменных структур в солнечной атмосфере с пространственным, спектральным и временным разрешением соответственно: $5'' \times 100''$ и $8'' \times 160''$, 0,02 и 0,04 Å и до 2 с.

За первые шесть месяцев наблюдений зарегистрировано более 40 тысяч рентгеновских изображений и спектрогелиограмм в диапазоне $\lambda = 864\text{--}335$ Å с высоким пространственным, спектральным и временным разрешениями. Ежедневно регистрировалось более 200 изображений Солнца. На рис. 3.13 (см. цв.

Таблица 3.2

Основные характеристики измерительных каналов приборов СРТ-К и РЕС-К

Диапазон канала, Å	Основные ионы	T, 10 ⁶ К
1,85–1,87	Fe XXIV–XXV	20–50
8,418–8,423	Mg XII	10
177–207	O IV, Fe IX–XXIV, Ca XIV–XVII He II, Si XI, Fe XV–XVI,	0,3–16
285–335	Mg VIII, Ni XVII, Ca XVII	0,05–5
171	Fe IX–X Fe X–XI	1,3
175	Fe XII	1,3
195	Fe XV	1,6
284	He II	2
304	He II, Fe XV	0,05

вклейку) в качестве примера приведены изображения Солнца в каналах рентгеновского телескопа, соответствующих температурным слоям в интервале 0,05–2 МК (см. табл. 3.2). На изображениях видны локальные и крупномасштабные плазменные образования, разнообразная структура магнитных полей, а также область вспышки.

На рис. 3.14 представлено монохроматическое изображение в линии Mg XII 8,42 Å области солнечной короны, разогретой до температуры 10 МК. Это изображение совмещено с изображением в канале 175 Å, соответствующим температуре 1,3 МК (шарообразная структура в правом верхнем углу рисунка). Высокотемпературные (10 МК) динамические плазменные структуры с различным временем жизни (от минут до десятков часов), разной формы (шлемовидные, шарообразные, паукообразные и др.) и с различным распределением по высоте до сотен тысяч километров над диском Солнца обнаружены в монохроматических рентгеновских изображениях впервые.

На рис. 3.15 представлена спектрогелиограмма Солнца 16.09.01 (03.59 UT) вместе со спектром вспышки в области 177–207 Å, где показаны также основные интенсивные линии ионов Fe X–XXIV, возбуждаемые в широком диапазоне температур от 1 до 16 МК, а также ряд линий ионов других элементов (O, Ca и Ni), соответствующих температурам 0,3–5 МК. Область вспышки видна как компактное изображение на спектрогелиограмме в “горячей” линии Fe XXIV 192,04 Å, имеющей максимум светимости при 16 МК.

В результате первичного анализа изображений в эмиссионных линиях многозарядных ионов получены распределения элек-

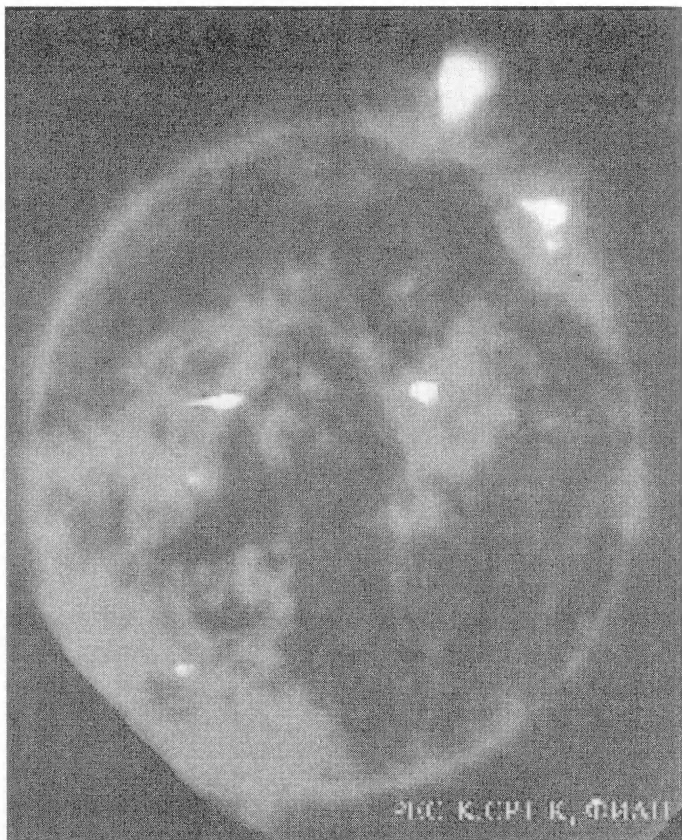


Рис. 3.14. Монохроматическое изображение в линии $\text{Mg XII } 8.42 \text{ \AA}$ области солнечной короны, разогретой до температуры 10 МК (эксперимент “Спирит”)

тронной плотности и температуры в различных плазменных образованиях солнечной короны: активных областях, вспышках, корональных дырах и др., лежащих в диапазоне значений $N_e \approx 10^8\text{--}10^{12} \text{ см}^{-3}$ и $T_e \approx 1\text{--}20 \text{ МК}$.

Таким образом, в рамках эксперимента “Спирит” реализовано новое направление в солнечной астрофизике – так называемая изображающая рентгеновская спектроскопия, позволяющая по монохроматическим изображениям Солнца воссоздать трехмерную структуру и исследовать динамику плазменных образований солнечной атмосферы в диапазоне температур $T_e \approx 0,05\text{--}50 \text{ МК}$.

Спектрофотометр “Диогенесс” и рентгеновский спектрометр “Ресик”. Приборы “Ресик” и “Диогенесс” измеряют спектры излу-

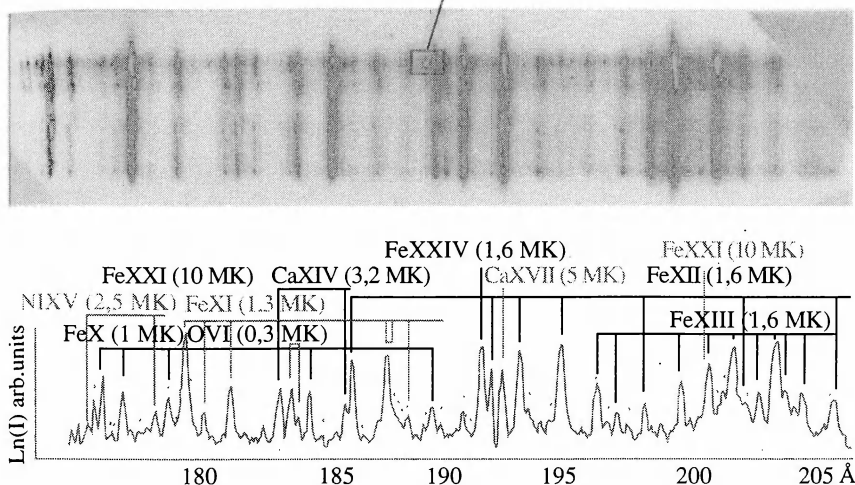


Рис. 3.15. Спектрогелиограмма Солнца 16.09.01 (03 : 59 UT) вместе со спектром вспышки в области 177–207 $\text{\AA}$. Показаны также основные интенсивные линии ионов Fe X–XXIV, возбуждаемые в широком диапазоне температур от 1 до 16 МК, а также ряд линий ионов других элементов (O, Ca и Ni), соответствующих температурам 0,3–5 МК (эксперимент “Спирит”)

чения Солнца в диапазоне длин волн 3–7 $\text{\AA}$ и предназначены для исследования рентгеновского излучения активных областей и вспышек с высоким спектральным разрешением. Получаемые ими рентгеновские спектры солнечного излучения сравнимы по спектральному и временному разрешениям с самыми тщательными наблюдениями, выполненными до сих пор. Вследствие полярной орбиты объекта “Коронас-Ф”, а также полного покрытия широкого спектрального диапазона, они стали ценным дополнением спектров получаемых со спутника “Yohkoh”. При больших потоках рентгеновского излучения детекторы прибора “Ресик” и спектрометров объекта “Yohkoh” насыщаются. Поэтому прибор “Диогенесс” на настоящий момент – единственный в мире работающий спектрометр, который снимает спектры мощных вспышек – балла свыше M2 (пример – вспышка класса X5.3 25 августа 2001 г.).

На рис. 3.16 показаны спектры в линии CaXIX с высоким пространственным разрешением ($\sim 5''$) на фазе роста, промежуточной фазе и фазе распада самой мощной вспышки текущего цикла солнечной активности (25 августа 2001 г.). Температура излучающей плазмы уменьшается от 2,5 МК на фазе роста до 1,2 МК на фазе спада. На спектрах видны эффекты изменения ширины спектральных линий, что указывает на роль плазменной турбулентно-

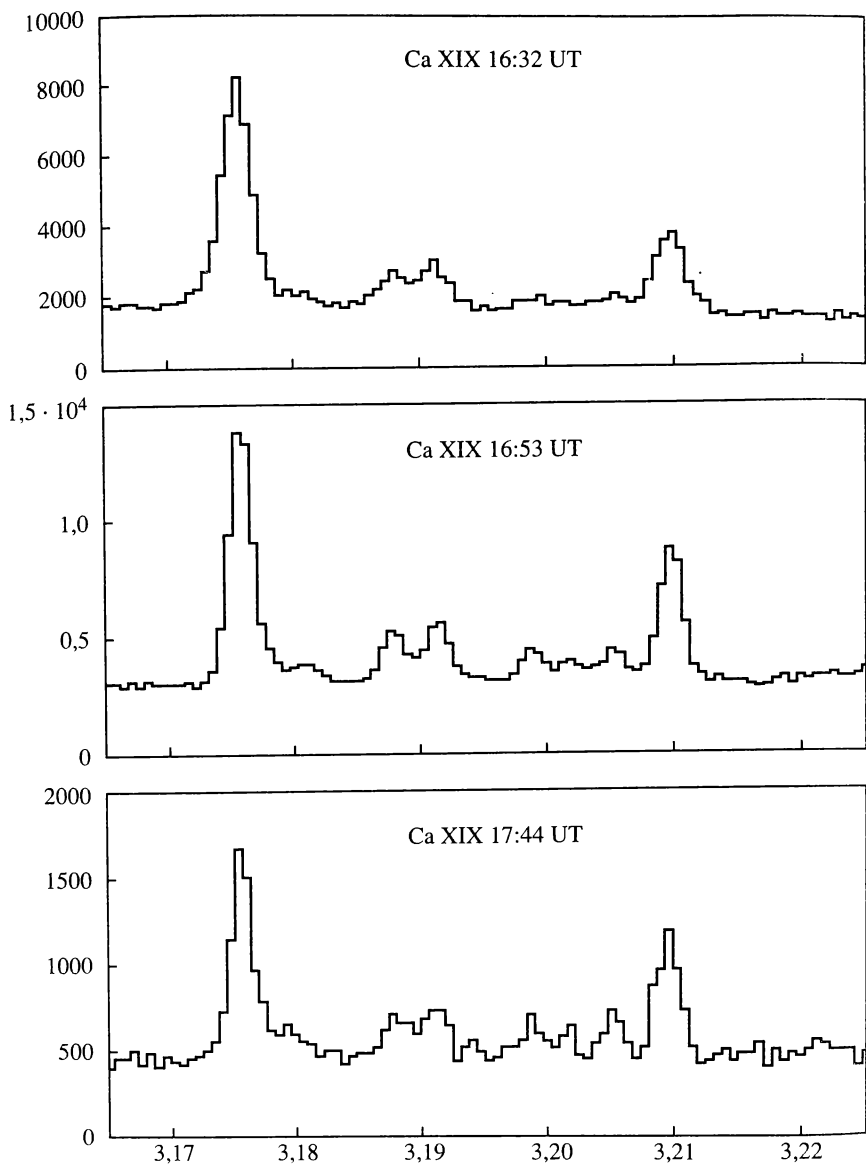


Рис. 3.16. Спектры в линии Ca XIX с высоким пространственным разрешением ($\sim 5''$) на фазе роста, промежуточной фазе и фазе распада самой мощной вспышки текущего цикла солнечной активности (25.08.2001, спектрофотометр "Диогенесс")

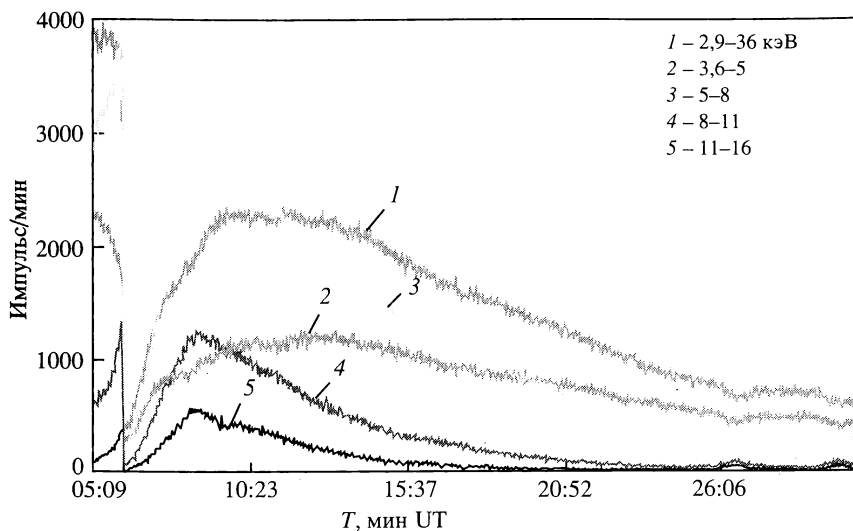


Рис. 3.17. Временной профиль интенсивности рентгеновского излучения в солнечной вспышке, зарегистрированной прибором “Ирис” 13.03.2002

сти при эволюции вспышки. Относительные интенсивности излучения в линиях содержат информацию об энергетическом балансе во вспышках, роли немаксвелловских и неравновесных процессов в области выделения энергии вспышки. В данном спектральном диапазоне ($3 - 7 \text{ \AA}$) для вспышки класса X подобные спектры с таким высоким пространственным разрешением получены впервые. Они показывают наличие множества линий излучения, которые образованы за счет процессов столкновительного возбуждения атомов, возбуждения внутренних оболочек атомов и диэлектронной рекомбинации, и позволяют осуществить детальную диагностику вспышечной плазмы.

Вспышечный спектрометр “Ирис”. Прибор предназначен для исследования вспышечной активности Солнца в рентгеновском диапазоне спектра 2–200 кэВ. В патрульном режиме измерений он имеет 12 энергетических каналов с временным разрешением 2,5 с, в режиме всплеска – 64 энергетических канала с временным разрешением 1 с и 4 канала с разрешением 10 мс. Спектральных измерений с таким временным разрешением до настоящего времени не проводилось ни в одном эксперименте по исследованию рентгеновского излучения Солнца. Наблюдения тонкой временной структуры потоков жесткого рентгеновского излучения дают прямую информацию о развитии процессов энерговыделения на взрывной фазе вспышек и позволяют продвинуться в понимании их физического механизма. На рис. 3.17 по-

Отсчет, с

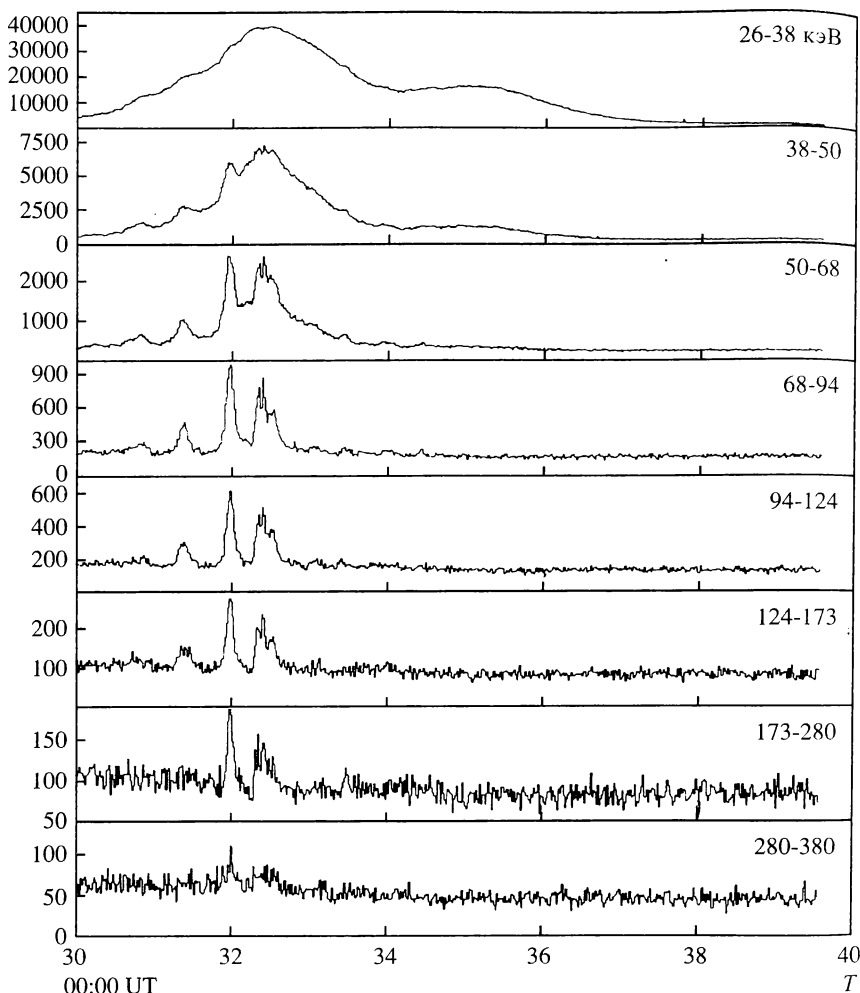


Рис. 3.18. Временной профиль излучения мощной вспышки 24.12.2001 ($T_0 = 0$ ч 31 мин 41,895 с UT) на взрывной фазе в восьми энергетических каналах (гамма-спектрометр “Геликон”)

казан временной профиль интенсивности рентгеновского излучения в солнечной вспышке, зарегистрированной прибором “Ирис” 13.03.2002 г. Эта вспышка была наиболее мощной из зарегистрированных. Максимум ее интенсивности в мягком рентгеновском диапазоне наблюдался в 22:08:33 UT.

Гамма-спектрометр “Геликон”. Прибор регистрирует временные и спектральные характеристики жесткого электромаг-

нитного излучения солнечных вспышек в широком энергетическом диапазоне от рентгена до гамма – 10 кэВ–10 МэВ. С его помощью осуществляется слежение за радиационной обстановкой в околоземном космическом пространстве и солнечными вспышками с мягким энергетическим спектром, обнаружение и детальная регистрация жестких ($E_\gamma > 50$ кэВ) вспышек и гамма-всплесков. За период наблюдений с 15 августа 2001 г. по 22 января 2002 г. прибором “Геликон” зарегистрировано свыше 600 солнечных вспышек и 5 гамма-всплесков. Большинство вспышек имели мягкие спектры и регистрировались в фоновом режиме с временным разрешением 1 с в восьми смежных интервалах энергии от 26 до 380 кэВ. Одна из мощных солнечных вспышек была зарегистрирована на взрывной фазе 24 декабря в $T_0 = 0$ h 31 m 41,895 s UT. На рис. 3.18 и 3.19 приведены временная динамика этой вспышки в восьми энергетических каналах и энергетические спектры, полученные последовательно на различных фазах события. Времена начала регистрации каждого из спектров и длительность набора информации указаны на рисунках.

Рентгеновский спектрометр “РПС-1”. Прибор предназначен для исследования солнечных вспышек и их предвестников в рентгеновском диапазоне 3–30 кэВ. За время измерений проведено уточнение калибровочных характеристик прибора, построены карты фоновых условий и набрана статистика экспериментальных данных.

Амплитудно-временной спектрометр АВС. Прибор предназначен для исследования рентгеновского и гамма-излучения солнечных вспышек, и в частности, для анализа событий типа солнечная вспышка – гамма-всплеск в энергетических диапазонах: $E = 3\text{--}30$ КэВ; 0,1–8,0 и 2,0–80,0 МэВ. За время наблюдений зарегистрировано несколько десятков кандидатов в события типа солнечная вспышка или гамма-всплеск, для которых получены энергетические спектры для разных фаз события (до события, во время события и после его окончания). Длительность событий-кандидатов изменяется от 16 с до 3–5 мин. На рис. 3.20 для события 18.09.2001 по результатам измерений восстановлен дифференциальный энергетический спектр. На нем можно отметить излом в районе энергии 300 КэВ и возможную спектральную особенность, которую можно соотнести с аннигиляционной линией 511 КэВ.

Солнечный ультрафиолетовый радиометр СУФР-Сп-К. Аппаратура “СУФР-Сп-К” измеряет потоки ультрафиолетового излучения Солнца как звезды в нескольких спектральных интервалах – от 1 до 130 нм и имеет в отличие от “Soho” более широкий спектральный диапазон. Помимо научных задач, выполня-

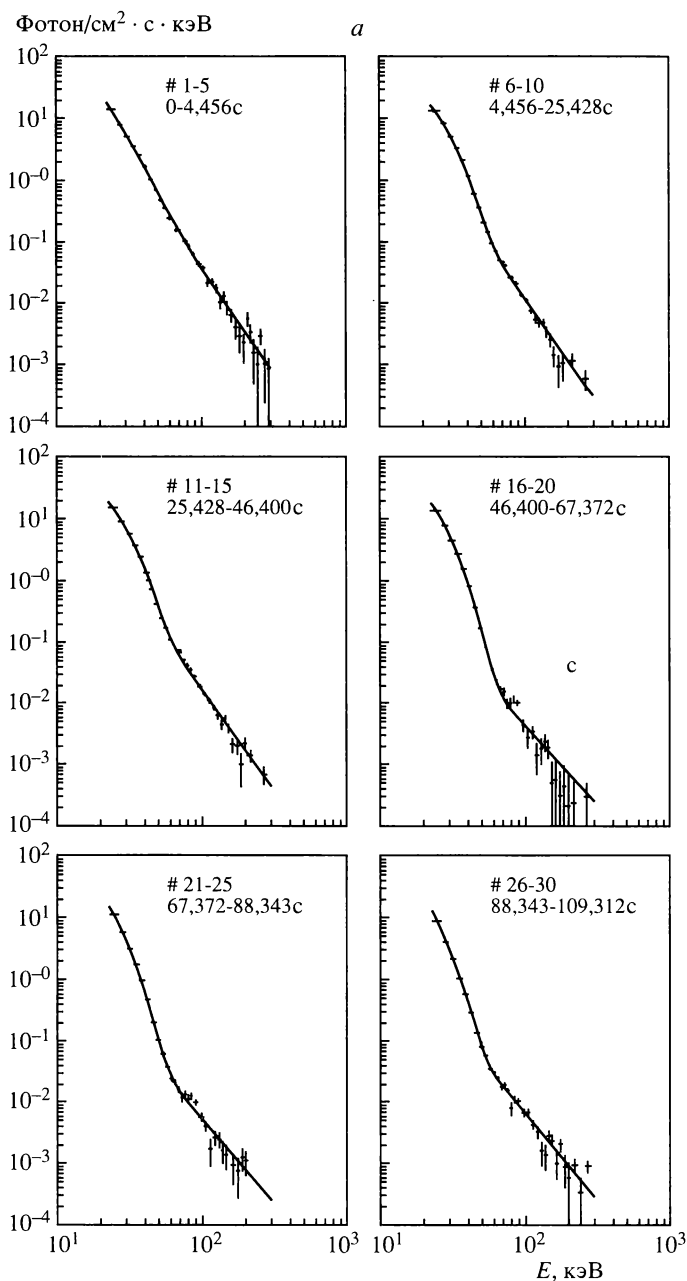
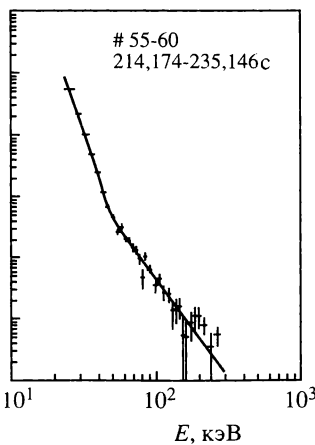
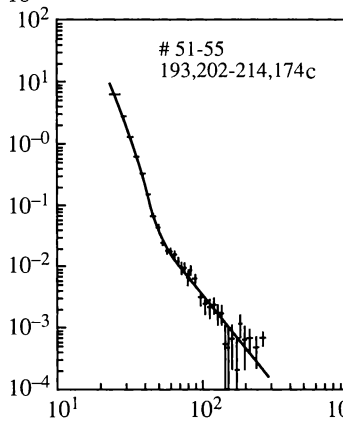
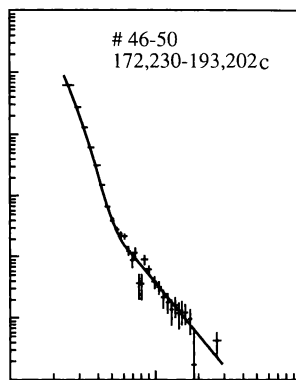
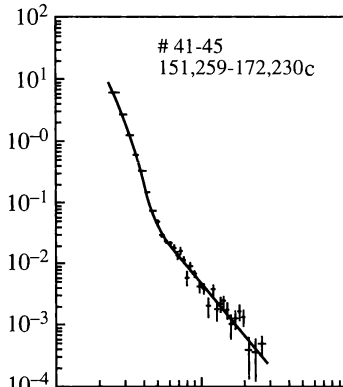
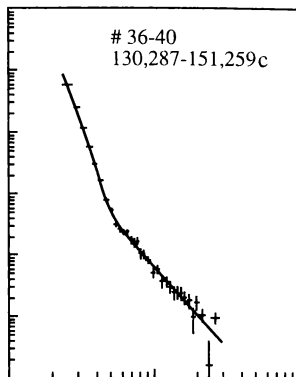
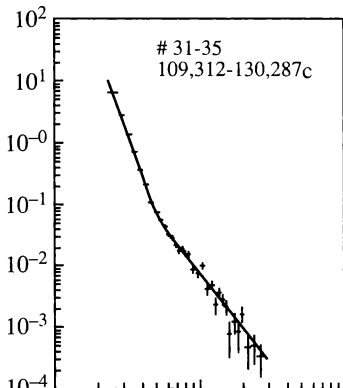


Рис. 3.19. Энергетические спектры мощной вспышки 24.12.2001, полученные последовательно на различных фазах события (гамма-спектрометр "Геликон")

a – 0–109 с; *б* – 109–235 с

Фотон/см² · с · кэВ

б



E , кэВ

ются задачи мониторинга одного из наиболее существенных элементов космической погоды – геоэффективного УФ-излучения Солнца. Аппаратурой “СУФР” в рентгеновском диапазоне длин волн $\lambda < 12$ нм получены данные о мощной вспышке класса X-5.3В 25 августа в 16 ч 23 м UT.

Ультрафиолетовый солнечный спектрофотометр ВУСС-Л. Прибор ВУСС-Л проводит измерения в полосе около 120 нм и предназначен для исследования УФ-излучения Солнца вблизи резонансной линии водорода H_{α} . По результатам измерений получены многочисленные данные о потоке ультрафиолетового излучения и интенсивности в линии Лайман-альфа, которая по предварительным оценкам составила ~ 10 эрг/см² с. Временная запись потока УФ-излучения прибором ВУСС-Л показана на рис. 3.21. Регистрируемое приборами СУФР-Сп-К и ВУСС-Л ультрафиолетовое излучение Солнца как звезды воздействует на верхние слои атмосферы Земли и является важной характеристикой активности Солнца на временах его цикличности.

Комплекс приборов СКЛ для исследования солнечных космических лучей состоит из трех приборов – “Сонг” (спектрометр гамма-излучения и нейтронов), МКЛ (Монитор космических лучей) и СКИ-3 (Спектрометр космического излучения), и предназначен для комплексных исследований солнечных космических лучей и их проявлений в околоземном космическом пространстве. Прибор “Сонг” регистрирует спектры рентгеновского и гамма-излучений в диапазоне энергий 0,03–100 МэВ, детальные спектры гамма-линий в диапазоне 0,3–20 МэВ, нейтроны с энергиями > 20 МэВ, потоки заряженных частиц космических лучей – протонов с энергиями > 70 МэВ и электронов с энергиями > 50 МэВ. Прибор МКЛ измеряет потоки и спектры протонов с энергиями 1–200 МэВ и электронов с энергиями 0,5–12 МэВ. Прибор СКИ-3 измеряет химический состав и спектры ионов в диапазоне $Z = 1$ –10 и диапазоне энергий 1,5–20 МэВ/н для He, 4–40 МэВ/н для Ne. По сравнению с приборами, установленными на “Soho” и “Yohkoh”, спектрометр “Сонг” обладает способностью регистрации энергичных (с энергиями до 100 МэВ) гамма-квантов, что, в свою очередь, дает возможность наблюдать гамма-кванты от распада π^0 мезонов, образующихся во взаимодействиях высокоэнергичных протонов. Результаты проведенных измерений на “Коронас-Ф” показали, что прибор “Сонг” обладает фоном для регистрации солнечных нейтронов не менее, чем в 5–7 раз ниже по сравнению с GRS (SMM) – единственным прибором, регистрировавшим солнечные нейтроны в том же диапазоне энергий.

Вспышка 04.11.2001 в 16ч. 20 м. привела к одному из крупнейших возрастаний солнечных энергичных частиц в околоземном

ν , фотон/с · кэВ

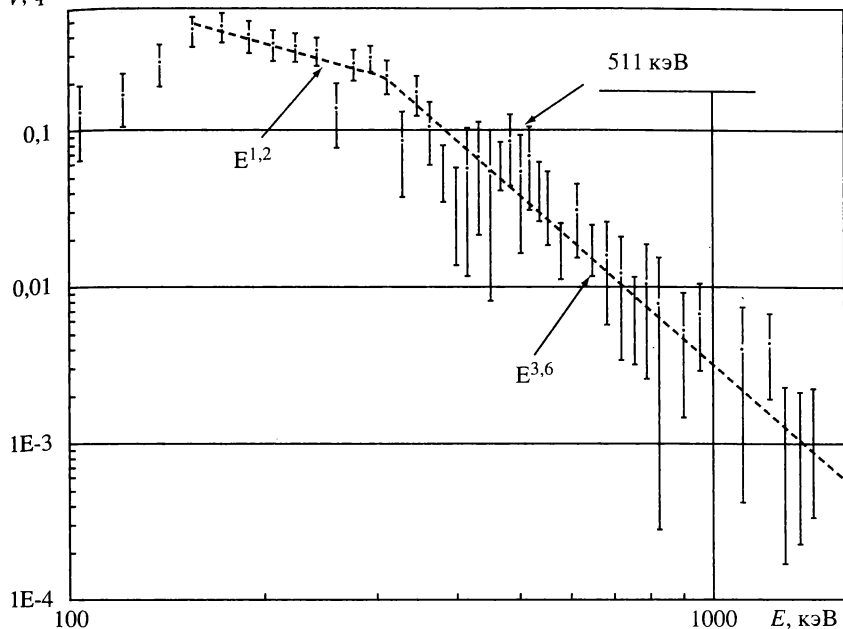


Рис. 3.20. Дифференциальный энергетический спектр события 18.09.2001

$V_{\text{усс}}, \text{ В}$

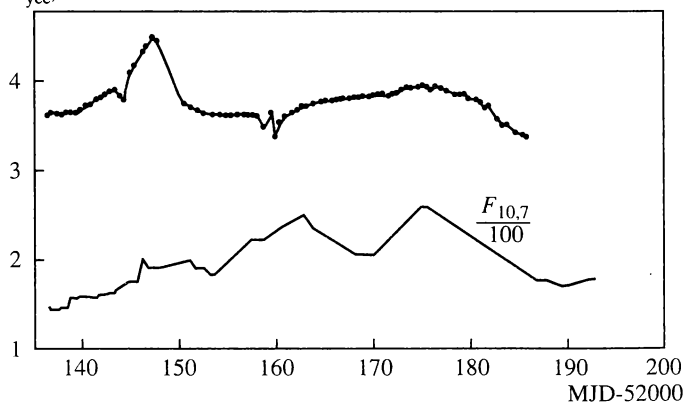


Рис. 3.21. Временная запись сигнала, пропорционального потоку УФ-излучения, прибором ВУСС-Л и поток солнечного радиоизлучения на длине волны 10,7 см. По оси x – дни в системе исчисления MJD

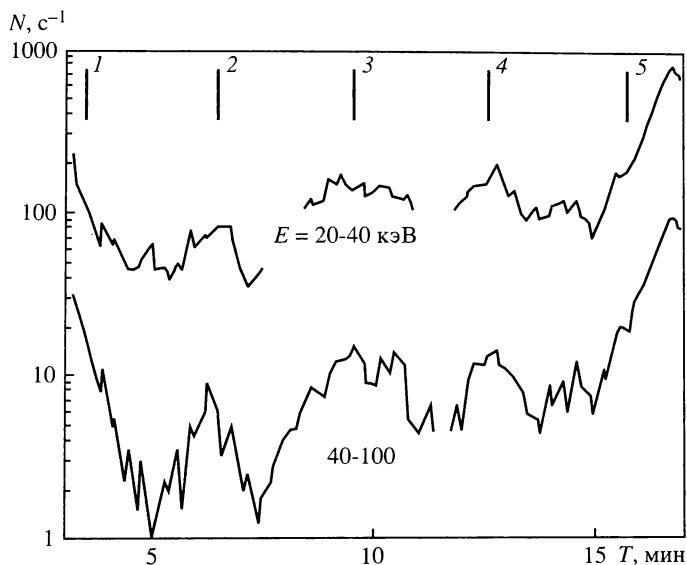


Рис. 3.22. Показания мониторингового рентгеновского детектора прибора СПР-Н во время солнечной вспышки 4.11.2001 в 16 ч

1, 2 и 5 – тормозное излучение магнитосферных электронов; 3 и 4 – рентгеновское излучение вне магнитосферного источника (солнечная вспышка)

пространстве. На рис.3.22 приводятся данные патрульного детектора прибора СПР-Н. Спутник в это время проходил полярную шапку. Поток рентгеновского излучения в областях 1 и 5 соответствует тормозному излучению электронов внешнего пояса, в области 2 наблюдался всплеск магнитосферных электронов (данные прибора МКЛ), возрастания 3 и 4 являются реальными возрастаниями рентгеновского излучения. Сравнение с данными спутника “Goes” показало, что несмотря на непрерывное возрастание потока теплового рентгеновского излучения с 16 ч. 03 м. до 16 ч. 20 м. тормозное излучение свидетельствовало по крайней мере о двух импульсах ускорения частиц на Солнце.

После вспышки появились солнечные энергичные частицы и 5 ноября в 20 ч. начались геомагнитные возмущения, связанные с приходом корональной плазмы, инжектированной во вспышке 4 ноября. На нижней панели (рис. 3.23) показано излучение солнечной вспышки в 16:20 UT 4 ноября по данным “Goes-8” и Dst-вариация. Видно, что геомагнитное возмущение, связанное с приходом к Земле корональной эжекционной массы (КЭМ), началось в ~20 ч. UT 5 ноября. Средняя путевая скорость КЭМ ~ 1700 км/с, следовательно, перед КЭМ должна существовать мощная ударная волна. Измерение межпланетного

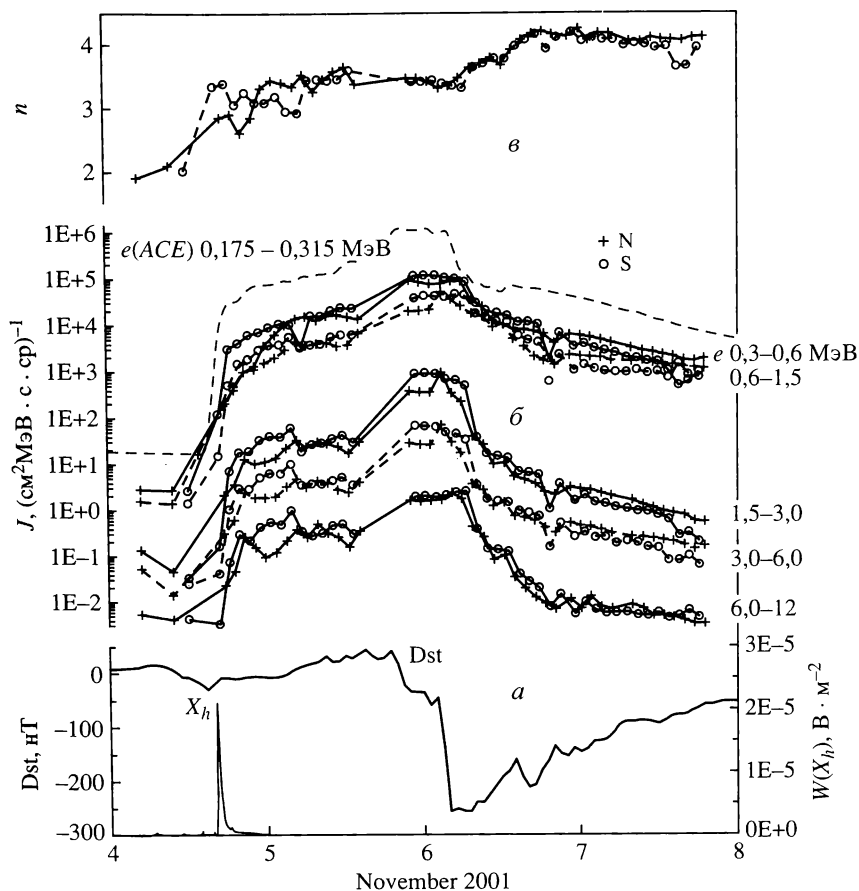


Рис. 3.23. Некоторые следствия солнечной вспышки 4.11.2001 в межпланетном пространстве и в магнитосфере Земли

Нижняя панель: X_h – тепловое вспышечное рентгеновское излучение по данным “Goes-8”, Dst-вариация 4–7.11.2001; средняя панель – данные о потоках электронов с энергией 0,175–0,315 МэВ в межпланетном пространстве (по данным спутника ACE), а также данные о потоках электронов с энергией 0, 0,3–12 МэВ в полярных шапках (комплекс “СКЛ Коронас-Ф”); верхняя панель – изменение показателя степени энергетического спектра электронов со временем (комплекс “СКЛ Коронас-Ф”)

магнитного поля на ИСЗ ACE, “Wind”, “Geotail” подтверждают этот вывод. Эта ударная волна может служить мощным источником энергичных частиц. Измерение протонов и ионов с энергией от 1 до 100 МэВ/нук возрастали от момента вспышки до прихода КЭМ к Земле. При этом ударная волна эффективно ускоряла электроны. На средней панели (см. рис. 3.23, б) показаны временные зависимости потоков электронов с энергией от 0,3 до 12 МэВ, которые не измерялись на других спутниках в это

Таблица 3.3

**Содержание различных элементов (ядер с энергией 11.4 – 23 МэВ/нук)
в процентах**

Время	C	N	O	Ne	Mg	Si
22 h 04 Nov – 15 h 05 Nov	39,0±3,9	11,9±1,7	100	14,4±2,3	17,9±2,4	17,4±2,2
22 h 05 Nov – 07 h 06 Nov	45,5±3,4	10,4±1,3	100	12,0±1,4	20,6±2,0	16,8±1,8
07 h 06 Nov – 19 h 06 Nov	42,4±6,5	11,2±2,7	100	12,4±2,7	16,8±3,4	10,4±2,6
19 h 06 Nov – 20 h 07 Nov	54,7±12,6	8,5±2,0	100	12,2±4,6	21,6±6,7	18,9±6,0

время вне геомагнитосферы. На рис. 3.23, в приведено изменение показателя энергетического спектра электронов. Спектр электронов практически не изменялся, пока КЭМ приближалась к Земле. Спектр электронов сделался мягче и поток электронов, также как поток протонов и ионов, стал уменьшаться при удалении КЭМ от Земли.

На спутнике “Коронас-Ф” измеряются также потоки ионов с энергией от 2 до 40 МэВ/нук. Временные вариации ионов от C до Si были подобны вариациям протонов и электронов. Химический состав ионов на протяжении всей вспышки энергичных частиц практически не изменялся. В табл. 3.3 приведено процентное содержание различных элементов (ядер с энергией 11.4 – 23 МэВ/нук) относительно кислорода для четырех интервалов времени в течении вспышки 4–7 ноября 2001 г.

3.3. Исследование околосолнечной плазмы радиофизическими методами

По данным радиозондирования околосолнечной плазмы сигналами космических аппаратов “Венера”, “Ulysses”, “Galileo” получены новые сведения о характеристиках солнечного ветра в диапазоне гелиоцентрических расстояний 5–80 солнечных радиусов – таких, как скорость, пространственный спектр и интенсивность флуктуаций электронной концентрации, внешний масштаб турбулентности плазмы, анизотропия неоднородностей. Обнаружено, что спектр флуктуаций частоты имеет максимум, появление которого обусловлено влиянием внешнего масштаба турбулентности околосолнечной плазмы. Впервые получены до-

стоверные сведения о внешнем масштабе и установлено, что он возрастает с гелиоцентрическим расстоянием закономерно по степенному закону с показателем степени 0,8. В экваториальных районах внешний масштаб изменяется от $7 \cdot 10^5$ до $7 \cdot 10^6$ (т.е. от 1 до 10 солнечных радиусов), а в полярных корональных дырах он примерно в три раза больше. Разработана методика нахождения внешнего масштаба турбулентности плазмы, основанная на спектральном и корреляционном анализе длительных непрерывных измерений флюктуаций частоты зондирующего сигнала в разнесенных на большие расстояния наземных пунктах.

Спектральный индекс флюктуаций электронной концентрации на расстояниях, больших 20 радиусов Солнца, в инерционном интервале 10^{-4} – $5 \cdot 10^{-2}$ Гц почти не зависит от гелиоцентрического расстояния, а его среднее значение близко к величине, соответствующей спектру Колмогорова (11/3). В области начального ускорения солнечного ветра на расстояниях 5–10 радиусов Солнца спектральный индекс в инерционном интервале близок к величине 3,0. В этой же области обнаружена высокая степень неоднородности плазмы, достигающая (20–30)%. Обнаружена также сильная гелиоширотная зависимость характеристик солнечного ветра в полярных районах по сравнению с экваториальными.

Скорость солнечного ветра в полярных районах в несколько раз превышает соответствующие значения для низкоширотных областей, в то время как интенсивность неоднородностей в высокоширотных областях ниже, чем в экваториальных. В экваториальных областях скорость солнечного ветра закономерно возрастает с гелиоцентрическим расстоянием от 100 до 400 км/с. Обнаружено сильное различие в режимах турбулентности в области звукового и сверхзвукового течения солнечного ветра, о чем свидетельствует резкое изменение коэффициента анизотропии мелко-масштабных неоднородностей от 10 до 2 при расстояниях около 10 солнечных радиусов. Разработана методика изучения анизотропии неоднородностей солнечного ветра, основанная на анализе наблюдений флюктуаций частоты и амплитуды радиоволн одновременно в разнесенных на большое расстояние наземных пунктах.

Выполнен анализ данных о флюктуациях фарадеевского вращения плоскости поляризации радиоволн в околосолнечной плазме, излучаемых космическими аппаратами “Helios-1” и “Helios-2”. Разработана методика, позволяющая по экспериментальным данным определять характеристики альвеновских волн, распространяющихся во внешней короне Солнца – интенсивность, скорость, спектр неоднородностей магнитного поля, характерные частоты. Установлено, что в области ускорения солнечного ветра на гелиоцентрических расстояниях 3–10 радиусов

Солнца временной спектр флуктуаций угла поворота плоскости поляризации содержит квазигармоническую компоненту с характерной частотой около 4 м/ц, соответствующей 4–5-минутному периоду осцилляций магнитного поля. Показано, что фоновый спектр определяется ансамблем альвеновских волн со случайными фазами, а квазигармоническая компонента – выделенными цугами этих волн. Амплитуда квазипериодических флуктуаций магнитного поля имеет величину порядка 0,1 от индукции регулярного магнитного поля. Из условия превышения вклада выделенных цугов над вкладом турбулентного фона получены оценки характерного поперечного к радиальному направлению масштаба магнитных флуктуаций, который оказывается порядка 30000 км. Полученные результаты показывают, что распространяющиеся от Солнца альвеновские волны играют существенную роль в энергетическом балансе плазмы во внешней короне Солнца и области ускорения солнечного ветра.

Обнаружено резкое изменение режима турбулентности для неоднородностей коронального магнитного поля вблизи граничного расстояния 6 радиусов Солнца. Найдены значения скорости альвеновских волн для некоторых значений гелиоцентрических расстояний. Средняя скорость альвеновских волн на гелиоцентрических расстояниях 5 радиусов Солнца составила ~600 км/с.

Результаты получены совместно со специалистами германских университетов (Боннского и Бохумского), которые предоставили для обработки экспериментальные данные космических аппаратов “Helios”, “Galileo”, “Ulysses”.

3.4. Развитие радиофизических методов для исследования ионосферы

Отработка радиозатменного метода космического мониторинга атмосферы и ионосферы проводилась с использованием радиотрасс Спутник–Спутник. Экспериментальные исследования проведены с использованием радиотрасс “Мир”– геостационарные спутники. Был развит новый эффективный голографический метод определения высотных профилей температуры атмосферы и электронной концентрации ионосферы по характеру изменений фазы и амплитуды радиоволн. Разработан новый метод мониторинга мелкомасштабной статистической неоднородности тропосферы и стратосферы с использованием радиотрасс “Спутник–Спутник”.

РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПО НАПРАВЛЕНИЮ ФКИ “ПЛАНЕТЫ И МАЛЫЕ ТЕЛА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ”

На запущенном 7 апреля 2001 г. КА (НАСА) “Одиссей” установлен российский научный прибор “Хенд”. Он предназначен для регистрации быстрых нейтронов по параметрам которых можно судить о минералогическом составе поверхности Марса. В частности, “Хенд” позволит обнаружить на Марсе области с большим содержанием замерзшей воды, что особенно важно для планирования будущих миссий и для оценки вероятности существования жизни на этой планете. КА “Одиссей” 24 октября 2001 г. вышел на высокоэллиптическую орбиту вокруг Марса и начал торможение.

За месяц работы на орбите вокруг Марса с 19 ноября по 19 декабря 2001 года на этапе аэроторможения межпланетного аппарата США “Одиссей” российский инструмент “Хенд” получил большой объем данных о потоках нейтронов в течение примерно 70 витков сжимающейся орбиты для расстояний от 250 км до 20 000 км от поверхности планеты. Эти данные позволяют построить трехмерную модель нейтронного облака вокруг Марса.

С 18 февраля 2002 г. “Хенд” проводит съемку карты излучения нейтронов с поверхности Марса в различных спектральных диапазонах. Уже первые результаты показали, что на поверхности Марса присутствуют области с очень большим содержанием водяного льда непосредственно под поверхностью планеты (рис. 4.1, см. цв. вклейку). По аналогии с Землей, эти области можно назвать провинциями “вечной мерзлоты”. Южная провинция “вечной мерзлоты” покрывает около 10 млн кв. км выше 60° южной широты. Согласно полученным оценкам, в приповерхностном слое этой провинции может находиться около 35–50% водяного льда. Данные “Хенда” хорошо согласуются с результатами измерений американских приборов.

Данные мая – июля 2002 г. указывают на начало весеннего сезонного испарения слоя замерзшей углекислоты вокруг северной полярной шапки. Сентябрьские данные измерений свидетельствуют о том, что на севере Марса также присутствует обширная область “вечной мерзлоты”. Сравнение карты нейтронного излучения Марса, полученные в феврале 2002 г. и сентябре 2002 г. представлены на рис. 4.2 (см. цв. вклейку, верхние и нижние карты, соответственно).

РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПО НАПРАВЛЕНИЮ ФКИ “ИССЛЕДОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И РАДИАЦИИ”

5.1. Исследования солнечных энергичных частиц на ИСЗ “Коронас-Ф”

В соответствии с Федеральной космической программой России для исследования активных процессов на Солнце 31 июля 2001 г. был запущен искусственный спутник Земли “Коронас-Ф”. На борту спутника находился комплекс приборов СКЛ (“Сонг”, МКЛ, СКИ-3) для регистрации потоков энергичных нейтральных и заряженных частиц, генерированных во время солнечных вспышек (совместный эксперимент НИИ ядерной физики МГУ им. Д.В. Скобелевича (НИИЯФ МГУ) и Института экспериментальной физики САН г. Кошице, Словакия). Прибор “Сонг” предназначен для регистрации рентгеновского континуума в диапазоне 0,06–100 МэВ, гамма-линий в диапазоне 0,3–25 МэВ, нейтронов 20–100 МэВ и электронов 10–110 МэВ. Прибор МКЛ регистрирует электроны с энергией 0,3–12 МэВ, протоны – 1–90 МэВ. СКИ-3 регистрирует ядра в диапазоне 2–40 МэВ/нук. На борту спутника также находился прибор СПР-Н, предназначенный для регистрации поляризации вспышечного рентгеновского излучения (НИИЯФ МГУ и Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН).

Исследовались вспышки 21 сентября, 04 ноября и 11 декабря 2001 г. в 08 ч. 08 м (дается время максимума вспышки по данным ИСЗ “Goes”). Первая и третья вспышки не привели к заметному возрастанию энергичных частиц в космическом пространстве. Вторая вспышка привела к одному из крупнейших возражений солнечных энергичных частиц в околоземном пространстве. В гл. 3 (см. рис. 3.22) приводятся данные патрульного детектора прибора СПР-Н. Когда спутник пролетал через полярную шапку. Поток рентгеновского излучения в областях 1 и 5 соответствует тормозному излучению электронов внешнего радиационного пояса, в области 2 наблюдался всплеск магнитосферных электронов (данные прибора “МКЛ”), возрастания 3 и 4 являются реальными

возрастаниями рентгеновского излучения. Сравнение с данными “Goes” показывает, что несмотря на непрерывное возрастание потока теплового рентгеновского излучения с 16 ч 03 м до 16 ч 20 м тормозное излучение свидетельствует по крайней мере о двух импульсах ускорения частиц на Солнце. После вспышки появились солнечные энергичные частицы и 5 ноября в 20 ч начались геомагнитные возмущения, связанные с приходом корональной плазмы, эжектированной в вспышке 4 ноября. На нижней панели (см. рис. 3.23) показаны излучение солнечной вспышки в 16:20 UT 4 ноября по данным “Goes 8” и Dst-вариация. Видно, что геомагнитное возмущение, связанное с приходом к Земле корональной эжекцией массы (СМЕ), началось около 20-й часов UT 5 ноября. Средняя путевая скорость СМЕ ~ 1700 км/с, следовательно перед СМЕ должна существовать мощная ударная волна. Измерение межпланетного магнитного поля на ИСЗ ACE, “Wind”, “Geotail” подтверждают этот вывод. Эта ударная волна может служить мощным источником энергичных частиц. Потоки протонов и ионов с энергией от 1 до 100 МэВ/нук возрастали от момента вспышки до прихода СМЕ к Земле. Интересно, что ударная волна эффективно ускоряла электроны. На средней панели (см. рис. 3.23 гл. 3) показаны временные зависимости потоков электронов с энергией от 0,3 до 12 МэВ, которые не измерялись на другие спутники в это время вне геомагнитосферы. На верхней панели (см. рис. 3.23) приведено изменение показателя энергетического спектра электронов, который практически не изменялся, пока СМЕ приближалась к Земле. Спектр электронов сделался мягче и поток электронов, также, как поток протонов и ионов, стал уменьшаться при удалении КЭМ от Земли. На ИСЗ “Корона-Ф” также измерялись потоки ионов с энергией от 2 до 40 МэВ/нук. Временные вариации ионов от C до Si были подобны вариациям протонов и электронов. Химический состав энергичных ионов на протяжении всей вспышки практически не изменялся (см. табл. 3.3).

Ускорение электронов в межпланетном пространстве на фронте ударной волны наблюдалось также после вспышек 22 ноября в 20 ч 26 мин и 23 ч 30 мин.

5.2. Эксперимент “Платан” по изучению тяжелых и сверхтяжелых ядер космических лучей

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН совместно с НИИЯФ МГУ проводит систематические исследования тяжелых и сверхтяжелых ядер космических лучей с помощью твер-

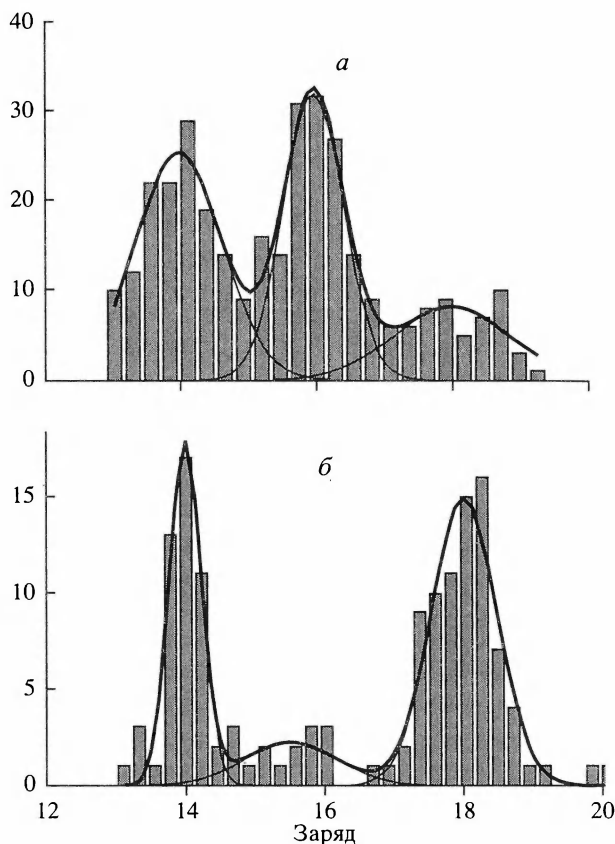


Рис. 5.1. Зарядовые распределения для ионов легких элементов, зарегистрированных в экспериментах "Платан-3" (а) и "Платан-5" (б) соответственно

дотельных (из лавсана) трековых детекторов "Платан" на борту ОКС "Мир" и МКС, начиная с 1978 г. Целью эксперимента является систематическое исследование энергетических спектров тяжелых и сверхтяжелых ядер космических лучей (КЛ) на большой временной шкале (порядка нескольких солнечных циклов) и получение данных об изменении функции, описывающей проникновение частиц в магнитосферу Земли. На основе этой функции становится возможной реконструкция спектра ядер на орбиту Земли, а также обратная процедура перехода.

Интегральный характер используемого в эксперименте твердотельного трекового детектора ядер (ТТД) не препятствует изучению ядер КЛ малых энергий различного происхождения (галактических, солнечных и аномальных) вследствие различия в форме энергетических спектров в соответствующих энергетиче-

ских интервалах, степени ионизации частиц. И, наконец, регистрация частиц на разных фазах цикла солнечной активности (СА) позволяет выделить ту или иную компоненту КЛ. В этом случае интегральный ТТД превращается в дифференциальный на временной шкале 20–30 лет.

Недавно проведена оценка потока ядер аргона аномальной компоненты космических лучей (АКЛ) в 1994–1997 гг. в диапазоне энергией 15–60 МэВ/н. Интерес к этим результатам определяется тем, что в настоящее время отсутствуют данные о существовании ионов аргона АКЛ, захваченных в магнитосферу Земли в этом диапазоне.

В нашем эксперименте возникает возможность оценить потоки межпланетного Аг АКЛ в связи с тем, что вклад Аг ГКЛ внутри магнитосферы значительно ослаблен. Получение данных о межпланетном Аг АКЛ при высоких энергиях представляет значительный интерес в связи с тем, что по некоторым модельным представлениям ионы могут ускоряться в гелиосфере до таких энергий лишь при условии, что их заряд большей +1 (рис. 5.1).

В эксперименте “Платан-5” (толщина слоев детектора 60 мкм) ядра аргона АКЛ надежно выделяются на фоне менее распространенных соседних ядер ГКЛ при энергиях 15–20 МэВ/н.

5.3. Динамика внешнего радиационного пояса Земли в максимуме 23-го цикла солнечной активности

Выполнены исследования величины и динамики потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли с энергией 0,8–6,0 МэВ на геостационарном спутнике “Экспресс-А2” (высота 36,6 т км) в период максимума 23-го цикла солнечной активности (2000–2001 гг.). На рис. 5.2 представлены экспериментальные данные для трех диапазонов энергий электронов, а также значения Dst-вариации и скорости солнечного ветра V_{sw} . Гистограммами обозначены усредненные 27-дневные величины потоков электронов. Результаты получены с помощью мониторинговой аппаратуры “Диэра”, разработанной в НИИЯФ МГУ. Видны значительные, в пределах двух–трех порядков величины, вариации потоков электронов в зависимости от уровня солнечной и геомагнитной активностей. В частности, в конце 2000 – начале 2001 г. наблюдался длительный спад интенсивности электронов, обусловленный уменьшением скорости солнечного ветра до значений $V_{sw} \leq 400 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$. Полученные результаты указывают на необходимость разработки механизма ускорения электронов во внеш-

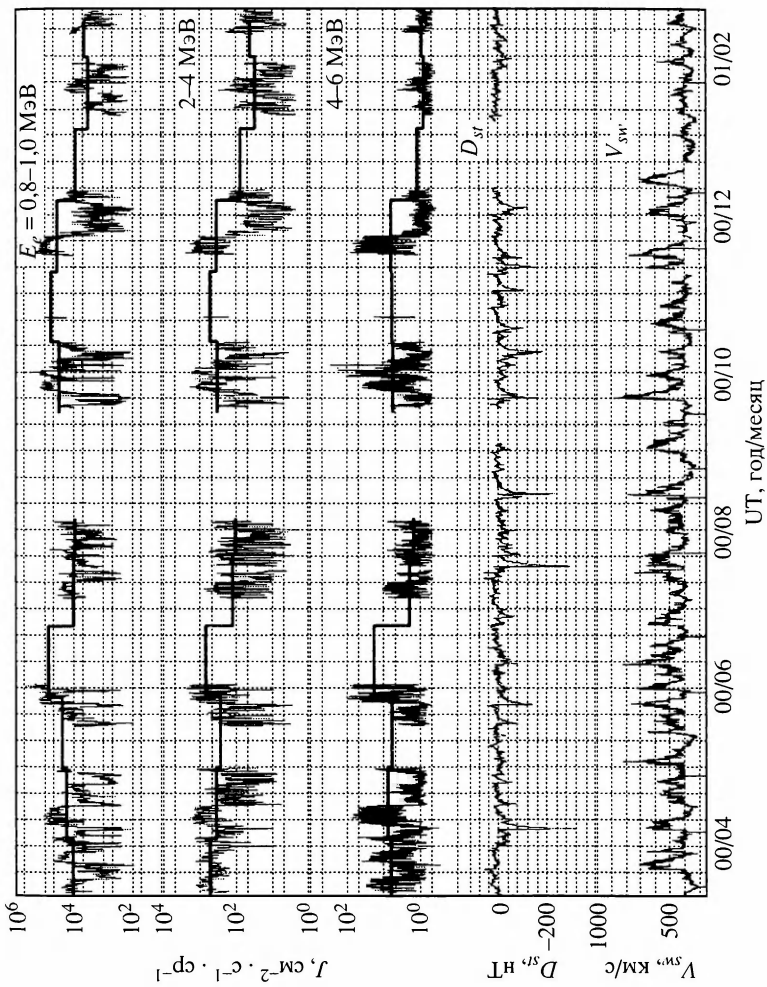


Рис. 5.2. Вариации электронов внешнего радиационного пояса по данным эксперимента на спутнике "Экспресс-2А"

них областях магнитосферы Земли до релятивистских энергий, который может быть обусловлен параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля.

5.4. Мониторинг радиационной обстановки на МКС

В 2000–2001 гг. на борту Международной космической станции (МКС) проводился мониторинг радиационной обстановки с помощью радиометра Р-16, созданного в НИИЯФ МГУ. Эти исследования явились продолжением работ, начатых в 1986 г. на борту российской пилотируемой станции “Мир” с помощью аналогичного прибора.

На рис. 5.3 представлены среднесуточные дозы радиации внутри МКС по показаниям двух дозиметров Д1 и Д2, входящих в состав Р-16 и отличающихся толщиной пассивной защиты и, соответственно, пороговой энергией регистрируемых частиц. Из рис. видны значительные вариации дозы по данным низкоэнергичного дозиметра Д2, обусловленные потоками протонов СКЛ от мощных вспышек 2000–2001 гг. Особый интерес представляет период 01,01–04,01, когда отмечались минимальные значения дозиметра Д2, близкие к значениям более высокоэнергичного дозиметра Д1. Это может быть обусловлено отсутствием вспышек СКЛ в этот период, спадом интенсивности релятивистских электронов внешнего радиационного пояса из-за низкой скорости солнечного ветра и ослаблением потоков протонов внутреннего пояса на малых высотах в период максимума солнечной активности из-за увеличения плотности атмосферы.

5.5. Исследование изотопов ^7Be в верхней атмосфере Земли

В течение ряда лет, начиная с 1996 г., на спутниках серии “Космос” и “Ресурс”, НИИЯФ МГУ проводил исследования зависимости концентрации радиоактивного изотопа бериллия ^7Be в верхней атмосфере Земли от вспышечной активности Солнца. Постоянная ориентация спутников позволяла на одной стороне детектора (ориентированного по вектору скорости) собирать различные ядра, находящиеся в тепловом равновесии с окружающей атмосферой. После спуска аппарата на Землю методом гамма-спектроскопии исследовалось присутствие на пластине различных радиоактивных изотопов. Изотоп ^7Be был обнаружен во всех экспериментах.

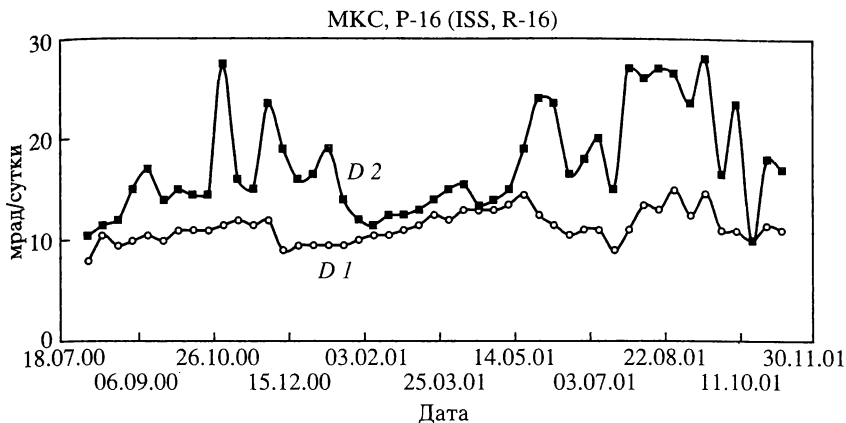


Рис. 5.3. Вариации доз радиации на борту МКС по данным прибора Р16

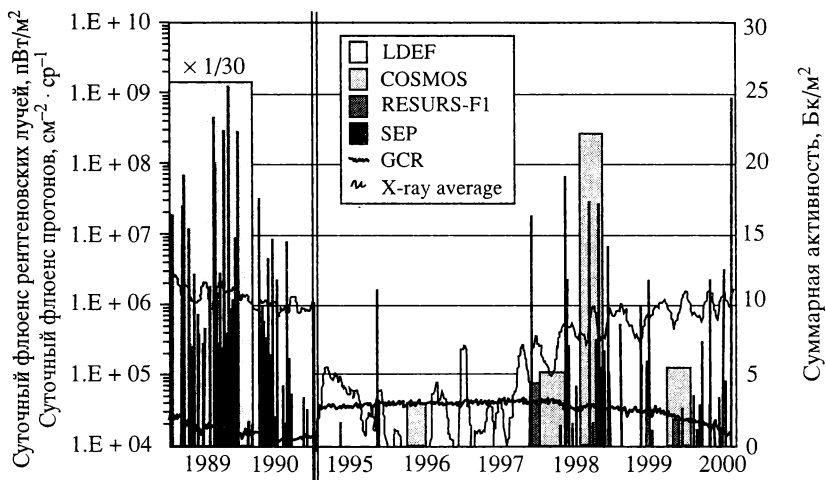


Рис. 5.4. Активность Be-7, измеренная в различных экспериментах, в зависимости от суточного флюенса солнечных протонов и рентгена

В результате многолетних спутниковых исследований потоков изотопов ^7Be в ближнем космосе доказана их солнечная природа: наиболее вероятным механизмом их генерации является взаимодействие проникающих в магнитосферу солнечных космических лучей во время вспышек (рис. 5.4).

РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПО НАПРАВЛЕНИЮ ФКИ “ВНЕАТМОСФЕРНАЯ АСТРОНОМИЯ”

Проект “Рентген-Квант”

Модуль “Квант” с астрофизическими приборами на борту был пристыкован к ОКС “Мир” в 1987 г. и проводил измерения вплоть до марта 2001 года. За 14 лет его функционирования на орбите было проведено более 3000 сеансов наблюдений и получены интересные научные результаты. До самого затопления станции “Мир” приборы модуля оставались полностью работоспособными, а сам он является мировым рекордсменом по продолжительности активной работы на орбите. На модуле “Квант” были установлены 4 прибора, чувствительных в области от нескольких кэВ до нескольких сотен кэВ: TTM/COMIS, HEXE, GSPC и Пульсар X-1.

Регулярные наблюдения источников рентгеновского излучения телескопами обсерватории “Рентген” начались в 1987 г., задолго до запуска рентгеновских обсерваторий, ASCA (1993), RXTE (1994), ВерроSAX (1996). В 1988–1993 гг. получены уникальные данные по ряду объектов, которые активно наблюдались другими обсерваториями в более позднее время.

Создан каталог рентгеновских источников по данным наблюдений телескопом TTM/COMIS обсерватории “Мир–Квант”. В каталоге приведено краткое описание рентгеновских свойств и характерные спектры разных типов источников зарегистрированных в период с 1988 по 1998 гг.

Обо всех источниках, входящих в каталог, приведена полная информация: общее количество сеансов, их суммарная экспозиция, полное время “видимости” объекта, относительное время нахождения источника в “активном” состоянии, если оно наблюдалось. Каталог содержит данные по 67 источникам, известным к настоящему времени, из которых 18 являются транзиентными, 13 являются пульсарами, 18 – барстерами и 17 – кандидатами в черные дыры, два – микроквазарами с видимым

сверхсветовым разлетом компонент GRS 1915+105 и GRO J1655-40, один – остаток сверхновой – Крабовидная туманность, две галактики NGC 4151 и CEN A и шесть рентгеновских новых. К классу рентгеновских двойных большой массы можно отнести 15 объектов, а еще 46 – к маломассивным двойным системам. Шесть из 67 объектов каталога (SMC X-1, LMC X-1, LMC X-2, LMC X-4, NGC 4151 и Cen A) являются внегалактическими. В каталоге приведен краткий анализ спектров характерных для каждого класса объектов.

В результате проведенного анализа наблюдений области Центра Галактики с 1987 по 1998 гг. был обнаружен дефицит рентгеновских всплесков I-го рода от двойных систем с малым темпом аккреции. Благодаря широкому полю зрения ($\sim 15 \cdot 15$ градусов) в апертуру телескопа одновременно попадает значительная часть массы Галактики и, следовательно, большое число рентгеновских источников. В ходе наблюдений было зарегистрировано 47 рентгеновских всплесков, из которых 33 всплеска, скорее всего, являются всплесками I-го рода, связанными с нестабильным горением гелия на поверхности нейтронных звезд. Все зарегистрированные всплески I-го рода идентифицированы с известными рентгеновскими источниками, причем светимость этих источников до и после всплеска, измеряемая телескопом ТТМ в диапазоне 2–20 кэВ, была достаточно велика. Ни одного всплеска не было зарегистрировано от источников, светимость которых в спокойном состоянии не превышает порог детектирования телескопа. Этот результат позволил получить ограничения на сочетание числа двойных источников с малым темпом аккреции и свойств рентгеновских всплесков от таких источников, в частности, максимальной светимости во время всплесков и частоты их возникновения. Один из всплесков впервые был зафиксирован от источника A1744-361, являющегося аккрецирующей нейтронной звездой.

Был проведен анализ наблюдений барстера 4U 1724-307 (1E~1724-3045) в шаровом скоплении Терзан 2 с 1971 по 2001 гг. обсерваториями Uhuru, OSO-8, Einstein, “Exosat”, телескопом ТТМ обсерватории “Мир/Квант” и приборами ASM и PCA обсерватории RXTE. Кривая блеска барстера 4U 1724-307, полученная по этим данным, показывает, что источник был переменен на масштабе 30 лет: на протяжении первых 20 лет наблюдений (1970–80-е годы) поток от источника был приблизительно на одном уровне, однако в 1990-х годах, как показали результаты обсерватории “Рентген-Квант”, поток от источника рос в течении ~ 5 лет, и приблизительно такое же время падал, приближаясь к своему первоначальному значению. В качестве объяснения пове-

дения кривой блеска были предложены такие сценарии, как, эволюция темпа истечения вещества с поверхности звезды-донора, эпизодическое появление второго источника в шаровом скоплении и гравитационное микролинзирование. Также в качестве одного из сценариев, описывается возможность влияния пролета третьей звезды на темп аккреции в системе 4U 1724-307. Показано, что если именно это событие ответственно за 10-летнее повышение светимости барстера 4U 1724-307, то можно сделать оценку размера и периода двойной системы. 4U 1724-307 ($\sim 5 \cdot 10^{10}$ см).

6.2. Проект “Гранат”

Задачей обсерватории “Гранат” (1990–1998 гг.) было проведение широкомасштабных астрофизических исследований в рентгеновском и гамма-диапазонах (от 3 кэВ до 100 МэВ), позволяющих проводить локализацию, анализ спектров и временной переменности компактных источников рентгеновского излучения (нейтронных звезд и черных дыр), детектирование космических гамма-всплесков и высокоэнергичных солнечных вспышек, поиск транзиентных космических источников, вспыхивающих лишь на короткое время. Источники рентгеновского излучения характеризуются гигантскими гравитационными и магнитными полями, колоссальными температурами плазмы (вплоть до миллиардов градусов) и плотностями энергии излучения, недоступными для исследования в земных лабораториях. В процессе наблюдений была получена важнейшая информация о природе нейтронных звезд и черных дыр – объектов Вселенной, энергетику которых определяет падение вещества в сильных гравитационных полях. Основой для продуктивной работы обсерватории, наблюдающей в жестком рентгеновском диапазоне, явился удачный выбор орбиты КА “Гранат” (апогей 200 тыс. км, период обращения 4 суток). Такая орбита позволяла проводить длительные непрерывные наблюдения вне радиационных поясов Земли, что особенно важно для детекторов, способных регистрировать рентгеновское излучение. Стабильная работа космического аппарата, позволявшего проводить наведение телескопов на заданные участки небесной сферы, хорошее угловое и энергетическое разрешение научных приборов и самоотверженная работа всех специалистов, участвующих в проекте, обеспечили успех обсерватории “Гранат”.

Впервые обнаружено раннее послесвечение яркого космического гамма-всплеска 23 июля 1992 г. (GRB920723), оказавшегося в поле зрения вторичной оптики телескопа “Сигма”. После

всплеска, длившегося около 6 с, на протяжении 1000 с наблюдалось затухающее мягкое гамма-излучение (35–300 кэВ). За это время высветилось приблизительно 20% энергии всплеска. Интенсивность послесвечения спадала по степенному закону с показателем -0.7 . В момент, когда послесвечение начинает доминировать над излучением гамма-всплеска, наблюдалось резкое уменьшение жесткости излучения. Поток в послесвечении падает по степенному закону. Это первое наблюдение послесвечения гамма-всплеска в мягком гамма-диапазоне.

По данным прибора “Фебус” в диапазоне ~ 100 –500 кэВ исследованы ранние послесвечения двух ярких гамма-всплесков 910402 и 920723 на временном масштабе до ~ 1000 с. Кривые блеска являются степенными с наклонами близкими к $-0,6$ и $-0,7$ и в момент начала послесвечения также наблюдалось резкое уменьшение жесткости энергетического спектра. В послесвечении всплеска 910402 наблюдалось увеличение жесткости наблюдаемого спектра со временем.

Проведен анализ экспериментальных данных телескопа АРТ-II, полученных в ходе наблюдений транзитного рентгеновского пульсара 4U0115+634 во время его вспышки в феврале 1990 г. Источник демонстрировал сильную регулярную и нерегулярную переменности. Наблюдались всплески рентгеновского излучения длительностью 300–500 с. В фотонном спектре источника зарегистрированы две особенности в поглощении на энергиях ~ 12 и ~ 22 кэВ, по-видимому, связанные с резонансным рассеянием его излучения на первой и второй циклотронных гармониках. Величина магнитного поля нейтронной звезды, соответствующее этим особенностям, составляло $\sim 1,3 \cdot 10^{12}$ Гс. Отношение энергий линий несколько отличалось от гармонического (1 : 2), более того, это отношение и сами значения энергий линий заметно менялись с фазой на масштабе одного периода пульсаций.

Исследованы спектральные состояния и характеристики всплесков рентгеновских барстеров. Используя данные телескопа АРТ-II обсерватории “Гранат”, был проведен подробный анализ излучения двух рентгеновских барстеров, A1742-294 и SLX1732-304, находящихся вблизи галактического центра. Показано, что излучение обоих источников в спокойном состоянии хорошо описывается типичным для ярких маломассивных рентгеновских двойных спектром с четко выраженным экспоненциальным завалом, а спектр обнаруженного низкого состояния второго источника может быть удовлетворительно описан простым степенным законом. Для источника A1742-294 впервые обнаружена зависимость профиля регистрируемых от него рентгенов-

ских всплесков от величины потока. Непосредственное измерение среднего интервала между такими событиями показало, что он оказался в несколько раз меньшим, чем предполагалось ранее. Была подробно исследована эволюция светимости и температуры источников во время особо мощных всплесков, зарегистрированных от этих источников.

6.3. Проект “Всплеск”

В российско-американском эксперименте “Конус–Винд” проекта “Всплеск” совместно с экспериментом на зонде “Улиссис” обнаружено необычное проявление активности источника Лебедь X-1. Кандидат в черные дыры номер один, Лебедь X-1 принадлежит к числу самых ярких галактических рентгеновских источников. Он наблюдается в двух состояниях активности: иногда в “мягком” с преобладающим излучением с энергией 2–10 кэВ и чаще в “жестком” с энергией излучения в области 10–200 кэВ. В 1995–2002 гг. в этом источнике были замечены интенсивные всплески гамма-квантов длительностью от 10000 до 20000 с с энергией 15–1000 кэВ. Максимальные значения потоков на порядок превышали потоки, наблюдавшиеся ранее. Интегральные потоки для этих всплесков достигали величин $\sim 3 \cdot 10^{-3}$ эрг/см². Всего было зафиксировано 5 таких событий. Для них в эксперименте “Конус–Винд” получены детальные временные и спектральные характеристики. Жесткие энергетические спектры этих всплесков позволяют предполагать, что наблюдаемые события представляют собой новый тип активности источника Лебедь X-1 со спектром близким к спектру для “жесткого” состояния. Приведенные результаты ярко демонстрируют возможности триангуляционной межпланетной сети всплесковых приборов IPN (Interplanetary Network) для локализации и исследования длительных интенсивных вспышек транзитных источников.

В исследованиях “классических” космических гамма-всплесков в экспериментах “Конус–Винд” (“Винд”), “Конус-А” (КА “Космос-2367”) и “Геликон” (“Коронас-Ф”) на большом статистическом материале проведено изучение быстрой спектральной переменности гамма-всплесков, включающее детальное изучение начальных фаз событий и тонкой временной структуры резких интенсивных пиков во временных профилях. Несмотря на ограничения, связанные с помехами на околоземных орбитах от радиационных поясов и затенения Землей, эксперименты “Конус-А” и “Геликон” играют важную роль, обеспечивая синхронную, но независимую регистрацию всплесков идентичными детекто-

рами, что существенно повышает надежность регистрации тонких деталей временных и спектральных характеристик всплесков. Полученные данные содержат большой объем информации для построения моделей механизма генерации мощных потоков излучения в источниках гамма-всплесков. Выполнена обработка временной и спектральной информации об особой подгруппе коротких гамма-всплесков с жесткими энергетическими спектрами. Необычные свойства этих всплесков вызывают значительный интерес и широко обсуждаются в научной литературе. Подробные спектральные и временные данные о более 100 таких событиях сведены в единый каталог, подготовленный в печатной и электронной формах.

Эксперимент “Конус–Винд” является одной из трех основных опорных точек межпланетной спутниковой сети, которая осуществляет высокоточную локализацию источников гамма-всплесков триангуляционным методом. Так, в 1999–2001 гг. была осуществлена высокоточная локализация более 100 событий. Это позволило провести на наземных телескопах высокочувствительный поиск активности источников всплесков в оптическом и радио диапазонах длин волн, изучить их послесвечения и связанные с ними характеристики, особенно космологические красные смещения. Эти результаты создали основу новой перспективной области астрономии и космологии и являются существенным вкладом в наши знания о космических гамма-всплесках как астрофизическом явлении.

В экспериментах “Конус–Винд” и “Геликон” в феврале 2002 г. зарегистрировано и детально исследовано новое проявление активности мягкого гамма-репитера SGR1900+14. В течение двух дней было зафиксировано несколько десятков вспышек в этом источнике. Подобное поведение SGR1900+14 уже наблюдалось ранее в мае 1998 г.

INTRODUCTION

The present report covers the three-year period (1999–2001) of fundamental space research (FSR) and is prepared by the Space Council of the Russian Academy of Sciences (RAS) on the basis of materials presented by the RAS Institutes and Higher Educational Institutions responsible for the scientific programmes of space projects of Russian Federal Space Programme.

The report briefly deals with the state of work on space projects of scientific purpose of Russian Federal Space Programme which are on the stages of the realization of flight scientific programmes, processing of space data of the completed flight programmes, experimental-design and scientific-research work. Basic characteristics of these space projects, including technological data of spacecrafts, scientific problems, complex structure of scientific apparatus and the list of main executors of the works are adduced in the enclosed “References materials to the National Report”.

Russian space projects were focused on solving essential scientific problems and tasks in the following directions of fundamental space research (FSR): space biology and physiology; the Earth observation from space; the Sun physics and solar-terrestrial relations; solar system planets and small bodies exploration; out of atmosphere astronomy; space rays physics.

For three years the principal efforts of Russian organizations and specialists have been directed to realization of the flight scientific programme of the international project “INTERBALL”; preparation for launching the Russian-Ukrainian spacecraft (SC) for complex investigation of the Sun under the project “Koronas-E”, realization of the flight scientific programme, processing and interpretation of the obtained data; creation and ground testing of “SPEKTR”-series spacecraft and scientific instrument complexes for astrophysical observation in the framework of the international projects “SPECTRUM-X-Gamma”, “Spectrum-R” (“Radioastron”) and “Spectrum-UV”.

In order to create the up-to-date scientific instruments and to conduct astrophysical observation and investigation a wide cooperation of scientific organizations of practically all developed countries including the USA, Great Britain, France, Germany, Italy, Denmark, Sweden, Spain,

Bulgaria, Poland, Israel, Japan and China was founded in the framework of the “SPECTRUM” projects.

Russian scientists took part in the international space projects of NASA, ESA, Italy and the Ukraine. At that period the detector of fast neutrons “Hand” was created within the complex experiment “Gamma+Ray+Spectrometer”(GRS) for making gamma radiation and Mars neutron radiation measurements from board the NASA spacecraft “2001 Mars Odyssey” positioned in Mars orbit, and for making maps of element composition of that planet surface. The work on creation of some Russian devices for ESA “Mars-Express” project has been conducted.

In cooperation with Italian scientists under “Pamela” project the work on creation of scientific instruments for study in the near-Earth space of fluxes of antiparticles (antiprotons, positrons, light nucleus) and their adaptation to the Russian “Resurs-DK1”-type spacecraft systems has been carried on. The Russian specialists and the Ukrainian scientists started the realization of the joint flight scientific programmes on Earth observation from space with the use of meteorological satellites “Ocean-O” and “Meteor-3”.

The specialists of RAS Institutes and foreign scientists have continued the processing of space data obtained during the realization of the completed flight scientific programmes of “Rentgen-Kvant”, “Granat” and “Interball” projects.

The RAS Institutes and Higher educational institutions in cooperation with the space-rocket organizations have been studying the technical opportunities of creating prospective spacecraft and up-to-date scientific instruments for solving actual problems and tasks of FSR. The scientific projects on that stage were selected from more than two hundred proposals on the basis of the competitive consideration of scientific purpose of the stated aims and tasks.

Chapter 1

STATE OF WORKS ON SCIENTIFIC SPACE PROJECTS OF THE FEDERAL SPACE PROGRAMME OF RUSSIA

(for January 1, 2002)

1.1. Physics of space plasma and solar-terrestrial interactions

“Interball” project (a division of DS – projects at the development stage – of the Federal Space Programme of Russia) provides a new approach to the study of physical processes in the Earth’s magnetosphere, on magnetosphere boundaries and in the interplanetary space.

Main scientific task of the “Interball” project is the study of unstable processes in the Earth’s magnetospheric tail and their coupling to the events in the auroral region of the magnetosphere as well as the study of the origin and structure of the large-scale solar wind disturbances, which are, in particular, responsible for the geomagnetic activity. These processes include:

- magnetic field line reconstruction of the magnetospheric tail in the course of the accumulation of magnetic energy;
- generation of field-aligned currents, responsible for the coupling between the ionospheric current systems and the magnetosphere;
- acceleration of electrons and ions in the magnetospheric tail and in the polar regions up to high energies;
- generation of the auroral kilometric radiation, coming to the outer magnetosphere from auroral regions;
- explosive-like release of the magnetic energy, stored in the magnetotail, and its dissipation in the form of accelerated particle beams, electric currents, ionization and heating of the ionosphere;
- sharp changes of the pattern of auroras and night sky emission, related with the absorption of the magnetospheric plasma energy in upper atmosphere.

Measurements of the plasma parameters, fluxes of energetic particles and characteristic of plasma waves are conducted simultaneously by the scientific instruments onboard of 3 Interball satellites.

Spacecraft Prognoz-M2-512 (“Interball-1”) and its subsatellite “Magion-4” launched August 3, 1995 perform the measurements of the bow shock, at the magnetospheric boundary, polar cusp and at important key regions of the Earth’s magnetotail. Flight scientific program was finished October 16, 2000.

Spacecraft Prognoz-M2-513 (“Interball-2”) launched August 29, 1996 accomplishes the measurements of electromagnetic emissions, precipitating particle fluxes, upgoing particle flows and cold plasma distributions at the northern Auroral region of the Earth’s magnetosphere. Global images of the whole auroral region in ultraviolet light showing the spatial distribution of auroras as well as their temporal dynamic during substorms could be also obtained by “Interball-2”. Flight scientific program was finished January 26, 1999.

Interball mission became one of the important constituents of the International Solar-Terrestrial Program which includes also the spacecraft Geotail (ISAS/NASA), “Wind” and “Polar” (NASA).

Interball spacecraft are designed and manufactured at Lavochkin Association (Russian Space Agency) and Space Research Institute of the Russian Academy Of Sciences.

At present the processing and interpretation of the information received in the course of Interball flight scientific programme realization are being accomplished. The results of processing are given in Chapter 3.

“Coronas-F” project (a division of DS – projects at the development stage – of the Federal Space Programme of Russia) – is a part of the International scientific programme “Coronas” (Complex Orbital Observations of Solar Activity), within the framework of which the near-earth space solar observatory “Coronas-F” was launched. The observatory is designed to study the Sun in different phases of 11-year solar cycle. The previous satellite “Coronas-I” (launched in 1994) observed the Sun close to the minimum of its activity. “Coronas-F” project instruments study the solar activity close the maximum of the current 23rd cycle. “Coronas-F” satellite was put into Earth orbit on July 31, 2001 and has the following parameters: orbital inclinations – 82,49°, min height – 500,9 km; max height – 548,5 km; the rotation period – 94,859 min. Such orbit provides continuous observations of the Sun in recurrent periods of about 20 days, which is particularly important for helioseismologic studies and monitoring of solar flares. The stabilization of space device orientation (several angular seconds per second) ensures high space resolution of the Sun observation. The realization of the flight scientific programme, processing and interpretation of received scientific information are in process.

The main scientific objectives of “Coronas-F” project are the Sun global oscillations observations and seismologic studies of its entrails

and interior structure; complex study of major dynamic phenomena of the active Sun (sunspots, flares, plasma ejections) in the wide range from optics to gamma-ray wavelength; the study of cosmic rays accelerated during active Sun phenomena, their escape, interplanetary propagation and geophysical effect.

The Head Institution charged with preparation and implementation of the mission is the Institute of Terrestrial magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences.

The Head organization charged with technical preparation of the space apparatus is the Southern Design Office, Dnepropetrovsk, Ukraine.

At present the processing and interpretation of information received in the course of “Coronas-F” flight scientific programme realization are being accomplished. The results of the processing are given in chapter 3.

Project “Coronas-Photon” (a division of DS-projects at the development stage – of the Federal Space Programme of Russia) is aimed at investigation the process of energy accumulation and its transformation to the energy of accelerated particles during solar flares, study of the acceleration mechanisms, propagation and interaction of the fast particles in the solar atmosphere. Study of the solar activity correlation with physics-chemical processes in Earth upper atmosphere.

“Coronas-Photon” mission would give the detailed information on the high energy radiation, that was “observed for some solar flares by Russian satellite “Gamma-1” and by Americans missions SMM and GRO “Compton”.

Gamma-radiation from solar flares up to very high energy 2000 MeV will be systematically studied for the first time, solar neutrons will be registered by instruments with high effective area. Measurements of linear polarization of hard X-rays will open a new channel of getting information about mechanisms of acceleration, propagation and interaction “in situ” of solar flare.

Time resolution of the gamma-ray sensor will be significantly improved up to sub-microseconds by using for the first time of the fast inorganic scintillator (YAlO_3). Measurements of the EUV fluxes of full solar disk will be done with absolute accuracy 10%, that is important for thermo-modeling of the Earth upper atmosphere.

Data of “Coronas-Photon” satellite and data of missions “Coronas-F”, “Yohkoh”, GRO “Compton”, “Soho”, “Ulysis”, “Wind” “Rhesi” and correlated observation with “Solar-B” will do an observational basis for the much better understanding of the chain of the processes in solar plasma, resulting to burst release of energy in flare and heating/acceleration of matter/particles with sequence generation of secondary observational effects.

Leading research institute responding for the onboard scientific payload of the “Coronas-Photon” project – Moscow Engineering Physics Institute (State University) – MEPhI.

Leading design organization responding for the spacecraft “CORONAS-PHOTON” – Scientific-Research Electromechanical Institute, (Moscow region, Istra).

STATE OF WORKS ON “CORONAS-PHOTON” PROJECT

1. Are determined:

- main objectives of the project, the set and designers of onboard scientific equipment;
- the type of the basic spacecraft (“Meteor-3M”), regular systems composition and companies responsible for satellite and its sub-system production;
- the type of the launcher (“Cyclon-3M”), the cosmodrome and the launching pad;
- Russian ground-based telemetry stations.

2. Design binding of the spacecraft service (regular) systems and electric power and control systems scientific equipment, taking and delivering information has been completed. All power supply interfaces have been agreed upon.

3. Preparation of technological models for the majority of scientific devices is being completed, calibration and long-duration stability tests for a part of them are in process.

4. The order of the complex development of scientific equipment has been determined, and design and construction of appropriate means has been initiated.

The scheduled date for the spacecraft launch – 2006.

“Interhelioprobe” project (a division of RS – projects at the research stage – of the Federal Space Programme of Russia) for carrying out the study of the Sun and the inner heliosphere aimed at solving the problems of the solar corona heating, solar wind acceleration, and the origin of major problems of solar activity – solar flares and coronal mass ejections.

Main scientific tasks:

- To observe the solar atmosphere with a high time and spectral resolution for studying its fine structure and small-scale dynamics, including the potential outflow region of the variable slow solar wind, as well as for establishing the microplasma processes that determine the solar chromosphere and corona heating and the acceleration of the slow and fast solar wind.
- To study the active regions, flares, ejections, and other interplanetary disturbances, as well as of temporal and spatial correlations in the Sun and in interplanetary space during partial co-rotations of the spacecraft with the Sun.

- To determine the characteristics of the solar wind, plasmas, and magnetic field in the heliosphere regions, connected with the magnetoactive belt of streamers and coronal holes, that extend from the polar to the near-ecliptic latitudes.
- To study the plasma turbulence and the processes involved in acceleration, containment, and propagation of energetic particles in the solar environment.
- To obtain stereo images of solar features and to study their 3D space-time dynamics.
- To test and improve the remote and in-situ methods for forecasting the heliospheric weather and studying solar-terrestrial relationships.

The Head Scientific organization is the Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences (IZMIRAN).

The project is in the stage of working up the possibility of settling the raised scientific tasks with the enterprises of space-rocket industry of Russia.

Project “Resonance” to study of resonance interactions of electromagnetic emissions with charged particles in the Earth’s magnetosphere.

Project main goals:

- Long-term observations of the natural phenomena, localized in the selected flux tube (dynamics of magnetospheres cyclotron maser, ring current formation, refilling of plasmosphere after magnetic storms, study of the role of the small-scale phenomena in the global plasma dynamics).
- An artificial influence on the operation of magnetospheric maser (artificial excitation and/or stimulation of wave modes; modification of the flux of precipitating particles; variation of maser Q-factor by the modification of reflection index in the ionospheric footprint of the selected magnetic flux tube).

The Head Scientific organization is the Institute of Space Research (IKI) of the Russian Academy of Sciences.

The project is in the stage of working up the possibility of settling the raised scientific tasks with the enterprises of space-rocket industry of Russia.

1.2. Extra Atmospheric astronomy

“Rentgen-Kvant” project (a division of DS – project at the development stage – of the Federal Space Programme of Russia) was aimed at studying of energy and spectrum features and temporary variability of

space X-ray sources: X-ray pulsars, low-mass binary systems, X-ray Novae, active galaxy nucleus, quasars.

The main scientific tasks of the project were determined:

- construction of the image of sky regions in X-ray and gamma bandwidths, localization of point sources;
- study of energy spectra of galactic objects and their light curves;
- monitoring the celestial sphere with the purpose of detecting new X- and gamma-ray sources at dense populated regions.

The Kvant 1 module (Kvant means ‘quantum’ in Russian) was launched on 31 March 1987 and attached to the Mir space station on 12 April 1987 and its existence was finished March 23, 2001. In the course of regular work the Kvant Module was providing “Rentgen-Kvant” observatory flight scientific programme conducting. The operational orbit of the orbital pilloted station (OPS) “Mir” allowed to conduct observations at every round with average duration of about 20 minutes. Moreover the accuracy of the station stabilization during the observation was within 2 angular minutes.

There are 4 high-energy instruments in the module: TTM/”Comis” – a coded mask imaging spectrometer, “Hexe” – a set of 4 scintillators, GSPC – a scintillation proportional counter, and “Pulsar XI” – a set of 4 scintillators. All shown experiments provided complex information about the observal source.

Head institution on scientific payload – the Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IKI RAN).

Head institution on “Mir” station – Space Missiles Corporation (SMC) “Energy”.

At present the processing and interpretation of information, received in the course of “Rentgen-Kvant” project flight scientific programme realization are being accomplished. The results of the processing are given in chapter 5.

“GRANAT” project (a division of DS – project at the development stage – of the Federal Space Programme of Russia) was aimed to investigate quasi-stationary sources and gamma-ray bursts in X-ray and gamma bands with the following construction of the image of particular sky regions with the purpose of localization of point sources in them. Relatively bright sources are under careful study via spectral analysis and monitoring their light curves.

Main scientific goals of the project:

- construction of the image of sky regions in X-ray and gamma bandwidths, localization of point sources;
- study of energy spectra of galactic and extragalactic objects and their light curves;
- monitoring of the celestial sphere with the purpose of detecting new X- and gamma-ray sources;

- analysis of gamma-ray bursts and high energy solar flares spectra and their temporal evolution.

“GRANAT” satellite launched into high-apogee orbit on Dec 1, 1989. Flight scientific program was finished 1998 and while the programme was accomplished, the features of X-ray sources-neutron stars and black holes, active Galaxy nuclei, space gamma-ray bursts and high energy Solar flares – were investigated in detail. The analysis and processing of the data received by the observatory are in progress. The results of the processing are given in chapter 5.

Head institution on scientific payload – the Space Research Institute of Russian Academy of Sciences (IKI RAN).

Head institution on “Granat” spacecraft – Lavochkin Association.

The “Burst” project (a division of DS – project at the development stage – of the Federal Space Programme- of Russia) is aimed at cosmic gamma-ray burst investigations and includes two cosmic gamma-ray burst experiments, KONUS-WIND and KONUS-A, which solve the following scientific tasks:

- detailed study of the time histories of gamma-ray bursts;
- study of the gamma-ray burst energy spectra over a wide energy range from 10 keV up to 10 MeV;
- study of the fast spectral variability of burst radiation both in the continuum and in features;
- localization of gamma-ray burst sources by two independent methods: by the autonomously localization system and by the triangulation method in cooperation with the IPN;
- search and investigation of an optical activity of the burst sources beginning from initial phase of the event registered in gamma-rays, significant refinement of localization at possible detection of an optical transient.

The realization of the flight scientific programme is in progress; the receiving, analysis and processing of data get in the course of “The Burst” project synchronous experiments are being accomplished. The results of the processing are given in part 3.

Leading organization for the KONUS-WIND and KONUS-A scientific instruments: A.F.Ioffe Physico-Technical Institute, Russian Academy of Sciences.

Leading organization for the E2U type spacecraft: M.V.Frunze Arsenal Design Bureau.

The results of the processing are given in chapter 5.

“Spectr-R” Mission (“Radioastron”) is included to the division of DS – projects at the development stage – of the Federal Space Programme of Russia and is aimed to create, jointly with the global ground-based net of radio-telescopes, a united system of Earth-Space interferometer to receive images, coordinates and angular moving of dif-

ferent universe objects with lobe width up to 8 microseconds of the arc on 1,35 cm length wave, which is 50 times higher than the resolution of the global ground-based net of radio-telescopes.

Main scientific tasks of the mission connected with syntheses of high-precision images of various Universe objects, its coordinates measurements and search their variability with the time. A beam width of the system is up to 35 microarcseconds (for spare orbit it is up to 10 microarcseconds).

The main objects that are going to be investigated by means of the “Radioastron” mission are the following: stars and planetary systems on the different stage of evolution, neutron stars (pulsars) and black holes in our galaxy, space masers structure and evolution, interstellar matter investigations, physical processes near super-massive black holes in galaxy nuclei, relativistic particles acceleration, superpower energy extraction, super-high brightness temperature and super-light motions, cosmological evolution of compact extragalactic radio sources, gravitational effects, gravitational waves, fundamental cosmological parameters and hidden mass nature.

The International project “Radioastron” intends the launch of a space 10-metre radio-telescope into the elliptic high-apogee satellite orbit. The orbit has a specially chosen regular evolution due to weak Moon gravitation influence. Satellite rotation period is about 9,5 days; perigee radius varies from 10 to 70 thousand km, apogee radius varies from 300 to 350 thousand km. The orbit evolution provides its plane rotation around the slightly changing apses axis.

Main organization on scientific complex – Astro Space Center of the Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Science.

Main organization of spacecraft – Lavochkin Research Production Association of the Russian Space Agency.

The State of work on “Radioastron” project.

1. The assembling of the full-size deployable antenna reflector of the space 10 metre radio-telescope (CRT) with 27 lobes and central mirror, made from compositional materials is completed.
2. On the ground for ground-based radio-astronomic CRT tests a bearing-rotary device is installed and adjusted. Test plans are developed.
3. Laboratory tests of the electronic CRT complex and the tests of the interferometer with zero base (without antenna) are completed.

The scheduled spacecraft launch date is 2005–2010.

“Spectrum-X-Gamma” project (a division of DS – projects at the development stage – of the Federal Space Programme of Russia) – for making observations in broad wavelength region from far ultraviolet up

to gamma radiation. The X-ray images with high angular resolution, precise spectroscopy measurements and X-ray sources timing across whole sky are provided with these experiments also.

The range of the main scientific tasks of includes considering problems of:

- cosmology (Hubble constant measurements; far galaxy clusters red shift with iron lines; estimation of super faint far X-ray sources; study of extragalaxy gas emission; measurements of angular fluctuation of X-ray background radiation; hidden mass at galaxies and clusters of galaxies search);
- extragalaxy astronomy (source spectrum and timing detailed investigation; search for far quasars and active galaxy nucleus; search for young galaxies and clusters of galaxies on formation stage);
- Galaxy astronomy and relativistic astrophysics (Black Hole and neutron stars at binary systems detailed investigation; spectrometry and polarimetry of X-ray sources; all sky X-ray monitoring to find new X and gamma ray transients; the Sun and stars burst investigation at X-ray region).

Head institution on scientific payload – the Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IKI RAN).

Head institution on “GRANAT” spacecraft – the Lavochkin Association. The scheduled SC launching date is 2005–2010.

The State of work on “Spektr–Rentgen–Gamma” Project.

1. 75% of completion testing of scientific devices on construction developing test (CDT) programme, resource testing included, have been conducted.
2. 60% of standard samples of devices have been prepared for physical refinement and calibration by radioactive sources. There are 70% of standard devices in store.
3. More than 50% amount of work on industrial manufacturing of special equipment for dealing with scientific equipment complex (SEC) have been accomplished. Not less than 50% of work have been accomplished. Further work is in progress.
4. More than 70% of programme modes of SEC vibration-static tests have been carried out.
5. Work on manufacturing of standard samples of scientific devices and units control-testing equipment for work with SEC in spacecraft flight ware is in progress.

“Spectrum-UV” Project (a division of DS – projects at the development stage – of the Federal Space Programme of Russia) is the international observatory designed for carrying out astronomical observations in the ultraviolet (UV) spectral range (91–350 nm). The observatory is equipped with the 170 sm mirrow telescope and scientific astro-

nomical devices: range camera unit for receiving images and three-channel spectrometer (resolution power from 1000 to 60000). In many respects the observatory must excel the Hubble Space Telescope in its potentialities.

The main organization on scientific complex — the Institute of Astronomy (INASAN) of the Russian Academy of Sciences.

The main organization on the Spacecraft – the Lavochkin Association. The scheduled date of SC launch is 2005–2010.

“Astrometer” Project (a division of RS – projects at the research stage – of the Federal Space Programme of Russia) is aimed at the development and insertion into near Earth orbit the optical interferometer providing the accuracy of astrometric observations up to 20 microseconds of the arc at a single measurement (over three orders above exactness of measurings, achieved in the world astronomy).

Main scientific tasks of the project are:

- A catalogue of positions for ~5000 astronomical objects with sub-millisecond accuracy.
- Determination of absolute parallaxes for any type of objects in the Galaxy and, possibly, converting to the determination of parallaxes of extragalactic objects.
- Building of an inertial coordinate system to which the motion of solar system bodies and stars of the Galaxy can be related.
- Study of the geometry of the Universe (improvement of the distance scale in the Galaxy and outside of it, study of the galactic rotation) in order to improve the knowledge of the dynamic of the Galaxy (refinement of the value and distribution of its mass including a qualitative estimate of visible and invisible components).

Main scientific organisation: Institute of astronomy RAS.

The project is in the stage of working up the possibility of settling the raised scientific tasks with the enterprises of space-rocket industry of Russia.

“Gamma-400” Project (a division of RS – projects at the research stage – of the Federal Space Programme of Russia) is aimed to determine the nature of high-energy gamma-ray space emission in the energy range above 30 GeV, where there are no experimental data till now. It is supposed to use the direct method of gamma-ray detection by measurement of energy in calorimeter and simultaneous measurements of particle coordinates. It is planned to extend the interval of recorded energies up to several TeV.

Main scientific tasks of the project are:

1. To obtain energy spectra of diffuse gamma-ray radiation to clear up the role of inverse Compton effect in formation of gamma-ray emission that can give an opportunity (in the case

of essential role of electrons) to obtain the information on the distance of the cosmic-ray source from the solar system.

2. To search peculiarities of energy spectrum in the measured energy range (up to 1–2 TeV) to solve the question about the existence of new particles (neutralino) predicted by the theory of supersymmetry and so to determine the Dark matter nature as well as the existence of “Kaluza-Klein gravitons”, which according to theories with large extra dimensions perform gravitational interaction.
3. To measure energy spectrum of gamma-ray emission from discrete sources in the energy range up to several TeV that, on the one hand, will give additional estimation criteria of an acceptability of proposed mechanisms of gamma-ray generation and, on the other hand, will allow rather authentically to combine the spectra data obtained by ground-based station measurements, recording the Cerenkov radiation of extensive air showers generated by primary gamma rays, with the direct measurement data.

The Head Scientific Institute is Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences.

Leader of the experiment – Dr. L.V.Kurnosova (the RAS Lebedev Physical Institute).

The project is in the stage of working up the possibility of settling the raised scientific tasks with the enterprises of space-rocket industry of Russia.

Project “Millimetron” (a division of RS – projects at the research stage – of the Federal Space Programme of Russia) is aimed at the creation of an international space observatory – the interferometer “Earth – Space–Space” in order to perform of astronomical investigations in millimeter, submillimeter and infrared regions with extremely high sensitivity (to a few nanoJanskies units of flux density in continuum spectrum) and extremely high angular resolution (to a parts of microsecond of arc or, possibly, nanosecond).

Main scientific tasks of the project are:

- discovery, research of origin and evolution of great number of young stars, planet systems, and even single planets, their origin and evolution, search of evidence of life in the Universe;
- investigation of most dense regions of the Galaxy (compact gas-dust complexes, globules), investigation of complex organic instances in interstellar medium;
- investigation of relativistic stages of stellar evolution including supernova explosions, white dwarfs, neutron stars, and black holes of stellar mass;
- investigation of the structure and evolution of a region around

the supermassive black hole in the Center of our Galaxy, similar and more power objects in other galaxies, processes of acceleration and interaction of superenergetic particles, generated by cosmic accelerators in these regions;

- detection of galaxies on stages of their originating, research of their following evolution, including investigation of evolution of stellar, gas-dust components of missing mass;
- investigation of early evolution stages of the Universe from recombination moment to beginning of stars and galaxies formation;
- determination of fundamental cosmological constants and investigation of nature of missing mass, study of fundamental properties of space, time and vacuum;
- high-precision astrometry for determination of distances and proper motions of stars and extragalactic objects;
- search for new types of astronomical objects.

Leading scientific organization: Astrospace Center, LPI RAN.

The project is in the stage of working up the possibility of settling the raised scientific tasks with the enterprises of space-rocket industry of Russia.

1.3. Space biology and physiology

“BioCosmos-1” Project (a division of DS – projects at the development stage – of the Federal Space Programme of Russia) is the logical development of “Bion” project and the stage of work in frame of “Bionica” project. The scientists from Rosaviakosmos, ESA, NASDA, CNES, and CSA take part in preparing of scientific program of fundamental and applied research related to “BioCosmos-1” project.

It is assumed that this project will be realized on the basis of financial contribution from all interested agencies. The preliminary date of launch – the autumn of 2005, duration of flight – 18 days.

The main goals:

- genetic, molecular biology and cellular mechanisms of adaptation of living systems to microgravity;
- role of age in adaptation of mammals to microgravity;
- mechanisms of osteopenia and muscular atrophy in microgravity;
- mechanisms of vestibular disturbances in microgravity;
- adaptation of cardiovascular system to microgravity and readaptation Earth gravity;
- effects of microgravity upon central and peripheral nervous system;

- behaviour and motor activity in microgravity;
- effects of open space upon living systems and abiogenic synthesis of peptides and nucleotides.

The biospecies used in that project are cellular and tissue cultures, unicellular organisms, insects, fish, amphibia, seeds and germs of higher plants, rats of Wistar Hannover strain (approximately 36 rats).

The leading scientific organization and coordinator of the “BioCosmos” project is the State Scientific Center of Russian Federation – Institute of Biomedical Problems of Russian Academy of Sciences (IMBP).

The leading industrial company – is the State Space Rocketry Production Research Center “TsSKB-Progress” (Samara) by the Rosaviacosmos.

The “BioCosmos-1” project scientific flight experiments will be conducted aboard the spacecraft “Bion-M”.

The State Of Work On “BioCosmos-1” Project. Representatives of ESA, NASA, CNES and NASDA thoroughly discussed the draft of scientific studies programme, onboard scientific hardware and practical problems. Preliminary agreement was achieved to conduct in the course of 18-day flight in 2005 joint experiments on rodents (rats) for studying the peculiarities of adaptation of osseous-muscular and nervous systems of young and old animals to microgravity. A list of probable experiments on the biology of cells, plants and water organisms was also considered.

“Bionika” Project (a division of RS – projects at the research stage – of the Federal Space Programme of Russia) is aimed to conduct biomedical experiments during the orbital flight.

The main scientific tasks of the project are:

- studying of fundamental problems of space life sciences;
- developing of new approaches to medical control and support of manned space flights;
- developing and testing of new technologies for the International Space Station (ISS).

Biological objects: rodents, amphibia, fishes, insects, snails, plants, cell tissues, cells, uninuclear organisms.

The leading scientific organization and coordinator of the BIONIKA project is the State Scientific Center of Russian Federation – Institute of Biomedical Problems of Russian Academy of Sciences (IMBP).

The project is at the stage of studying the possibilities to settle these scientific tasks with the enterprises of space-rocket industry of Russia.

1.4. Earth observations

“Ross-1” project (a division of RS – projects at the research stage – of the Federal Space Programme of Russia) is aimed at creation of Russian Satellite Oceanological System (“Ross-1”) for investigation of the World Ocean and monitoring of the basic climate-forming factors in the areas of intensive ocean-atmosphere interaction.

The main scientific tasks of the project are:

- registration of upward radiation at the millimeter and centimeter wave-lengths by nadir measurements with resolution of a few ten kilometers;
- estimation of wind waves parameters in the same resolution spot by nadir radar (scatterometer) at the centimeter wave-lengths;
- measuring of wind speed and direction at the millimeter and centimeter wave-lengths;
- registration of temperature and moisture parameters of soil and forest covers at the visible, SHF and IR wave-lengths.

The project is at the stage of studying the possibilities to settle these scientific tasks with the enterprises of space-rocket industry of Russia.

1.5. Space ray physics

Project “Rim–Pamela” (a division of DS – projects at the development stage – of the Federal Space Programme of Russia) is aimed to conduct the study in the near-Earth space of fluxes of antiparticles (antiprotons, positrons, light nucleus), electrons and isotope abundance in the primary cosmic rays.

The project is aimed to the following fundamental problems:

- in the domain of cosmology: baryon asymmetry of the observed Universe, the dark matter origin (relict black holes, weak interacting neutral particles, etc).
- in the domain of cosmic rays physics: galactic cosmic rays generation and propagation (nucleosynthesis, particle acceleration, interstellar space, interaction with the interstellar gas, etc).
- in the domain of heliosphere and near-Earth space physics: solar modulation of the galactic cosmic rays with different charge signs, Sun processes and solar cosmic rays, high energy particles in the Earth magnetosphere, anomalous component of cosmic rays.

The study will be carried out with the magnet spectrometer “Pamela” onboard spacecraft “Resours DK 1” № 1.

The principal organization from the Russian side for the scientific problems and for aggregate scientific instrument is Moscow State

Engineerig-Physical Institute – Technical University Ministry of Education (Cosmophysics Institute).

The principal organization from the Italian side for the scientific problems and for aggregate scientific instrument is State Institute of Nuclear Physics (branches in Rim, Frascati, Florence, Bari, Triest).

The principal organization for spacecraft manufacturing, mounting of the instrument “Pamela”, launch and flight control is State Scientific-manufacturing space-rocket Centre “TsSKB-Progress”.

The launch of the SC is scheduled for 2004.

TUS Project (a division of RS – projects at the research stage – of the Federal Space Programme of Russia) is aimed to study the ultra high energy cosmic rays (energy per particle more than 1019 eV) with the help of optical detector onboard the SC.

At the energy of about 5×10^{19} eV the cosmic ray spectrum should be “cut-off due to the Greisen-Zatsepin-Kuzmin effect: absorption on the cosmological photon background. Data of the ground-based arrays have shown that cosmic ray particles with energies $>10^{20}$ eV do exist and it put a problem of the origin of those particles. There are two hypothesis on the origin of the extreme energy particles: either they are accelerated by the “local” astrophysical objects (at distances less than 50 Mpc from the Earth), or they are a product of decay of the GUT (Great Unification Theory) particles with mass of 10^{24} eV – the “topological defects” of the Universe.

A search and study the ultra high energy neutrinos is possible due to a large mass of the air target in the observed area (1011 t in the TUS experiment).

The leading scientific institution is the Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics of the Moscow State University (SINP MSU).

The project is at the stage of studying the possibilities to settle these scientific tasks with the enterprises of space-rocket industry of Russia.

The “Nuclon” Project (a division of RS – projects at the research stage – of the Federal Space Programme of Russia) is aimed to study Space physics with the use of methods of direct cosmic ray (CR) measurements in extremely wide energy and charge range in the near-Earth space: verification of astrophysical models of high-energy CR origin, acceleration and propagation in our Galaxy; verification of astrophysical models of intrastellar nucleus synthesis with neutron capture, to investigate chemical evolution of matter in our Galaxy.

The main scientific tasks of the project are the following:

- to determine energy spectrum and chemical composition of high-energy CRs in extremely wide energy range 1011–1015 eV;
- to measure fluxes of super heavy CR nuclei beyond the iron peak up to $Z \approx 40$;
- to measure fluxes of solar and anomalous high-energy (>10 MeV) CR components.

The leading scientific organization: Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University.

The project is at the stage of studying the possibilities to settle these scientific tasks with the enterprises of space-rocket industry of Russia.

PAS Project is aimed to consider proposals on astrophysical studies with the use of thin film structures of vast areas.

The main scientific tasks are the following:

- Registration of ultra-high-energy particles in cosmic rays ($E \geq 1020$ eV);
- Search for massive charged particles as a possible candidates of the “dark matter”;
- Measurements of magnitudes and variations of the nucleus fluxes in cosmic rays allowing also for the radioactive and exotic nuclei;
- Measurements of the magnitude and gradients of the near-earth magnetic field;
- Monitoring of the micro-meteorite fluxes.

Head scientific organization – Lebedev Physical Institute of the RAS.

The project is at the stage of studying the possibilities to settle these scientific tasks with the enterprises of space-rocket industry of Russia.

1.6. Studies of planets and small bodies of the solar system

“Phobos–Soil” mission (a division of DS – projects at the development stage – of the Federal Space Programme of Russia) is aimed at the delivery of soil samples from Phobos, natural satellite of Mars, to the Earth and includes the following main scientific-technical tasks:

- determination of Phobos physical and chemical characteristics, distinctions of its internal structure, orbital and self-motion;
- landing onto the heavenly body characterized by low gravitation;
- launch from Phobos and delivery of the re-entry vehicle with the soil samples to the Earth;
- determination of the soil sample chemical composition;
- composition determination for the main rocks and their elements;
- investigation of the solar wind interaction with Phobos;
- study for the Phobos environment physical parameters (dust and gas components, space rays, magnetic field);
- remote investigation of the Mars atmosphere and surface.

Lavochkin Association is the headquarters enterprise on the design and development of a spacecraft for “Phobos-Soil” mission.

IKI RAN (Institute of Space Research of the Russian Academy of Sciences) is the headquarters organization on the problems of Mars and Phobos exploration.

The mission is planned to be realized in 2005–2010.

Project “MSP-2001” (High Energy Neutron Detector (“Hend”)) is Russian part of complex experiment Gamma Ray Spectrometer (GRS) on board of spacecraft of NASA (USA) “2001 Mars Odyssey” aimed on the measuring of gamma radiation and neutron albedo of Mars from near-planet orbit and on mapping of the surface element distribution. The project comes into DS division of the Federal Space Programme of Russia.

Head scientific organization of the project – Space Research Institute of the RAS.

The state of work on “MSP-2001” project. In February 2001 instrument HEND was delivered to the NASA launch site at Cape Canaveral and was integrated on the spacecraft “2001 Mars Odyssey”. The instrument successfully went through all tests and verifications. At April 7 2001 the spacecraft was launched to Mars.

At the present time spacecraft “2001 Mars Odyssey” has started the mapping stage of the mission from the science orbit with altitude 400 km and inclination about 90°. Instrument “Hend” works nominally with all parameters at appropriate levels.

The duration of mapping stage is 917 Earth days, January 2002 – July 2004, according to the baseline mission scenario, but the science program could be extended up to 2007 or even longer.

“Mars Express” project (a division of DS – projects at the development stage – of the Federal Space Programme of Russia) Rosaviacosmos/RAS Mars Express project (ME/R below) combines the works of Russian scientific facilities for scientific experiments of the ESA Mars Express mission:

- development of proposals for scientific experiments together with partners from the West European countries,
- design and manufacture in Russia some hardware and software for these experiments,
- participation in the planning of measurements on the orbit,
- participation in data processing, interpretation and joint publications of the future results.

Many of Russian scientists were invited as Col’s in six scientific experiments of the ME mission. It happened not accidentally. The reason is that conceptions of these experiments, and most of technical solutions are inherited from the Mars-96 mission. Our West European Mars-96 partners waited that Russia will start preparation of new mission of same type after the fail of the Mars-96 launch. It not happened, and then they concentrated themselves on creation West European mission to Mars having in mind to realize most of the important experiments

that were installed originally on the Mars-96 spacecraft. As a result the European ME mission was proposed.

ESA make decision about this mission in May 1999.

Scientific goals of the mission are targeted first of all on the studies of the history of volatiles and climate of the planet Mars. Some serious evidences of the Martian climate changes were found already. They connected directly with evolution of the volatiles and water evolution. These findings are one the most important reasons why Mars attracts a big attention of researchers. They are linked with scientific questions of highest priority including global changes on our own planet and life origin.

The leading scientific organizations from Russia are:

- IKI (“OMEGA” experiments – mapping spectrometer; “PFS” – infra-red Fourier spectrometer and “ASPERA” – plasma analyzer);
- GEOHI (HRSC-TV – planet surface stereometry camera);
- IRE (“MARSIS” experiment – longwave radar).

Mars Express spacecraft was launched on June 2, 2003 by Russian rocket “Soyuz-Fregat” from Baikonur.

1.7. Materials processing in space

“Biocrystal” research work (a division of RS – projects at the research stage – of the Federal Space Programme of Russia) is aimed at the formation of technical requirements for space facilities and appearance of scientific apparatuses to be used for priority fundamental space research in the field of protein crystal growth.

The main scientific tasks of the project are:

- the analysis of the current status-quo of the protein crystal growth problem in microgravity, and determination of ways for further progress and improvement;
- the comparative analysis of methods and apparatuses used for protein crystal growth under terrestrial and space conditions;
- the analysis of criteria for selecting proteins promising for performing crystallization processes in space;
- the analysis and prospects of employing mathematical simulation methods of heat and mass transfer processes at crystal growth from protein solutions under space and terrestrial conditions;
- arrangement of activities on performing project competition and formation of research/experimentation programme on problems of protein crystal growth under space conditions.

Leading scientific organization: Space Materials Science Research Center of the Crystallography Institute of the RAS.

The project is at the stage of studying the possibilities to settle these scientific tasks with the enterprises of space-rocket industry of Russia.

Chapter 2

RESULTS OBTAINED IN THE DIRECTION OF FUNDAMENTAL SPACE RESEARCH "LIFE SCIENCE"

2.1. Oculomotor reactions and eye-head coordination in microgravity

Research conducted in the Russian space research programs aboard biosatellites and space stations showed that microgravity significantly modifies functioning of the gravity-dependent systems interfering with their interactions established in the course of evolution. During adaptation to microgravity, the vestibular analyzer is exposed to zero gravity, the fact which, on one hand, leads to alterations in functioning of the receptor itself and, on the other, influences intersensory relations. Resulted shifts in functioning of the sensory systems give rise to a number of abnormal reactions which, taken together, culminate in motion sickness and are considered to be a result of changes of activities of the vestibular and other functions involved in regulation of the functional orientational system. In other words, the totality of abnormal reactions to microgravity can be consequent to altered functioning of the vestibular system (otolith differentiation, channel-otolith conflict, interlabyrinth asymmetry, impairment of the visual-vestibulo-proprioceptive relations), changes in the character of intersensory interactions, and peculiarities of the central integration of sensory information in this specific environment. Ways of functioning of the vestibular analyzer and the character of vestibulo-visual interactions directly modulate tracking of a visual target, one of the main components within the structure of cosmonauts' professional activity. That is why it is all-important to explore spontaneous and evoked by visual and vestibular stimulation oculomotor reactions which reflect alterations in the vestibulo-visual interactions.

Object and methods of investigations. Investigations of the vestibular function, vestibulo-visual and vestibulo-oculomotor interactions in 27 cosmonauts employed a technique of determination of spontaneous and evoked oculomotor reactions. Protocols of space experiments "Okulostim", "Optokines", "Labirinth", "Optovert" included electrooculography (EOG) recording in order to evaluate spontaneous, gaze fixation, optokinetic, and post-optokinetic eye reactions, saccadic

function, smooth tracking, vestibulo-ocular and vestibulo-optokinetic reactions. Additionally, in three cosmonauts EOG was measured using the method of video oculography with the purpose to study spontaneous oculomotor reactions and the static otolith-cervical-ocular reflex (eye torsion counter-rotation). Determined were frequency-amplitude and velocity parameters of eye movements, head movements and foveal and retinal optokinetic stimuli (OKS) movements, optokinetic nystagmus (OKN) and vestibulo-ocular reflex (VOR) gain coefficients estimated from the velocities of eye movements and OKS, and head movement velocities.

The list of reactions under study, the number of subjects in specific experiments, experimental protocols and stimuli are described below.

Results of studies. Spontaneous eye movements. No spontaneous nystagmus were recorded in cosmonauts pre flight. Study of spontaneous oculomotor activity (SOA) without additional sensory stimulation showed certain changes in magnitude and pattern in spaceflights (SF), especially in the early flight stages. During early adaptation to microgravity, investigations of virtually all subjects at rest with eyes closed showed increased spontaneous oculomotor activity in the form of floating and saccadic (square wave jerks) movements. During microgravity, 15 out of 27 cosmonauts had spontaneous nystagmus. As a rule, it was combined with the horizontal nystagmus tending to the right and the vertical one, downward.

Later on, starting from flight day 30, SOA assumed more stable character. However, eye destabilization was periodically registered in several cosmonauts; one cosmonaut, who displayed spontaneous reactions at the beginning of adaptation to microgravity, was found to once again, after long-term stay in the micro-g environment, experience vertical nystagmus of the same direction as at the start of adaptation, i.e. there were alternations of periods of compensations and decompensation.

Following extended space missions, practically all cosmonauts, particularly on the initial days of return to Earth, were characterized by elevated SOA as compared to preflight levels. Spontaneous nystagmus was registered in the majority of the cases.

Eye-fixing nystagmus (gaze nystagmus) was observed in virtually all cosmonauts at different time points of the adaptational and readaptational periods.

On Earth, each movement of the head towards the shoulder or forward-backward leads to a compensatory counter-rotation of the eye grounds in the opposite direction. In microgravity, torsion counter-rotation of the eye grounds at the head bent towards the shoulder either was absent or eyes rotated in the same direction (reflex inversion, the paradoxical reflex) suggesting a severe suppression of the

otolith function. Comparative analysis of two OCOR parameters and subjective flight tolerance showed that they are in quite high significant connection.

On Earth, each movement by the head causes compensatory counter-rotation of the eye in order to retain gaze on the target. Under the conditions of early adaptation to microgravity, head movements and eye counter-rotation were mismatched. As a rule, the ratio of head and eye velocities (the VOR gain coefficient) increased during head rotation in the horizontal plane and decreased during head rotation in the sagittal plane. Further into adaptation to the space flight conditions, consistency was recovered. However, during long-term stay in microgravity the VOR gain coefficient displayed phase dynamics.

Development of a distinct nystagmus reaction to adequate vestibular stimulation during initial adaptation was indicative of an exaggerated dynamic excitability of semicircular channels. Reduction of the velocity and amplitude of compensatory eye movements inferred drop in static (tonic) vestibular excitability. It should be noted that cosmonauts who prior to launch had demonstrated high reactivity of the vestibular system to adequate vestibular stimulation, at the beginning of spaceflight microgravity made it even greater (lowered the vestibular nystagmus threshold). Cosmonauts with initially low vestibular reactivity decreased it further during space flight.

Visual stimulus was a light spot of approximately 1 mm in diameter, which moved on the screen discretely in the horizontal and vertical directions at the angle of 10–15°.

At early flight stages the fixation capability revealed a decrease in the amplitude of gaze fixation (head fixed) in 8 cosmonauts. The largest changes were shown in vertical oculomotor reactions: amplitude of vertical gaze fixation decreased from $10,7 \pm 1,1^\circ$ to $7,5 \pm 0,4^\circ$ ($p = 0,05$). The corrective saccades were recorded.

After extensive exposure to weightlessness (flight days 145–410) a significant decrease in the vertical amplitude of the eye movements was recorded. During fixation of random vertical movements of the stimulus, the saccades were performed incorrectly in a number of cases: the eye made diagonal rather than strictly vertical movements, when EOG deviations were simultaneously recorded both at the vertical and diagonal leads.

After active head movements, horizontal gaze fixation (yaw and roll rotation) improved, but vertical gaze fixation remained unchanged.

The pursuit function was measured during linear movements of the visual stimulus point in horizontal, vertical, and diagonal directions and in circular motion. The light spot moved across the screen (at the angle 20 deg.) in random fashion at constant velocity, with a frequency of 1 Hz. When the target described a diagonal or circular motion, the pur-

suit reflex degraded (11 cosmonauts), whereas saccades remained essentially unaltered.

The largest changes were observed when the target moved in vertical direction. Early in flight (days 2–3), the pursuit reflex almostly disappeared in 5 out of 11 cosmonauts, when the target moved downwards. In this case, vestibular stimulation failed to improve the pursuit function. Threshold sensitivity of oculomotor function to optokinetic stimulation velocity was investigated with black and white bands (of about 2 deg. in size) that moved in horizontal, vertical and diagonal directions at linear velocities increasing from 1 to 20°/s. There was a marked decrease of the lower and upper thresholds of the optokinetic reaction at the beginning of the flight. Before flight the lower and upper thresholds of the optokinetic nystagmus were 5–6°/s and 12–19°/s, respectively, while on mission days 2–3 these values had decreased to 2–3°/s and 8–10°/s, respectively.

Before flight, the horizontal OKN gain was 0,6–0,7 in all cosmonauts, and was symmetrical as a rule. With regard to the vertical OKN gain, the cosmonauts could be divided in two groups. One group (11 cosmonauts) had an upward gain of $0,7 \pm 0,1$ and a downward gain of $0,5 \pm 0,08$ (gain up > gain down); the other group (10 cosmonauts) had OKN gain symmetry of $0,6 \pm 0,05$ in both directions.

During early adaptation to weightlessness (3–5 days) and long-term flights the OKN gain dynamics showed considerable individual variability, and had an undulatory character. In one group of cosmonauts (13 cosmonauts) inflight OKN was increased, sometimes decreasing gradually to preflight values in the course of the flight. In the other group (8 cosmonauts) the OKN gain was decreased during the entire mission, but occasionally it increased to preflight values. The vertical OKN gain asymmetry was periodically significantly increased (up to 25%), but it reversed in the course of a long-term spaceflight.

The largest individual changes were observed with combined optokinetic and vestibular stimulation during flight. Before flight, most cosmonauts showed reactions of visual origin in response to combined opto-vestibular stimulation. At the beginning of the flight (on day 3) optokinetic reaction was undetectable, while vestibular responses increased.

During head movements and simultaneous optokinetic stimulation, vestibular nystagmus or vestibulo-optokinetic reactions were revealed, which depended on concordance or discordance of the two stimuli. On mission day 5, decreased vestibulo-oculomotor reactions of vestibular origin and increased optokinetic reactions were observed. This may suggest that at the beginning of adaptation to weightlessness the vestibular input played a dominant role, while at the end of adaptation the visual input prevailed.

Decreased oculomotor responses to both separate and combined stimulations were observed in some cases as late as the 50th day of the mission.

The subjective optical vertical (SOV) was investigated in 10 cosmonauts during flight and in 39 during readaptation to the Earth's gravity. The accuracy of SOV perception was evaluated in total darkness with a background of a pattern of diffuse black and white spots, which did not move or moved either upward or downward. Testing of SOV perception was hampered by the simultaneous occurrence of illusions, as was clear from the recorded voice data. The preflight error deviation in SOV perception was for all cosmonauts within the physiological range ($0.1-2^\circ$). In 8 cosmonauts the SOV error was predominantly to the right. During adaptation to microgravity, the SOV error increased beyond the normal range, reaching $8-18^\circ$, and asymmetry was predominantly to the left. During a long-term mission SOV remained significantly elevated, while error dynamics had an undulating character.

Vertical linear vection (transference), induced by optokinetic stimulation with linear and sinus velocity profile, was investigated in 10 cosmonauts. In 2 subjects this was done in the initial stage of microgravity (days 3 and 6 of flight) and in 9 subjects after 30 days of long-term flights (once a month or every two months to the end of the flight).

In preflight tests there were very stable vection responses with a definite frequency maximum and steady phase response of about 180° . However, during the initial flight period vection frequency, both maximal and irregular phase reactions, was absent. Temporary directional inversion of the subjective vertical motion led to 'an inverted vection', while an upward stimulus motion led to an upward vection and vice versa. After the initial period of adaptation during long-term flights the perceptual responses were unstable, presumably because the process of adaptation alternated with periods of de-adaptation.

In weightlessness, information from the otoliths reflects the position of the body in space and its unfamiliar mode of motion. During the initial flight period the cerebral cortex cannot properly interpret this information, since it contradicts the information coming from the visual system. This situation is a result of disruption in polymodal convergence mechanisms, especially between the vestibular, visual and proprioceptive afferent inputs. In order to perform motor acts correctly and achieve appropriate spatial orientation, the central nervous system blocks out the anomalous vestibular signals, and information coming through the visual channel becomes predominant.

The results of investigations allowed to conclude, that transition cosmonauts into weightlessness was followed by an alleviation of vestibular reactions, a depression of static excitability and a growth of dynamic

excitability. During the process of adaptation vestibular excitability decreased, and vestibular channel was excluded from the sensory control of movements. At the same time the role of visual cue considerably increased.

A validity of this idea was corroborated by the results of studies of the effect of weightlessness on parameters of head and eyes movements within coordination, that provided quick and accurate gaze fixation on an object projected to the peripheral area of the retina. These experiments were done on 12 *Macaca mulatta* during their 5–14 days long space flights on biosatellites “Kosmos”, and on cosmonauts – participants of 7 days long (19 persons) and long-term SFs (29 persons). In full agreement with above mentioned data, all the monkeys showed a pronounced alleviation of vestibular responses to canal and otolith stimulations on the first day of flight manifested by an abrupt growth of a coefficient of vestibulo-ocular gain (K_{vor}) and a considerable intensifying of neuronal responses of vestibular nuclei and vestibulo-cerebellum to adequate vestibular stimulations. The oversensitivity of vestibulo-oculomotor transmission and the intensity of neuronal reactions of vestibular nuclei gradually decreased (but not of vestibulo-cerebellum remaining high throughout the flight and to the end of the flight K_{vor} in all monkeys was about 1. Close to 1,0 though exceeding it values of K_{vor} were recorded postflight also in 70% of cosmonauts-members of the crews of short-term SFs. After long-term SFs the value of K_{vor} in 25% of crew members was considerably reduced. In 3 of them K_{vor} postflight even reached 0. Such low values, hampering to a considerable extent a coordinated activity of head and eyes, were preserved after long-term SFs for 4 and more days.

The results of studies have shown that the exposure to microgravity is followed by specific oculo-motor disturbances. Their development is caused by deep alterations in the activities of the gravitodependent sensory systems and mainly the vestibular one. It is accepted broadly that the visual system not dependent on gravity in its functioning and therefore represents the most reliable informational channel under condition of microgravity.

However it is obvious that both dependent and independent on gravity systems interact closely in their task oriented activity and characteristics of their interactions define the parameters of oculomotor reactions and this way the precision of visual tracking. Thus alterations in the activities of gravitodependent sensory systems, that are resulted in the development of sensory interactions, provokes the development of abnormal spontaneous and induced oculomotor reaction, particularly in the system of visual tracking.

2.2. Microgravity effects on sensory-motor functions

Changes of sensory-motor functions appear to be the most constant consequences of space flights (SF) even those of a short duration. Deeply disturbing the activity of main proprioceptive systems (in the first place vestibular and "support" ones), weightlessness creates conditions and requirements for broad transformations in motor control systems such as a reorientation of movement control systems (CS) to another signal systems more reliable under new conditions (like vision); changes of tactics and coordination structures of movements; a modification of the character of motor synergies. Being in essence adaptive, these changes give rise to a secondary development of a number of unfavorable symptoms, that, taken together, form the pictures of syndromes of "space motion sickness", "hypogravitational ataxia", "muscular deconditioning", etc., that disturb motor abilities and working capacities of cosmonauts in SF and especially obvious after accomplishment of long-term SFs.

Since the very start of the space flights age Russian scientists provided intensive studies of basic mechanisms of intersensory interaction and activity of motor control systems under conditions of altered gravity. With the development of long-term space flights, these studies were provided within goal-oriented complex programs that included inflight research and simulations experiments on humans, pre- and postflight examination of crew members, inflight and ground based experiments on primates.

The main tasks of those studies were: i) To describe quantitatively specific features of execution in microgravity of movements, differed by their organization, modalities of feedback signals, controlled parameters, muscle groups performing the task etc; ii) To describe quantitatively under the same conditions characteristics of activities of physiological systems and mechanisms, participating in organization and realization of movements, namely, proprioceptive systems, skeletal muscles; basic reflex mechanisms; and iii) To reveal factors and mechanisms responsible for development in microgravity motor disturbances in order to determine possible ways of their prevention on one hand and to define the role of gravity factor in the activity of different motor mechanisms – on the other.

The ground base part of this program was provided mainly by specialists of IMBP in collaboration with representatives of academic institutes and universities. Flight experiments were carried out as a rule on the basis of wide international cooperation. Specialists of 10 countries took part in experiments provided on board of "Mir" Station composing the important, integral part of the Russian National Space Program.

Results of studies of execution of movements of different organization in microgravity. The wide program of studies of kinematic,

temporal and accuracy characteristics of voluntary movements that differed by their organization- programmed and tracking, muscle groups performing the task – eyes, head, hand, modalities of triggering or feedback signals – vision, audition, proprioception as well as controlled parameters- position, direction, effort -was provided in long term space flights within Russian-Austrian experimental project “Monimir” (9 crew members) and Russian-Bulgarian joint experiment “Shipka” (4 cosmonauts). Results of these studies being complemented by data obtained in similar experiments provided in 7–14 days flights of biosatellites “BION” on 12 monkeys *Macaca mulatta* as well as data of numerous ground based simulation studies (immersion, bed rest, weight suspension) showed, that ataxia was a regular consequence of gravitation unloading. Considerable disturbances of the precision control of all the preset parameters were observed in all the experiments. Thus, the amplitudes of error and variability of execution of a simple motor task (to maintain a preset level of effort) increased greatly under conditions of “dry immersion”. The same phenomena were observed when the subjects were asked either to maintain a level of electromyographic activity of calf muscles corresponding to that effort, or to execute “isotonic” movements in the ankle joint.

An abrupt decline in precision control was even more pronounced when the test of gradation of muscular efforts was performed in which subjects made a series of gradually increasing (or decreasing) muscular efforts from the minimal (absolute threshold of the scale) to the maximal one, trying to keep the difference between the consecutive at minimum (differential threshold). In weightlessness as well as in the immersion the number of grades decreased and the absolute and the differential thresholds increased greatly. After long-term SFs these shifts persisted for 3–5 and more days. Involvement of visual feedback improved the performance precision, but there appeared pronounced changes of the preset movements structure, that were characteristic to ataxia: instead of a fast and smooth approaching to the target, they acquired the character of slow, intermittent movements, approximating the distance to it.

Even more pronounced changes were caused by real and/or simulated weightlessness in characteristics of complex coordinations, such as: gaze fixation reaction, corrective postural reactions, etc. The effects of weightlessness on the mechanisms of postural control and locomotions were studied on the ground within the programs of pre-and postflight observations of cosmonauts and in simulation studies with dry immersion and head down bed rest of various duration. Only in the experiment “Posture” performed jointly by the Russian-French team the postural control mechanisms were studied on board of the space station. The goal of the research was to reveal the main factors responsible for the disturbances’ development (alterations in sensory systems functions and con-

nected to them shifts in the body scheme, changes in the state of basic reflex mechanisms, muscular alterations), as well as to examine the role of gravity in regulation of vertical posture and locomotions. The results of studies revealed a multifunctional nature of the disturbances of the above mentioned functions in weightlessness, and allowed to conclude, that the mechanisms of those disturbances were different at different stages of exposure to microgravity.

Muscular tone /stiffness/; spinal reflex mechanisms. Mechanisms of abrupt decline in strength-velocity abilities of skeletal muscles during transition into weightlessness and their fast recovery after landing for a long time were not clear. Some data, that helped to understand them, were received, suggesting a secondary neuroreflex nature of this phenomenon and studied therefore in parallel some other characteristics of neuromuscular apparatus, in particular muscular tone (stiffness), that determined a rigidity of muscular skeleton, and reflex excitability of muscles. In the first experiments (done in 24 hours after 2, 3 and 4 days long SFs) there was revealed in all cosmonauts a considerable decrease of transverse stiffness of quadriceps femoris, and a smaller decrease of this index in tibialis anterior muscle. At the same time stiffness of biceps femoris did not change. The results were confirmed later based on the data obtained on the large group of subjects.

Studies of tendon reflex characteristics in crew members of the space ships "Soyuz" SFs of 2, 3, 4 and more days duration revealed a clear growth of reflex' electromyographic amplitude. The data of literature of 70s allowed to conclude, that both phenomena – atony of extensor muscles and tendon hyperreflexia developed in weightlessness as a direct response to the decrease of gravitational loads. This conclusion was confirmed as well by the other facts revealed at the same time period, namely: development in humans during transition into microgravity flexor posture; and inhibition of EMG activities of extensors ("bioelectrical silence") along with enhancement of EMG activities of flexors both in man and in animals recorded in Keppler parabola flights during microgravity phase.

In 1980–1990th these phenomena became again an object of intensive studies. The main objectives of the research at this time were: i) evaluation of changes that developed in SFs of different duration; ii) description of their time dynamics during and after SF; iii) defining their role in development of hypogravitational disturbances in the motor system. In order to increase the reliability and accuracy of the results, methods of studies were considerably improved. Studies performed on the 2nd day after 7 days SF, revealed in all 3 heads of shin muscle a decrease of lateral stiffness for 15–20%. After long-term SFs the atony of muscles-extensors of the ankle joint reached a pathological level: muscular stiffness was completely lost, when the leg was raised, the

muscle took a shape of a drop, that could not be corrected in full even by the maximal voluntary contraction. A curve of a recovery of muscular stiffness had 2 distinct phases: an abrupt rise in the first 3–5 days and a gradual slow increase up to the preflight value during the following 7–11 days.

Studies of the support and muscular afferentation systems state after flights based on evaluation of vibratory sensitivity of the main support zones of the foot (for the 1st system), and of characteristics /threshold and maximal amplitude/ of the electromyographic response of the recruitment curve of the tendon (Achilles tendon) reflex (for the 2nd system). It was found out, that exposure to weightlessness (both short and long-term) was followed in all cosmonauts by a considerable decrease (by 50% and more) of the thresholds of vibratory sensitivity of the main support zones of the foot and a muscular hyperreflexia, manifested by an abrupt decrease of the thresholds of tendon responses. After 140–185 days SFs the reflex thresholds decreased in 4 participants up to 500 g, 300 g, 200 g and more in comparison with 1000 g registered before the flight. Besides that, a receptive area of the reflex widened, and sometimes clonic activity was observed. Changes of the amplitude of the reflex and a gradient of its growth after long-term SF differed in different subjects, decreasing to a great extent in one group and increasing in the other, and thus pointing out to an existence of a complex of factors, that determined this parameter.

Result of in inflight studies. At the end of 1980th – beginning of 1990th Russian and Austrian physiologists carried out on the OSS “Mir” a joint studies of electromyographic parameters of knee tendon reflex during long-term SFs. 9 Russian cosmonauts participated in these experiment with flight duration varying from 125 to 429 days. Results of the experiment supported the suggestion about the enhancement of the tendon reflex sensitivity in microgravity. In weightlessness the reflex response acquired a clonic character, therefore its duration increased from 50–80 ms up to 500–2000 ms and more. In the last case a duration of the initial response increased also twice as much. In the first days of flight the amplitude of the response had a tendency to decline, but starting the 2nd month it grew drastically, reaching on the 60th day of the flight the value 8–9 mv and more. The same values of maximal amplitudes were recorded also after landing.

One of the main characteristics of the systems of tonic postural control is a physiological tremor (PT). It is an integral component of any activity under conditions of Earth gravity, that require maintenance in the gravitational field of a position of body or its parts. Although a genesis of the physiological tremor and its high-frequency component (8–12 Hz) is an object of further discussions, its close connection with the mechanisms of stretch reflex and of muscle spindles functions seem

to be obvious. So, Russian and Austrian scientists examined characteristics of physiological tremor of the arm at rest and during execution of a task of maintaining an extended forward position of the arm with and without small loads. Nearly complete disappearance of the high-frequency component of PT (8–12 Hz) was revealed in weightlessness in all subjects (10 cosmonauts). A “high-frequency” silence developed just after transition into microgravity and was preserved during the whole flight, no matter how long it was. At the same time there was registered a regular “low-frequency” tremor (3–5 Hz), intensified as the flight duration grew.

A momentary change of the leading frequency in the activity of control systems during transition into microgravity pointed out directly to an alternation of the main controlling mechanisms (levels), that in its turn indicated indirectly an existence of a trigger factor, that provided a selection of different systems under conditions of 1 G and 0 G. This suggestion finds a strong support in the fact of an immediate reappearance after landing of the high-frequency component of PT that was clearly accentuated in the early postflight period in all movements under study.

Data of neurophysiological research allow to suggest that 3 phenomena registered in weightlessness, are interdependent and conditioned by a single factor, namely- by the desactivation (or an abrupt decrease of the activity) of the system of tonic muscular control triggered by alterations in activities of gravireceptor systems – otolith and support (weight bearing) ones, that are specially oriented to perception and analysis of gravitational loads and wired firmly in mechanisms of postural synergies organization.

Results of on ground simulation studies. Verification and development of this hypothesis were an initial objective of a systematic series of ground based experiments, carried out in 80s with the use of two ground based models of hypogravity, namely, Dry Immersion (DI) and Head down Bed Rest (BR). The muscle tone /transverse muscle stiffness/, motor units (MU) activity during execution of motor tasks, and spinal reflex mechanisms were thoroughly analysed.

Muscle tone (stiffness). It is obvious, that the degree of support unloading under those experimental conditions is different. In DI the body weight is distributed evenly all over the body surface thus excluding an appearance of the support gradient. In BR the support load is preserved, though being largely redistributed and addressing mainly towards large zones of the back and sides that are usually not involved in vertical posture control. In an additional series of experiments a complex effect of both immersion and bed rest was studied: 12 hours in day time the subjects stayed in DI, and 12 hours at night – in BR. 15 males participated as test subjects in these experiments; the overall duration of pure DI and DI + BR was 7 days, and pure BR – 120 days.

The results of experiments revealed under all 3 experimental conditions a constant decrease of the transverse stiffness of all three heads of shin muscle however the depth of changes as well as the dynamics of their development differed considerably. In DI the changes developed swiftly: in 6 hours of exposure it reached in more than 50% of the subjects their maximum, i.e. 40–50% of the initial value. During BR the decrease of stiffness developed slowly: maximal decline of it, averaged about 30–40% of initial value was reached as a rule between 14th and 31st day. The degree and the velocity of the development of changes under conditions of complex exposure to DI + BR were lower than in pure DI, but greater, than in pure BR. The decrease of the transverse stiffness in tibialis anterior muscle both under DI and BR conditions developed much later, and its value did not exceed.

Motor units. The results of studies of the order of motor units recruitment during execution of the maintenance of a small effort (about 10–12% of the maximal voluntary one), that were provided in the same series of experiments contributed greatly to understanding of the nature of the phenomena described above phenomena. It was shown that all subjects are capable to accomplish the task of maintaining a preset effort both in DI and BR. However, considerable shifts were observed in characteristics of MUs activity, manifested by an increase of an average duration of ISI and their variability, that was caused primarily by an appearance in the histogram of low-frequency MUs. Changes of the angle of inclination of the line of regression of dependence between standard deviation and the value of ISIs indicated, that the increase of variability of intervals anticipated the growth of their duration. In general, the shifts in MU activity characteristics pointed out to the fact, that the task of maintenance of a small preset effort in DI was accomplished by the other MU, and that the MU activity control in this case was considerably destabilized. It is well known that this phenomenon is a constant companion of states, that are characterized by a lowered afferent inflow. Changes of MU activity in BR developed clearly in a clear 2-phase. A growth of the mean duration of ISI and even greater increase of their variability was observed in the first 30 days of exposure; the latter was caused by an appearance in the histogram of a great number of extremely short (70–90 ms) and on the opposite of extremely long (250–350 ms) ISIs. In general, shifts in the MUs activity in the first month of BR the same as in DI reflected primarily changes in the order of MUs recruitment and a destabilization of the motoneurones' pool activity. Later on, as destructive processes in muscles and neuromuscular synapses developed, changes in the MUs activities reflected more and more disturbances in muscular periphery, caused by atrophic processes, namely, decrease of contractile abilities of muscle fibers (a reason for a high percentage of dupletts

in records) and disturbances of neuromuscular transmission (a reason for extra long ISIs).

Spinal reflex mechanisms. Studies of characteristics of spinal reflexes in DI and BR corroborated the above mentioned hypothesis of spinal reflex hyperactivity under conditions of hypogravity. Under both conditions in the very first days of exposures the thresholds of tendon reflexes (Achilles and knee) as well as H-reflex regularly decreased, though changes of the reflex amplitudes were not uniform. An increase of the amplitude of H-reflex was recorded on the first day in DI, but it was not stable, and on the 3rd day of exposure this index was not different from the initial value. In the BR great alterations of the amplitudes of responses on the opposite were developed along with rather modest changes of their threshold. During first 5–14 days the amplitudes of tendon reflexes increased 4 times and more (in the system of H-response the increase was not as prominent). Close to them were changes of the amplitude of the direct muscle (M) response. Since the 5th day of BR the amplitude of reflexes showed a tendency to decline (though the values still remained high), and to the 60–90th day of exposure the amplitude could reach the initial level. The dynamics of the amplitude alterations in the direct muscular response was analogous. Close similarity of the dynamic of changes in the parameters of reflex reactions to that of direct muscular response pointed out to their connection with the processes developing in muscular fibers.

This supposition was strongly supported by the results of the year BR, in which all the subjects were divided according to countermeasures protocol into 2 groups. Members of the 1st group used various physical exercises from the very first day of exposure to BR, at the same time the members of the other group during first 4 month didn't use them at all. In the first group (where countermeasures were used regularly) the dynamic of the reflex parameters changes was close to anticipated, namely, the threshold of the response gradually decreased and its amplitude increased. In the second group at the end of the 4th month the threshold of the tendon reflex exceeded the initial value and the amplitude of it was slightly decreased. With the start of physical training the threshold of reflex in this group fell down and reached the same small values of 100 g, as in the group A. At the same time its amplitude increased and reached to the 360th day the same unusually high values, as in the group A.

In general, the results of these research laid a base for the development a concept about the leading role of weight bearing (support) afferentation in organization of postural synergies according to which elimination of a support (support unloading) in weightlessness plays a triggering role for the decrease (switching off) of the activity of tonic motor system with the following secondary development of many physiological and structural effects.

2.3. Physical and radiobiological basis for improving space flight radiation safety standards

Development and functioning of International Space Station, tightening of radiation safety requirements for radiation workers and plans of interplanetary flights have resulted in the necessity of enlargement and adjustment of the knowledge in the space flights radiation safety field. A number of investigations directed at improving the methods and means of man radiation safety in space was carried out. Some of considerable results of these investigations are presented below.

On the basis of daily radiation monitoring on board the “Mir” station the database including ballistic parameters of the orbit, daily absorbed dose rate, geomagnetic and space – physics indexes was developed. First in the world practice the data of daily radiation monitoring covering the period with duration of more than twelve years was obtained. On the basis of the data from this database the quasiperiodic variations of the proton absorbed dose with the periods of one and two years were found. With taking into account these variations and the solar activity cycle the dynamics model of parameters of Earth radiation belts’ protons was developed. Usage of this model for calculating the absorbed dose on board the “Mir” station permits to estimate its accuracy. The comparison of calculation results with the adequate measured data has demonstrated that difference between the both values doesn’t exceed 30%. Such accuracy is quite enough for estimating radiation safety calculations during the orbital station flight. These estimations are fulfilled on the basis of radiation monitoring and forecasting exposure to cosmonauts during their professional activity, including the periods of space flights.

Specificity of cosmonauts’ professional exposure is determined by the two factors: character of exposure during the flight; increment of the flight fulfillment during the professional activity.

In accordance with this specificity it is possible to from two categories of professional radiation risk (RR): flight RR, determined by the probability of a cosmonauts death both during the flight and after its completion; professional risk caused by delayed consequences of the exposure.

As appeared from the definition, the flight RR consists of two components: risk connected with appearance of exposure consequences during the flight; risk connected with delayed consequences of the exposure (life-time risk).

The flight risk is connected with acute consequences of exposure by the stochastic source of space radiation-Solar Proton Events (SPE). That’s why appears the stochastic component of the flight risk, the action of which comes to an end at the moment of the flight completion. It is possible to conclude that this component of flight risk should be used for

managing the radiation safety during the flight. After its completion the action of SPE stops and the probable exposure turns into the deterministic one – doses for the completed flight give a contribution into the professional RR.

Professional RR takes into account the probability of harm development during the life-time of a man caused by the radiation factor impact. Taking into account mainly the ground applications for estimating risk, quantitative parameters of the probability of radio-induced cancer development, caused both by the professional exposure in the process of a man's work at nuclear enterprises and exposure during radiation accidents are assumed as a bases.

Thus, dualism of RR – flight risk and professional risk – takes place in the space flights. In connection with this the following question arises: How can this value used for controlling the radiation safety?

At present for these purposes life-time death probability from delayed effects excluding the cosmonaut's death during the flight, is assumed as an in-flight modern characteristic of radiation hazard. It is achieved by taking into account radiobiological components of RR and adequate structure of radiation standards. The main effect determining the cosmonauts in-flight death probability is radiation disease caused by the BFO damage. Dosimetric functional used for quantitative estimations of this RR component should reflect the distribution of red-bone marrow in the skeleton and its repairing capability after the exposure. A generalized dose is used as such a functional. As a matter of fact, it has an analogy with the effective dose recommended by ICRP for estimating risk of stochastic effects. On the basis of the generalized dose, the model of the cosmonaut's radiation death before the flight completion has been developed. Calculations for orbital stations showed that death probability caused by the BFO radiation disease (flight RR) is miserable. Its value even for the annual flight and behind the minimum thickness of shielding doesn't exceed 10^{-3} . The given estimations demonstrate that for the flight RR restriction one should choose work capacity decreasing caused by exposure, but not the death probability.

For estimating professional risk (based on the delayed effects) linear models using the fixed risk coefficient, for example, can be used. A more perfect generalized dose model can be used. Let's analyze the hazard estimation on the bases of the generalized dose that takes into account: different biological efficiency of cosmic rays, temporal and special dose distribution in a cosmonaut's body and the account of the combined action of radiation and other factors of space flight, if it is necessary. It determine the relationship between the death rate coefficient and mammals' age after the acute and chronic exposure. On the basis of this model and more precise doses of exposure to cosmonauts during the orbital space flight, the values of total RR during their life including RR

of tumors appearance were calculated. In contrast to previous approaches according to which cosmonauts' radiation standards was based on restricting radiation death during the flight and preserving the cosmonauts' work capacity after the SPE acute exposure, the modern radiation safety conception is developed on new basis. The mean requirement consists of the restriction of the total radiation risk during the cosmonaut's life by 10%. This total RR includes additional diseases, provoked by exposure and death owing to all the reasons but not only to cancer. For example, pathological changes in the CNS and the crystalline lens, induced by the exposure increase in the delayed period. Experimental investigations have demonstrated that for the brain exposure by the accelerated ions with relatively small doses the RBE coefficients can reach the value of 100. Similar high values of RBE coefficient were found while investigating animals' cataracts after the exposure to the crystalline lens by high energy ions. The analysis of data of the 45 – year medical observation of nuclear enterprises workers showed the substantial increase of number of cases of vegetative and vascular dystonia, asthenic syndrome and considerable work capacity decreasing. In addition to these effects the increase of CNS diseases, the development of cerebral atherosclerosis and brain insults.

The mentioned above exposure consequences fixed distinctly at doses exceeding 1.5 Sv where the basis for recommendation on decreasing the cosmonaut's carrier BFO doses by 4 times as compared to the previous standards. The recommended new limit is equal to 1.0 Sv. Taking into account high level of the RBE coefficient for cataracts induced by cosmic rays exposure, the carrier dose limit for eyes was recommended as 2 Sv, and skin limit was equal to 6 Sv. The main requirement for establishing these limits was the absence of considerable decrease of cosmonaut's work capacity during the flight and in the delayed period of time.

2.4. Cytogenetic studies of blood lymphocytes from OS "Mir" crews

As the duration and distance of space flights increase the radiation load on cosmonauts rises. Physical dosimetry showed that equivalent doses for a one-year space flight can reach 100–300 mSv. Assessment of risks from low doses of space radiation is an important problem of space biology and medicine. To solve this problem a series of cytogenetic studies has performed of cosmonauts' peripheral blood lymphocytes engaged in space missions on Mir station.

A total of 44607 metaphases have been scored from 21 cosmonauts, most of who took part in repeated space flights. A total of 777 aberrant

cells were scored containing 816 aberrations of various types: 126 dicentrics and centric rings, 311 acentric fragments, 344 chromatid-type aberrations and others.

The preflight sample is composed of 24549 cells. A total of 386 ($1.57 \pm 0.08\%$) aberrant cells were scored preflight, which contained 407 ($1.66 \pm 0.08\%$) chromosome aberrations: 40 ($0.16 \pm 0.03\%$) dicentrics, 160 ($0.65 \pm 0.05\%$) twin fragments, 192 ($0.78 \pm 0.06\%$) chromatid aberrations and others. It should be noted that the cosmonauts' pre-flight yields of cells with dicentrics and centric rings, being the markers of radiation exposure, exceeded those for relatively young healthy persons not occupationally exposed to ionizing radiation. The frequency of lymphocytes with dicentrics scored in the residents of Moscow region is as high as 0.02 per 100 cells. This value statistically significantly differed from the control yield of cells with dicentrics ($0.15 \pm 0.03\%$) in cosmonauts' blood lymphocytes (Student's criterion $t = 2.9$; $p = 0.005$). So far it is difficult to relate the elevated yields of dicentrics and centric rings in blood lymphocytes of cosmonauts scored preflight to any specific reasons. It is possible that this could be a result of more frequent medical X-ray exposures the cosmonauts underwent during preflight examinations.

Cytogenetic examination of 12332 cells from 17 cosmonauts after the first flight revealed 237 ($1.92 \pm 0.12\%$) aberrant cells, 56 ($0.45 \pm 0.06\%$) cells with dicentrics and centric rings, 84 ($0.68 \pm 0.07\%$) acentric fragments and 84 ($0.68 \pm 0.07\%$) chromatid-type aberrations. Besides, we analysed cytogenetic results obtained after the 2nd, 3rd and 4th space flights. It was found that after space flights the mean yield of chromosomal-type aberrations in cosmonauts' blood lymphocytes increases at the expense of dicentrics and centric rings. In particular, the frequency of cells with dicentrics rises up to $0.41 \pm 0.04\%$, exceeding the preflight yield ($0.16 \pm 0.03\%$) by about 3 times. At the same time, the yields of acentrics and chromatid aberrations do not actually change as compared to the preflight ones, being $0.65 \pm 0.05\%$ and $0.78 \pm 0.06\%$ before flights and $0.73 \pm 0.06\%$ и $0.80 \pm 0.06\%$ after flights respectively. On the whole there is a trend to a wave-like change of the frequency of dicentrics, i.e. the aberration yield increases after the first flight, then in 1–1.5 years (before the next flight) it is found to decrease, increasing again after the repeated flight. This is connected with the fact that radiation-induced chromosomal aberrations are accumulated for a space flight, and after the flight cells with aberrations are naturally eliminated from circulating blood.

It is concluded that the spontaneous level of chromosomal-type aberrations in cosmonauts' blood exceeds that from residents of Moscow region. In particular, the spontaneous yields of dicentrics and acentrics in cosmonauts' blood are as high as $0.15 \pm 0.03\%$ and $0.65 \pm 0.07\%$ cor-

respondingly. After space flights the frequency of cells with dicentric and centric rings, which are the markers of radiation exposure, are found to increase. The yields of acentrics and chromatid-type aberrations do not change after space flights. For the inter-flight period, lasting for about 1–1.5 years, the frequency of chromosomal aberrations decreases, nearly reaching the spontaneous level, at the expense of elimination of damaged cells. The chromosomal aberration yield rises again after repeated flights. There is no clear correlation between individual post-flight frequency of aberrations in cosmonauts' blood and the corresponding space flight duration, that can be related with the low dose-rate of space radiation, elimination of unreparably damaged cells with unstable aberrations, or/and other reasons.

2.5. Life support systems and optimal isotope composition in cosmonaut habitats for long-term missions

The life-support systems for space crews on the basis of the closed circulation of substances create qualitatively new, not peculiar to a terrestrial nature, situation, when the duration of the circuit of biogenic chemical elements is reduced from thousands years to about several days. In such systems in conditions of long expeditions there will be processes of repeated absorption and abjections of the same atoms of substances which are included in composition of an organism of the man, plants and animal, environments according to number of matters cycles circulation in system. Such situation for an organism in a nature never existed, in human ecology and other organisms was not considered also biological consequences it difficultly to predict.

It is quite possible, that such consequences can be connected to the selective attitude of organisms and phase transformations of matters not only to biogenic chemical elements, but also isotopes of these elements, that can result in change of their interrelations in organisms and different parts of life-support system with unpredictable consequences.

The knowledge of laws of a fractionating of stable isotopes of life-support systems, vegetative, animal organisms and man, knowledge of biological features of isotopes of biogenic chemical elements will allow to create steady optimum medium of a cosmonaut habitats.

As is known in conditions of space flight on cosmonaut the wide spectrum of the unfavorable factors influences: weightlessness, psychologic stress, radiation, increased noise etc. The search of new means and methods lowering a degree of unfavorable influence of such factors on an organisms and directed on increase to work capacity of cosmonaut, is one of major problems arising at maintenance of long space flights.

One of such methods can be the creation of cosmonaut habitat with an optimum by isotope composition of biogenic chemical elements.

In composition of cosmonauts' environment of spaceship (atmosphere, water, nutrition), vegetative and animal organisms, and also members of crews enter such biogenic chemical elements, as hydrogen, boron, carbon, nitrogen, oxygen, fluorine, sodium, magnesium, silicon, phosphorus, sulfur, chlorine, potassium, calcium, vanadium, chromium, manganese, iron, cobalt, nickel, copper, zinc, selenium, bromine, molybdenum, iodine. Most of the listed chemical elements have the stable isotopes. So the hydrogen has two stable isotopes, oxygen – three, sulfur – four, zinc – five, calcium – six, molybdenum – seven stable isotopes.

Until recently designers of life-support systems did not paid attention on a role of stable isotopes of biogenic chemical elements of cosmonauts' environment. It is natural, as the isotopes have identical electron shells. However, despite of identity of electron shells, the stable isotopes at least of some biogenic chemical elements (H_2 , C, O_2) have the various chemical, biochemical and biological characteristics. The especially strong distinctions show at comparison of a biological effect natural and heavy (on hydrogen) water. Heavy on hydrogen (deuterium) water has toxic properties: depresses growth and development of plants; at changing usual water on deuterium (heavy) water in an organism mammalian last perish. At the same time water, in which the concentrations of deuterium are reduced, shows positive biological activity.

It is logical to assume, that the stable isotopes of all biogenic chemical elements which are included in cosmonaut habitat should show various biochemical properties. And though during evolution of a plant, animals and the man adapted to environment of a habitation, remains a unknown degree of toxic properties or biological activity of this or that stable isotope of a biogenic chemical element.

However till now was not carried out regular analysis of biological activity of stable isotopes of biogenic chemical elements, the optimum concentrations of this or that stable isotope in metabolism processes in plants, animals and man are not determined, the role of life-support systems in creation of optimum isotope composition of an artificial environment of cosmonaut habitat is not considered.

In SSC RF IBMP RAS the research on optimum isotope composition of cosmonaut habitat in conditions of long-term missions were carried out in three directions: 1) research of changes of isotope composition cosmonaut habitat onboard OSS "Mir", 2) development of deuterium free water obtaining method for conditions of long space expeditions and research its medical-biological properties; 3) research of changes of isotope composition of biogenic chemical elements in an organism of the man who is taking place in conditions, simulating long space flight.

1. The change of isotope composition of some biogenic chemical elements of cosmonaut habitat onboard OSS "Mir" is investigated during 16–27 expeditions. It is shown, that drinking water, regenerated from a condensate of an atmospheric moisture by system "SRW-K2", differs on isotope composition from natural waters. The condensate of an atmospheric moisture (representing an admixture of condensed water vapour, discharged by cosmonaut in result perspiration and transpiration) also is characterized by the changed concentrations of stable isotopes of oxygen $^{18}\text{O}_2$ and hydrogen – deuterium. Water received onboard the ship "Shuttle" and transmitted aboard OSS "Mir", on 100–150 promilles is enriched with an easy isotope of hydrogen – protium and on 20–30 promilles by a heavy isotope of oxygen $^{18}\text{O}_2$. Changes of isotope composition can be explained by fractionating by their of life support systems, crew, and also consumption of drinking water delivered by the transport ship "Shuttle" on OSS "Mir".

2. The method of obtaining of deuterium free water is developed. It includes the following processes: removing of chemical admixtures from water, electrolysis of water, isotope exchange protium – deuterium, condensation of water vapour, mineralisation (saturation of water by macro and micro substances).

The choice of a method of deuterium free water obtaining is caused by theoretical fractionation factors of hydrogen isotopes (deuterium and protium). The maximal theoretical fractionation factor of isotopes of deuterium and protium has the electrolysis of water, at which on the cathode protons with formation gas (easy) hydrogen in the beginning are unloaded, and then in dependence on a degree of decomposing of water there is a discharge of an admixture of a proton and deuteron.

The procedure of obtaining of water with the lowered contents of deuterium (and consequently and tritium) consist in electrolysis up to the certain degree decomposing of water on oxygen and hydrogen with the subsequent synthesis it as a result of oxidation (burning) last in oxygen, obtaining at electrolysis of water.

The experimental installation included electrolyser with circulating electrolyte, cathode and anode space in which is divided by cationexchange membrane MF-4, circulating pompe, vessel for circulating electrolyte, gas-liquid separator, dryer of gas electrolysis products, reactor of high temperature oxidation of hydrogen, condenser and reception container for deuterium free water. Condensed water with the reduced contents of deuterium subjected to chemical and physical-chemical researches with the purpose of definition its chemical and isotope composition.

Besides water with the lowered contents of deuterium, water was used, the concentration of deuterium in which was a little bit higher usual middle ocean Water with the increased concentrations of deuterium prepared with the help of the same installation, as deuterium free

water, however in this case used water of the concentration chamber. In order to prevent influence of water structure all samples it were exposed to standardization: clearing by adsorbition method and high-temperature heating with the subsequent refrigerating up to room temperature.

Isotope composition of regenerative water determined, using a mass-spectrometric method. The small variations of isotope composition of both hydrogen (δD) and oxygen (δO_2) expressed in relative units – promilles of a deflection from the standard (SMOW). The negative values δD and $\delta^{18}O_2$ mean the lowered values of concentrations of deuterium and heavy isotope of oxygen $^{18}O_2$ in an analyzed sample in relation to SMOW, the positive values δD and $\delta^{18}O_2$ concern to their increased values.

Is found, that quantity of deuterium in protium water obtained by electrolysis, is reduced on 60–82% in comparison with the standard SMOW. In distillate water the decrease of deuterium concentration on 7% is marked, that it is possible to explain both distillation process, and that fact, that initial potable water has a little bit lowered contents of deuterium in comparison with the standard SMOW. Obtained by electrolysis water with the lowered and increased contents of deuterium used for researches of its influence on growth and vegetation of Arabidopsys and Japanese quail.

At cultivation of Arabidopsys is carried out investigation of dependence of a complete vegetation cycle duration and its separate phases under influence of various concentrations of deuterium in water used for watering.

Is established, that use of water with the changed isotope composition has resulted in change of a development cycle of plants Arabidopsys. So, the approach of the most important phase of development – blooming – is marked in the age of 17 days in variant with deuterium free water, per 19 days in control variant and in 21–22 days – in variant of use of water with the increased concentration of deuterium.

By comparison of parameters of plants pays on itself that fact, that with decrease of concentration of deuterium in water the formation of plants with the large parameters of mass, number stems, pods and seed in them is observed. Cumulative seed production of one plant Arabidopsys has made on the average 322 seed at at watering by deuterium free water, 141 seed at watering by usual distillate water and 95 seed at watering by water with a little bit increased ($dD = +355\text{‰}$) contents of deuterium.

The experimental data on a biological assessment of deuterium free water have shown positive influence it on growth and development Japanese quail. The growth rate of the birds wich used deuterium free water, was higher than growth rate of the birds used distillate water.

The positive influence of deuterium free water on productivity of birds is marked: egg-laing of female, used deuterium free water, began

on 44-th day, of female, used distillate water – on 49-th day; eggs production of birds, used deuterium free water, has made for 25 days was 65 eggs, while eggs production of birds, used distillate water, was 46 eggs; fertility of female, used deuterium free water, has set in on 44-th day, and of female, used distillate water, on 7 days later; the survival of nestlings of 2-nd generation for group, used deuterium free water, was 88,2%, and for group, used distillate water, 52,9%.

The state of an internal birds organ was estimated. Is shown, that common weight of birds and weight of the majority of an internals of birds (male), used deuterium free water, were above in comparison with weight of birds, used distillate water. The visual inspection and weighing of an internal organs of birds has shown, that at male, used deuterium free water, were well advanced gonad, as against birds, used distillate water, at which the rudiments of gonad were marked only.

The results of researches of water with the lowered concentrations of deuterium testify to its biological activity and about existence inhibitory(braking biochemical processes) mechanism of deuterium action even in insignificant concentrations. Especially brightly this effect shows at research of reproductive function, that it is possible to explain by the increased values of a hydrogen binding inherent in deuterium, and as a consequence – difficulties of DNA and RNA reduplication.

3. Earlier by us was shown, that functioning of life-support systems of space vehicles crews and the exchange processes in autotrophic and, to a lesser degree, in heterotrophic organisms are accompanied by change of isotope composition of hydrogen and oxygen (protium, deuterium, $^{16}\text{O}_2$ and $^{18}\text{O}_2$). However, remains unknown whether there is a fractionating of stable isotopes of other biogenic chemical elements: K, Mg, Ca, Fe etc. It is possible to assume, that in conditions of weightlessness the isotope composition and these biogenic chemical elements consumed by the man with water, nutrition and oxygen, will variate in process of metabolism.

The changes of isotope composition of biogenic chemical elements in medium of a habitation testify about biological unequal of stable isotopes. For last years are saved the experimental data confirming toxic action of deuterium in water, and also heavy isotope of oxygen $^{18}\text{O}_2$. The question about possible biological unequal (and is possible and toxic) of heavy stable isotopes of other biogenic chemical elements remains open. The heavy isotopes of biogenic chemical elements owe or collect in an organism and variate speeds and direction of biochemical processes (by analogy to deuterium), or to undergo stages of a fractionating and to be removed from an organism with products of an exchange (path and mechanisms of removing are not known yet), or to be indifferent in processes of metabolism. The opinion expressed that in biological systems the fractionating of stable isotopes does not take place.

In life-support systems on the basis of the closed circulation of substances in conditions of long expeditions there will be processes of repeated absorption and abjections of the same atoms of substances which are included in composition of an organism of the man and environment. The change of isotope composition of biogenic chemical elements will be realized according to number of cycles of circulation of substances in system and coefficient of a fractionating. In conditions of weightlessness the process of a fractionating of stable isotopes of biogenic chemical elements in process of metabolism can proceed with speeds which are distinct from terrestrial conditions (for example, at demineralization of an osteal fabric).

The research of a fractionating and pathes of removing of heavy stable isotopes of biogenic chemical elements was carried out in conditions of the Earth in 240 – daily experiment under the program “Sfincss-99”, that served a background for space experiments by definition of a degree of influence of conditions hermetic object on processes of metabolism (escape of calcium, deuterium etc.).

The food stuffs, waste (faeces, urine, hair, nails), and also blood (erythrocytes) were exposed to isotope analysis.

As a result of the carried out researches the fractionating of stable isotopes of biogenic chemical elements (magnesium, silicon, calcium, iron, copper) is revealed in an man organism, that testifies about biological them unequal. Common law of a fractionating of stable isotopes in an organism of the man is encrease of a lobe of heavy fractions and decrease of easy in waste. It is possible to explain such law by removing from an organism of heavy isotopes. Differently, the organism is released first of all from heavy fractions of isotopes and use mainly their easy fraction. However, encrease of a lobe of heavy fractions of stable isotopes in erythrocytes while remains by the inexplicable phenomenon. Difficultly explained effect is also absence of appreciable changes of isotope composition of such biogenic chemical elements, as sulfur, chlorine and potassium.

The laws found at research of optimum composition of biogenic chemical elements with reference to conditions of an artificial environment of a cosmonaut habitation, can find wide application in medical practice and agriculture.

2.6. Physiology mechanisms of human skeletal system changes in space flight

The human skeleton was developed under influence of Earth gravity force during millions years of evolution. This principally determined the shape of skeleton, mass and structure of bones, microarchitectonics

of bone tissue. The evolution of above ground backboneds involves pressure adaptation, that acts to overcome gravitational force.

This suggested by retrospective analysis of investigation results in evolutionary and comparative physiology. That testifies to direct correlation between the specific skeleton mass and body size of terrestrial backboneds and to absent the same correlation for water animals.

Mechanical stimulation of bone tissue due to not only gravitational force, but to muscle contraction in locomotion and posture maintenance. These formed altogether the, so called, "external mechanical field", the magnitude of which definite of bone resistance to mechanical load.

It is important that adults terrestrial animals have also very high sensitivity to mechanical stimulation. Many scientists at 19-th and beginning of 20-th century (J. Lamarck, 1809; Ch. Darwin, 1859; J. Wolff, 1892; W. Roux, 1095; K. Tsiolkovsky, 1935; I. Schmalgauzen, 1940 et al.) observed that animals possess the ability to adapt musculo-skeletal structures to the physical activities in which they are engaged. Their external shape and internal architecture of bone are continually modulated by the mechanical stimuli which are imposed on the skeletal system. The morphological and physiological modification of adult animals tissue and organs to functional demands imposed by the organism in its interaction with the environment has been referred as "functional adaptation".

According to discussed above, one may to propose, that influence of space flight factors (weight bearing loss, hypokinesia, isolation and some other) bone mass will be less as a result of adaptive remodeling of bone tissue.

That is well known in clinical practice, that hypokinesia may be cause of disease in Earth environment. The syndrome, developed in bound prolonged hypokinesia in clinic, defined as "immobilization osteoporosis".

Osteoporosis is a disease, expressed in bone mass loss in the organism, changing of bone structure and its endurance decreasing, that conduce to significant increasing of fracture risk. As many other diseases, osteoporosis, for the greater part caused by heredity or genetic features of the patient. But level of its expressing very often depends on the presence of another risk factors and its individual importance for each patients. First of all it is the deficiency of physical exercises during the living (hypokinesia). That, severally, depends on life style, characteristic of professional activity, enforced bedrest in diseases and other variants.

In any cases osteoporosis is an important medical and social problem, primarily along of increasing of bone fractures number. Following treatment and rehabilitation of these patients are very expensive. For example, in industrial countries it amount to ten billions US \$ per year

and more. The last, exactly medical, social and economic aspects of osteoporosis, to attach the more practical and fundamental importance to this, as may to come across, especial goal – to diagnose and to prevent osteopenia in the space medicine.

There are presented amounted results of bone tissue investigations in Russian cosmonauts after space flights 5-7 months duration, and results of analysis of possible mechanisms of the changes, performed during last two year, using the laboratory experience in osteopathies clinic.

Osteodensitometry equipment QDR-1000/W (Hologic, USA) was used to measure projection bone mineral density (BMD, g/cm^2), and bone mineral content (BMC, g) which is identified as bone mass, in different segments of the skeleton. The local analysis of the whole body scans consisted of BMD and BMC determination in the skull including cervical vertebra, hands, ribs, dorsal and lumbar spine, pelvis, and legs. The analysis was performed with the Whole Body V5.47 program. The lumbar spine and proximal hip were investigated by the high resolution program of subregional (local) analysis.

As it was shown earlier, directivity and magnitude of BMD changes and their sites depends on their location relative to the gravity vector, biomechanical profile and type of tissue structures. Reduction of bone mass (BMD) was consistently reduced in segments of the lower skeleton, where mean loss of mineral density during flight amounted to $-5.63 \pm 0.817\%$ in lumbar vertebrae, $-8.17 \pm 1.24\%$ in the proximal hip, neck of the hip in particular: and $-11.99 \pm 1.22\%$ in pelvic bones (BMC).

In segments of the upper skeleton (head, arms, ribs, sometimes cervical and thoracic spine) BMD (in bones of skull – BMC) changes were either absent or had a well-marked positive trend. This phenomenon is considered as a secondary reaction to the body fluid redistribution headword under the conditions of microgravity. Considering the hypothesis about possible introcranial pressure rise in the zero gravity of and data attesting stimulating effects of local venous pressure on osteogenesis, a supposition can be made that the observed phenomenon reflects the situation favorable to mineral cumulation in bone tissue and, possibly, in soft tissues of the head.

The high interindividual differences in directivity and magnitude of cosmonauts bone mass changes due to obviously on heredity. Indeed, the modern literature gathers more and more data which allow to associate width of the normal range with polymorphism of genes responsible for syntheses of bone matrix, vitamin D receptors, interleikin-6, and collagen type-1 in particular, and, possibly, collagenase and receptors of estrogen. Moreover, “predisposition” to bone loss, osteoporosis and fractures risk is also associated with different polymorphisms of these and some other genes.

The clinicophysiological evaluation of the discovered changes takes into account the WHO classification differentiating osteodeficits in humans by BMD as “normal – osteopenia – osteoporosis”. On this basis it is possible to say that group mean bone mass reduction in the lower skeleton of cosmonauts after flight do not, as a rule, go beyond the norm limits i.e. BMD do not decrease below 1SD of the peak bone mass in youth (T-scale according to the WHO classification). Individual analysis allows to reveal after flight, mainly in cosmonauts with low preflight bone mass, lumbar vertebrae BMD reduction beyond the score of $-1SD$, but not lower than $-2.5SD$ on T-score, qualified as local osteopenia.

BMD recovery in cosmonauts after 5 to 7-month flights occurs spontaneously in the process of rehabilitation actions and requires presumably fairly much time (1–3 years). However, this recovery rate should be considered sufficiently high because in clinic osteoporosis progressive at this or slower rate would not recover even under significant therapeutic treatment.

Are considered a biomechanical and metabolic hypothesis of a genesis of observed changes, having as a whole physiological character and intimations of adaptive reactions. With this purpose was performed the analysis of probable participation of different levels and mechanisms of a regulation of bone tissue metabolism: the intrinsic bone tissue, suspected composite nature of redistribution Ca^{2+} between crystalline structure, labile pool of amorphous calcium and interstitial liquid, tissue (out of bone) and system, where have to distinguish hierarchy of interdependent systems fluid volume, osmotic and ions regulation and conjugate with that a system regulation of Calcium exchange by bone effecting hormones (parathormone, calcitonin, calcitriol and other).

The conducted analysis of results of our researches and literary data allows according to the biomechanical hypothesis to suppose, that the primary (initiating) reactions develop on local (the bone tissue) level. So it is possible to suppose, that marked in experiments with animal on biosatellites “Cosmos” the decrease of strength of bones at invariable mineral parameters at early stages of flight (about 3 weeks) can be connected to changes of the physic-chemical parameters of adhesion of a “collagen – crystal”. The phenomenon, observed in the same experiments, of inhibition of early stage of osteoblasts differentiation, which can be realized by participation of local factors of a regulation, is considered as a consequent of a deficit of mechanical (deformation) load and, than, conducts to decrease of osteogenesis rate during adaptive remodeling of bone tissue. Such phenomena at a tissue level in combination to high rate of it developing can to be the cause of change of the “qualities of a bone”, that in many respects, both with value of bone mass, determines probability of fracture.

The results on biosatellites bone tissue investigation are interpreted as “sitespecific”. These are suggested the presumable or initially local causes of bone changes. That, in turn, may reflect the phenotypical peculiarities of skeletal organs, which are the amount and space distribution of noncollagen proteins in different skeletal structures. The last are responsible for bone cells interaction and regulation of sensitivity to external factors including the mechanical load.

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.

Data on changes in the bone cells activity *ex vivo* have been sustained by results of *in vitro* culture studies of following exposure to microgravity. Investigations of cultures of embryonic mice bone showed reduction of osteoid mineralization velocity and glucose consumption by the culture and simultaneous increase in mineral resorption after space flight. 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. Studies with the culture of cartilaginous cells on the “Mir” station demonstrated shrinking of colonies, degradation of mechanical stability of the cultural structure and suppression of glucoseaminoglycans syntheses (Freed). The data can infer local suppression of osteoblast histogenesis under the conditions of microgravity.

On the other hand, some changes of tissue (out of bone) factors for example, decrease of calcium – adhesion capacity of blood proteins, decreasing of Calcium absorption in intestine and reabsorption in kidney and also the some phases of rearrangement of systems of fluid volume and ions regulation (as outcome of reallocating of fluid volumes) can instigate mobilization of the Calcium from a bone for the stabilization of its concentration in a blood, thereby augmenting general bone tissue loss.

On the basis of this data analysis the hypothesis about a genesis of osteopenia is formulated: the loss of bone mass in a space flight is conditioned predominantly by local inhibition of a bone formation owing to deficit of the mechanical stimulation of bones and relative (or absolute) activation of the resorption, which initiated by rearrangement of the fluid and ion regulation system, that, in turn, connected with reallocating of body organism to the cranial direction.

The analysis of data obtained has revealed some of problems that requiring solution. The absence of the normative data about mineral density of a lot of parts of the skeleton actuates researches, directional on formation of the Russian national population BMD and BMC norms. High personal variability of changes of bone mineralization parameters makes indispensable looking up of genetic criteria for the forecast of risk

of osteopenia development. The considerable complexity of biomechanical interpretation of the data or forecast of risk of bone fracture, which one is according by an in essence non-linear interconnection “mineralization – mechanics” and possible changes of “bone quality” in space flight, leads especially researches.

In conclusion it is possible to presume that bone gravitational physiology expands our notion about pathogenesis of osteoporosis on Earth. There are ground to believe that one of the main causes of some types of osteoporosis (senil, immobilization, posttraumatic) may be the inhibition of the early stage of osteoblast differentiation. It may suggest the preference of osteogenesis stimulation by pharmacology in therapy of above mentioned types of osteoporosis.

2.7. Gravisensitivity of the cultured human vascular endothelium

It is well known that one of the effects of microgravity on human physiology is blood redistribution and changes of vascular tone regulation. Results of some studies point on the participation of vascular wall cellular elements, particularly – endothelium, in formation of organism reaction to microgravity. Endothelial cells (EC) are highly sensitive to mechanical influences such as hemodynamic conditions or pulsatile stretch. However, it is still unknown, how endothelium responds to the changed gravity, and does the sensitivity of EC to gravitational stimulus really exist.

The main aims of this study were: – the development of experimental model, allowing to study functional parameters of human endothelial cells in hypogravity conditions in vitro; – the verification of existence of endothelial sensitivity to gravitational microenvironment. Obtained results suggest that human endothelium is highly sensitive to hypogravity and responds by significant decrease of cell proliferative activity.

In the course of pilot experiments the model of human umbilical vein EC culture at changed gravity vector (long-term clinorotation) was designed allowing studying morphological and functional changes of endothelium at different stages of monolayer formation. Cell isolation and culture techniques were described earlier. Cells were cultured up to confluence in humidified CO₂-incubator (+37 °C, 5% CO₂). The confluent primary cultures were harvested with Trypsin-EDTA (GIBCO) and passaged 1:10 in gelatin-coated T-25 culture flasks (Costar). Culture flasks were filled completely by fresh medium after 18 hours, without leaving air bubbles, than additionally sealed by Paraffin tape and locked by screw caps.

The constant changes of vector gravity were created using horizontal clinostat at 5 RPM. Cell rotation was performed during 7–15 days directly in CO₂-incubator. The cell morphology was controlled by phase-contrast video-microscopy (Diaphot-TMD, Nikon). For cell counts and growth curves generation the hard copies of 10–15 random fields of view (1 mm² each) were operated.

The first and, probably, the main problem, which the authors have met – the necessity of additional adequate control development. This was related with, at first thought unessential, effect of constant medium mixing in the course of cell clinorotation, the most observable in prolonged experiments. In the steady-state cell culture system usually used for attached cells the cultures quickly “condition” the culture medium. This is related, first, with utilization of its nutrients and, second, with the secretion in the medium of cell metabolism products, including biologically active (cytokines, growth factors, etc.). Even in excessive (in the recalculation on the cell number) amounts of culture medium in static conditions of culture only its small “bottom” part is really used. So, to avoid this artifact the mixing of culture medium in the course of long experiments becomes necessary. We used the platform of horizontal orbital shaker with relatively high rotation speed (80 RPM). Periodically, the rotator is turned on for 1–2 minutes every 1–2 hours by means of the electronic timer. In the absence of air bubbles in the system the medium flow and the direct action of this factor on cells are minimal in spite of high rotation speed. This is confirmed by the results of actin cytoskeleton staining: the appearances of stress fibers typical for flow-activated EC, does not occur.

It is well known that the changes of cell proliferation are one of the firsts and the most studied events of endothelial reaction to changed microenvironment. In couple with data obtained in studies of hypogravity effects on proliferative activity of other cell types, this allows to expect that, if EC are sensitive to gravitational stimulus, they must answer by corresponding changes of proliferative activity. To check this hypothesis, we have studied some parameters of human EC proliferation and monolayer formation during clinorotation.

The obtained results suggest that the proliferative activity is significantly (at mean twice) inhibited in EC cultures exposed to hypogravity as compared to that of control cells. Similar situation was also found in subcultures the monolayer formation in which occurred in conditions of preceding hypogravity. Morphological analysis of cultures has allowed the interesting feature of monolayer formation in experimental cells. EC growing in hypogravity conditions looks more spreaded and reaches the conditions of preconfluent monolayer at lower density, than control those. However, in the few following days the density of these cultures continues to increase and they practically reach control monolayers. The

maximal EC density in confluent monolayers formed in control and exposed to hypogravity cell cultures did not differ significantly and was equal to 750–800 EC/mm². Possibly, the decreased proliferative EC activity in hypogravity is temporarily compensated by cell spreading which leads to earlier formation of intercellular contacts required for normal endothelial functioning.

Obtained results suggest that, side by side with the sensitivity to mechanical factors, the human endothelium fits for the recognition of gravitational microenvironment. Moreover, the increased degrees of cell spreading under hypogravity allows to suspect a specific reorganization of cytoskeletal structures which, in turn, opens broad prospects in further investigations of this phenomenon, both *in vitro*, and *in vivo*.

Actin filaments (F-actin) were visualized by RITC-phalloidin staining and fluorescent microscopy. In brief, EC were washed by EBSS, fixed in 4% paraformaldehyde and permeabilized by 0.2% Triton X-100 in Dulbecco's PBS. Stained cells were studied and photographed on Opton Photomicroscope III through 40X-oil immersion objective. To study EC migration activity, the wound-healing model was utilized. Confluent monolayers of control or pre-exposed to hypogravity EC were mechanically injured by nylon filament. The cell morphology and steps of re-endothelialization were controlled by phase-contrast video-microscopy (Diaphot-TMD, Nikon).

As soon as after 1–2 hrs from the start of clinorotation the cell cytoskeleton displayed dramatic changes related with actin filament thinning and their redistribution to cell borders. In the following 6–18 hrs the central area of ECs became practically free of actin fibers while the formation of a continuous F-actin band at intercellular contact area was clearly seen. By this time, the presence of depolymerized F-actin could be observed in the cell bodies. In the next 12–24 hrs actin re-organization stabilizes. In some of cells, the described changes were paralleled by the formation of "ruffled edges" enriched in F-actin.

Since both the loss of stress fibers and the ruffled edge formation are inversely proportional to the cell migrating activity, this parameter was studied in the wound-healing model. In experimental cultures as soon as in the first 30 minutes, the active EC migration begins from both edges leading to repair of up to 50% of injured zone. Simultaneously, in control, only insignificant cell migrations could be observed. The differences between groups remain in the following 2–3 hrs of experiment.

It was described previously the changes of EC morphology, actin cytoskeleton organization and monolayer repair in response to the addition to cultured cells of cAMP elevating compounds. Therefore, the experimental results obtained in this study license to propose that the reaction of human endothelium to hypogravity is, likely, related with modified activity of second messenger systems, particularly adenylate

cyclase and/or protein kinase C, and involves many aspects of cell metabolism. In conclusion, our data and results of other investigators clearly shown the different elements of cytoskeleton involve in early phase of cell adaptation to gravitational stress.

The shifts in cell migration and cytoskeleton lead to changes in cell interaction, for example between endothelium and circulating lymphocytes. Focal adhesion of immune cells to the endothelium followed by their transmigration into subendothelial space is a hallmark of several inflammatory and immune disorders. Endothelial cells participate in these events producing soluble and membrane-associated mediators able to activate blood cells functions including adhesion. In response to certain mediators, ECs redistribute cell adhesion molecules (CAMs) from storage granules or biosynthesize new proteins over a period of minutes to hours. The two families of endothelial CAMs that participate in these vital processes are the selectins, namely E-selectin (formerly ELAM-1), P-selectin (GMP-140, CD62P), and L-selectin (Mel-14, LAM-1), as well as the immunoglobulin (Ig) superfamily, which includes ICAM-1 and ICAM-2, VCAM-1 and PECAM-1. These structures play a role of receptors for corresponding ligands (counter-receptors) on the leukocyte surface. Lymphocytes bind and migrate across endothelium using, preferentially, CD11a/CD18 – ICAM-1 interaction; utilization of other receptor-ligand pairs, including VLA-4 – VCAM-1, permit them to bind to ECs in the absence of CD11a/CD18, however, this interaction appears to play a less important role in subsequent transendothelial migration. In this part of investigation we have focused our interest on the expression of endothelial CAMs and EC-leukocyte interaction in changed gravitational environment.

Human peripheral blood lymphocytes (PBLs) were isolated from heparinized blood by centrifugation on lymphocyte separation medium (LymphoSep, ICN). The mononuclear-rich interface was collected, washed twice with RPMI-1640 medium and resuspended in RPMI-1640 medium with 10% FBS. A half of PBLs was activated by the addition of phorbol ester PMA (Sigma, 10^{-8} M). Leukocyte suspensions were added to endothelial cultures and co-incubated for 30 min at 37 °C. Then, unadherent cells were gently washed out; cultures were fixed in 2.5% glutaraldehyde on Dulbecco's PBS, stained according to Giemsa, and examined in video-enforced Nikon Diaphot-TMD microscope. The surface expression of endothelial E-selectin, ICAM-1, and VCAM-1 was studied using either avidin-biotin-peroxidase techniques or flow-cytometry.

It was shown that EC cultures growing in standard conditions were formed by densely packaged polygonal or slightly elongated cells. After 24 hrs of clinorotation, practically all cells became polygonal, and the monolayer appeared more accurate. However, cell density was not affected and was equal to 805 ± 54 and 814 ± 61 ECs/mm² (control vs

clinostat). Control ECs, growing in static conditions, did not contain on their surface detectable amounts of E-selectin or VCAM-1 but were ICAM-1 positive. The addition of inflammatory cytokines, interleukin-1 or TNF- α (5–10 U/ml) within 6–8 hrs induced the appearance of E-selectin and VCAM-1, and led to significant increase of ICAM-1 expression.

After 12–24 hrs of clinorotation the cells were still E-selectin and VCAM-1 negative. However, the expression of ICAM-1 increased significantly, even without any additional cell stimulation. The strongest staining and fluorescence intensity were observed in EC cultures exposed to hypogravity in the presence of TNF- α . At the same time as hypogravity stimulated spontaneous and potentiated cytokine-induced expression of ICAM-1, its action on E-selectin and VCAM-1 expression in TNF- α co-stimulated cells was opposite. In response to low cytokine concentrations (5–10 U/ml), both the number of positively stained cells and fluorescence intensity were reduced under clinorotation comparing to static control cultures activated by the same doses of agent.

Lymphocytes poorly interacted with control ECs, and practically no adherent cells (less than 1 PBL per 10 ECs) were seen in clinorotated cultures. Activation of blood cells with phorbol ester PMA increased their ability to interact with endothelium, especially, in cultures exposed to hypogravity (1.45 ± 0.13 PBLs/EC vs 1.19 ± 0.13 in control). The stimulation of endothelium by TNF- α also enhanced PBL adhesion, however, in this case, unactivated leukocytes preferentially attached to control, and PMA-activated – to clinorotated cultures.

Thus, hypogravity specifically alters the expression of endothelial CAMs and modifies cell adhesive parameters. On the one hand, the detected decrease of E-selectin expression has negative consequences for initial steps of cellular communication of endothelium with native leukocytes since the mechanism of recognition selectin-carbohydrate fails down. On the other, – hypogravity potentiates the effect of inflammatory cytokines and stimulates itself the expression of ICAM-1 – receptor for CD11a/CD18 on leukocyte membrane. Theoretically, it might increase the adhesion of activated PBLs but, practically, has no effect by the same reason: the basal adhesion is close to zero, and there is no way to be physiologically activated. In these conditions, the full capacity of lymphocyte to adhere to endothelium is achieved only after external stimulation.

The presented results shown that long-term gravity de-orientation of mechanosensitive cells leads to re-organization cultured cell monolayer and cytoskeleton morphology, changes of cell adhesion molecules expression and cell interaction in vitro. The possible cell modification in microgravity could be involve to changes in vessel tone regulation and immunological disorders during long-term space flights.

2.8. Investigations into the effects of microgravity on the post-embryonic development of the Japanese quail

Pioneering experiments on the effects of space flight on embryonic and post-embryonic development of the Japanese quail were performed in 1990 and 1992 aboard the Russian OSS "Mir". The experiments demonstrated the feasibility of hatching healthy viable chicks of the Japanese quail in microgravity. On results of the experiment it was concluded that microgravity does not directly affect morphogenetic processes over the whole cycle of development of quail embryos. However, this first hatching of quails in microgravity brought to light a new problem of the gravitational biology, i.e. adaptation of chicks to the environment lacking the gravity vector. Observation of behavior of the quail hatchlings in the space vehicle made it clear that they could not survive in the zero-g environment without assistance. The problem of survival of newborns in microgravity stems from the behavioral reactions and their dependence on the factor of gravity. Observation of the chicks showed that all their instincts can be materialized only if they are spatially oriented. On Earth, gravity is the main factor that allows chicks to orient themselves. Absence of gravity from the very first moment of life outside the egg makes chicks completely desoriented and, consequently, devalues the inborn motor instincts. Partial compensation of the absent gravity with the help of rigid fixation of the chicks to the incubator feeder or cosmonaut's hand made it possible to save some of the instincts (pecking, visual location of a firm surface and attempt to reach this surface with the use of wings). These observations led to the conclusion about the necessity to design avian habitats and restraint devices to help chicks orient and survive in space flight.

In 1999, the joint Russian-Slovakian Quail-SK6 experiment was included into the MIR mission program for the Slovakian cosmonaut to test efficiency of artificial force of gravity in facilitating survival in and adaptation of the Japanese quail chicks to microgravity.

To make the experiment, 60 quail eggs were pre-incubated in laboratory till embryos reached the age of 13 and 14 days (30 eggs of each age) and delivered onto the space station in a transport incubator with controlled air temperature and humidity (37.5 ± 0.5 °C, $65 \pm 5\%$, respectively). After testing, 56 intact eggs (27 and 29 eggs of two age groups, respectively) were inserted in Incubator-1M for further incubation till hatching out of chicks. To handle chicks on MIR, Slovakian engineers manufactured a board centrifuge to accommodate 12 individual chick modules: 6 chicks were exposed to 0.4 g and other 6, to 0.8 g (Fig. 2.1).

To study behavior of chicks exposed to the artificial force of gravity, immediately after hatching the first 12 chicks were placed in the individual modules. To our regret, because of malfunctioning of the modules

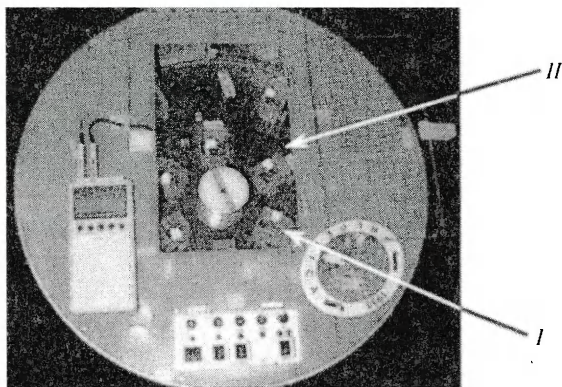


Fig. 2.1. Board centrifuge with chick modules disposed inside
I – 0.4 g level; II – 0.8 g level

the chicks experienced the artificial gravity for 15 hours. After that, they were housed in the Incubator-1M cells till the end of experiment. The chicks lived in microgravity from 4 to 5 days. This was the first time when live chicks of the Japanese quail returned from the space orbit to Earth.

The experimental material included 10 chicks brought to Earth in specially designed containers and 20 chicks that had died on Mir and been immersed in an ethylene-glycerin solution. The live chicks were investigated in 10 hours since touch-down of the descending module.

Behavior of three quail chicks hatched out on Mir was video recorded in the Quail laboratory at RF SRC-IBMP.

The following procedures were implemented: visual inspection of the chicks and detail documenting of their development; autopsy and sampling of organs and tissues for histological analysis; exarticulation of hind limbs for investigations of the musculoskeletal system of the chicks.

Biosamples from “Mir” were subjected to final fixation and dehydrated with subsequent staining of bone and cartilaginous tissues according to Dawson.

There were technical problems that prevented implementation of the whole program of the experiment. The Japanese quail chicks were exposed in the artificial gravity for only 15 hours and, therefore, the main question of whether artificial gravity can support normal postembryonic development in microgravity remained unanswered. However, the experiment is still of high significance for investigators of avian ontogenesis in the zero-g environment. It was demonstrated once again that chicks can be hatched in microgravity from eggs delivered from Earth. The chicks hatched out from quail eggs that had passed more than

Table 2.1

**Results of incubation of the Japanese quail eggs
in experiment Quail-SK6 on OSS "Mir"**

Age of embryos in quail eggs	Number of incubated eggs	Hatchlings		Dead embryos	Eggs with pecked shell
		Number	%		
14 days	27	21	77.8	6	0
13 days	29	15	51.7	6	8

2/3 of incubation time on Earth with embryos on the stage of development characterized by acute sensitivity to unfavorable environment. However, hatchability was found much better than predicted (Table 2.1). Mean hatchability made up 64.3%. The chicks broke the shell on days 17.5–18 suggesting normal development. Hatchlings were active. From the table it can be seen that hatchability from the eggs of the first and second groups was 77.8% and 51.7%, respectively.

Behavior of the chicks on return from the space flight exhibited significant deviations: they refused to eat and drink and staggered. Noticeable was an unusual posture of resting chicks: they dropped the head as low as to the level of feet and turned it left. During motion the chicks displayed an extreme discoordination: unsteady walk with the body turned forward or backward falling on the right or left side. Wings of the chicks were not pressed to the body but slightly moved aside. The chicks walked with embowed finger phalanges. When thrown up, chicks would land on the hind part of the body but not on feet. Unfortunately, we could watch behavior of the chicks in the 1-g gravity for one hour and a half only and as they began to die.

Visual inspection of the space chicks did not reveal any abnormalities in their development. Yet, it should be said that appearance of these chicks was different from that of the controls: they had embryonic plumage (fluff), traces of meconium on the legs, and flabby body muscles, cervical particularly. Biometrics of the space chicks evidenced severe atrophy. The chicks weighed 5.8 ± 0.7 g on the average in contrast to the controls with a body mass averaging 8.2 ± 0.1 grams. This was associated with inability of the chicks to feed by themselves so that they had to live on remnants of the yolk sucked into the abdomen prior to hatching.

Examination of the musculoskeletal apparatus of the chicks developed in the absence of functional gravitational loading from the moment of birth is of great interest. Morphological investigations of hind limbs were performed in 14- and 16-day embryos and in chicks that had stayed alive in microgravity for 4 to 5 days. Under the 1-g conditions, the skeleton of 14-d embryonic limbs was fully shaped and had

the anatomy of adult bird. In this period, the cartilaginous rachis gets calcified by way of lime deposition in the inter-cellular space and inside the bone marrow on the internal surface of the perichondrium. From the central point of diaphysis ossification spreads out onto epiphyses which remain cartilaginous and sustain the longitudinal growth of bones. After 16 days of development, the process slows down. From the moment of hatching the skeleton gets a new stimulus for growth due to availability of the stock of proliferating chondrocytes in the metaphyses of long bones after they had entered the stage of swelling and subsequent resorption. After 4 to 5 days of life in the weightless environment, the chicks were found to be behind their laboratory controls with respect to the growth of the limb skeleton. Length of the femur in the space chicks was by 24.1% shorter as compared with the laboratory controls. Ossification areas of the skeleton of the space chicks were also shorter when compared with the controls (for example, femoral ossification areas were shorter by 23.1%). However, percent of the hindlimb ossification (ratio of the ossification area to the total bone length in per cent) in the space chicks did not differ from that in the laboratory control ($87.23 \pm 0.98\%$ vs. $89.81 \pm 1.74\%$). This may be explained by the fact that 2/3 of the time of development of the embryos took place in Earth's gravity which could have influenced progress of skeletal osteogenesis in the chicks. The earlier experiments on Mir provided data indicating retardation of ossification in 14- and 16-d embryos and chicks that stayed in microgravity 2 to 3 days after hatching out. Electrograms of hindlimb muscle tissues (m. gastrocnemius) of the chicks that had been exposed in microgravity from 4 to 5 days identified fibers on the phase of differentiation: Z-lines were zigzag-shaped or double, poorly visible I and A-lines, mitochondria in places had larger sizes and lined up in a row longer than a sarcomere. Internal membranes of mitochondria were thickened and vacuolated, the sarcotubular system contained expanded tubules and the myofibril cytoplasm had numerous adipose vacuoles. Though the postembryonic period was short, data of the investigation suggest a rapid development of degenerative changes in the anti-gravitational musculature which is consistent with the concept known in pathophysiology as the atrophy of disuse formulated on an empirical assumption regarding consequences of underloading or complete neglect of a body function.

Experiment Quail-SK6 on Mir aimed at studying the postembryonic development of the Japanese quail in microgravity was also an attempt to use artificial force of gravity to facilitate survival of the chicks. Unfortunately, it was unsuccessful because of the centrifuge failure. Results of the experiment gave one more proof that chicks cannot survive in the zero-g environment without aid. Based on the experimental data, the problem of survival of newborn chicks in microgravity ari-

ses not only from their behavioral reactions but also development of the musculoskeletal system.

Investigation of the postembryonic development of the Japanese quail showed that microgravity alters both the external and internal environment of living organisms. Their adaptation and survival in microgravity may be dependent equally on compensation of changes in the external and internal environment. For animals counteraction to the negative physiological effects of microgravity is a big challenge. The first approach to the problem was fruitless and must be resumed. Continuation of the studies of artificial force of gravity as a countermeasure is necessary not only from the standpoint of designing life support systems for manned vehicles but also for better understanding of the limitations for and adaptability of living organisms in microgravity.

2.9. Growth and development of wheat in a sequence of generations under the spaceflight conditions of the OSS "Mir"

Over the past 30 years researchers from different countries have performed a large number of investigations aimed at development of biological life support systems (BLSS) for humans beyond the terrestrial biosphere. These systems can vary in the biocenotic structure depending on their purpose, operating life, dimensions, and power supply. One of the main functions of BLSS for humans who are going to stay long time outside the biosphere (interplanetary voyages, extraterrestrial outposts) will be production of vegetable and animal foods. The higher plant subsystem should provide chief crops (wheat, rice) to supplement crew diet with carbohydrates and vegetable proteins. Prerequisite for development of the BLSS higher plant subsystem is test evaluation of cereal crop yield in pressurized modules including habitats of space vehicles.

Cultivation of wheat from seed to seed in greenhouse Svet aboard the space station Mir was the peak of a series of space experiments with wheat in various plant growth chambers. Thus, in 1988 growth and development of wheat cultivar Erythrospermum-841 were studied in device Svetoblok-M in a 19-d "Mir" experiment. Mass and leaf surface area of the space-flown plants were found to be 2–2.5 times smaller in comparison with the ground control. Causes of the growth inhibition were not established, as design of the device did not permit monitoring of crop parameters and active ventilation. In 1991, the device was used again to grow a crop of super-dwarf wheat in a 157-d spaceflight experiment. The result was one plant with a booting sprout. Since light intensity in Svetoblok-M is too low to yield wheat seeds, the control experi-

ment was also seedless. On return to Earth, the plant was put under a brighter light to continue growth. However the spike formed in the space flight was barren.

In 1993, super-dwarf wheat germinated on Earth in the U.S. Plant Growth Unit (PGU) prior to the launch in a space shuttle. The crop grew in orbit for 10 days. Postflight investigations showed that the conditions of space flight reduced crop photosynthesis and, consequently, mass of the space crop by 25% as compared with the control.

In 1995, an experiment with plants in system Astroculture was included in the program of NASA space shuttle mission STS-63. Plants of *Brassica rapa* and 4-d old super-dwarf wheat were taken up into one growth chamber in which they made the 8-d space flight. It was shown that the root medium in the space experiment was marked by elevated hypoxia. When compared with control values, the alcohol dehydrogenase activity was increased by 248–304% in roots of the wheat and by 334–579% in roots of *Brassica rapa*.

The first experimental cultivation of the super-dwarf wheat in greenhouse Svet was undertaken in 1995 within the science program of the Russia-US project “Mir”/Shuttle. In this 90-d space experiment the normal ontogenetic development of the plants was disturbed by the sum of environmental factors and low overall crop illumination (because of a technical failure). The plants were small in size, formed 12–16 leaves with a thin leaf plate (vs. 7 leaves in the preflight control) and no heads. In the delayed synchronous control in which we reproduced main parameters of the space crop environment harvested were plants with characteristics different from those of the space plants. Specifically, the synchronous control crop developed heads but they were barren. It meant that the space wheat crop had been stressed not only by the weak illumination but also some other factors.

In 1996–1997, we made another experiment with super-dwarf wheat (Greenhouse-2) within the “Mir”/NASA space science program. In this experiment, duration of the wheat vegetation cycle as well as separate phases of the cycle was equal to what had been observed in preflight laboratory experiments. Dry mass of a plant did not differ in the experiments but the space plant had 2.7 times as many sprouts with heads as in the preflight control. Sprouts of the space plants were noted to be half as long as the laboratory controls. None of the space heads contained seeds. The structure of heads was strikingly different from that in the preflight controls. Mass of the heads was half as much, florets and palea awns were short, spikelets in the heads were less in number but the mean number of florets in the spikelets was increased.

It was demonstrated in the experiments that the most profound changes in the production and morphometric parameters of the space super-dwarf wheat were caused not by the specific spaceflight factors

Table 2.2

Main characteristics of wheat cultivar Apogee cultivated in greenhouse Svet in the space and laboratory experiments

Parameter	Space experiment	Laboratory experiment (w/o ethylene)	Laboratory experiment with air ethylene (1.1 mg/m ³)
Duration of the full vegetation cycle, days	70–82	80–83	75–80
Dry mass of one plant, g	3.64	3.05±0.86	1.70±0.28
Number of sprouts with heads per a plant	2.4	2.8±0.4	3.0±1.0
Height of a plant, cm	35.3±3.1	44.8±2.8	27.7±1.1
Culm length, cm	26.2±2.0	36.2±3.1	18.9±4.2
Head length, cm	8.3±1.8	6.5±0.7	5.6±1.0
Number of spikelets in a ripe head	16.0±2.0	16.0±2.0	11.0±2.5
Number of florets in a spikelet	4.0±1.0	4.0±1.0	4.0±1.0
Amount of seeds per a plant	42.3	68.3	13.1
Caryopsis mass, mg	18.1±6.1	32.0±9.1	29.9±5.0

but primarily by phytotoxic ethylene, the atmospheric concentration of which by the time of the experiment amounted to 0.3–1.8 mg/m³. This increased level of ethylene in atmosphere was the factor in the abnormal development of the male generative organs of wheat.

Preparation for space experiment Greenhouse-4 approved for the Russian space research program in 1998–1999 was made with due consideration for this experience. The experiment on growth, development and reproduction of wheat was performed in greenhouse Svet aboard “Mir”.

Ground-based experiments helped select cultivars of super-dwarf wheat that would feel comfortable in Svet and, besides, distinguished by partial resistance of the reproductive organs to the air concentration of ethylene up to 1.1 mg/m³. Preference was given to cultivar “USU-Apogee” purposefully developed to be fit for greenhouses as subsystems of various bio-regenerative life support systems.

Table 2.2 presents the main parameters of wheat cultivar Apogee harvested in Svet in experiment Greenhouse-4 in comparison with data of the ground-based investigations. Of interest is the fact that same as with the super-dwarf wheat, duration of the full vegetation cycle of this cultivar was not noticeably altered by the space flight.

Comparison of the morphometric and yield parameters of cultivar Apogee shows that some of the spaceflight values of these parameters take an intermediate position. The key outcome of the experiment were 508 seeds from 12 plants which is by 38% lower than the laboratory yield but at the same time by 69% higher than the yield of the wheat crop cul-

tivated in the atmosphere with elevated ethylene (1.1 mg/m^3). In the space experiment, mass of the seeds was smaller in comparison with the laboratory tests on both stages. There is no possibility to identify quantitatively which of the spaceflight factors had provoked these changes, as in the period of the experiment with the Apogee wheat atmospheric ethylene on "Mir" was not measured. Concentration of this compound was presumably below 1 mg/m^3 measured in the earlier space experiments and reproduced in laboratory with the purpose to establish dependence of yield of this wheat cultivar on atmospheric ethylene.

Reduction of the ethylene concentration in the space station atmosphere could have been due to operation of catalytic air scrubber PKF-T which was installed in November, 1998 and set for the high-temperature mode.

Results of this space experiment demonstrated for the first time feasibility to grow cereal crops from plants that had passed the full vegetation cycle in a space vehicle. This supports the earlier conclusion that microgravity does not directly impact the elementary genetically determined biological processes including growth, development and reproduction of plants.

Studies of growth and development of a sequence of plant generations in space flight were the purpose of Russian experiment Greenhouse-5 conducted in 1999. Terrestrial and "space" seeds of wheat cultivar "Apogee" (gathered in experiment Greenhouse-4) were planted in greenhouse Svet on Mir.

Twenty plants from the terrestrial seeds and one plant from the space seeds reached the complete biological ripeness at the age of about 80 to 90 days.

Both in the laboratory and space flight the repeated use of root modules for wheat cultivation from terrestrial seeds produced plants biometrics of which was a little worse as compared with the plants of the first crop (Table 2.3). For instance, dry mass of a plant in the second crop made up approximately 40% both in the space and ground control experiments. The parameter of the amount of seeds per a plant was found to be more sensitive to the repeated use of root modules as it decreased by approximately 50% in the space experiment and by approximately 60% in the ground controls.

Comparative analysis of the first and second space wheat crops harvested in experiment Greenhouse-5 (Table 2.4) showed that on the whole the only plant of the second space crop did not have any morphological differences from the terrestrial controls. Size and mass parameters of the plant were smaller as compared with the plants of the first space crop. According to cosmonaut S. Avdeev, initially the seed content of the second space crop was a little bit higher but after the pre-harvest drying a part of the seeds shattered.

Table 2.3

Main parameters of wheat cultivar "Apogee" grown from the terrestrial seeds in greenhouse Svet in two vegetation cycles

Parameter	Vegetation			
	first crop (Greenhouse-4)		second crop (Greenhouse-5)	
	space flight	control	space flight	control
Dry mass of one plant, g	3,64	3,05±0,86	2,29	1,8±0,6
Height of a plant, cm	35,3±3,1	44,8±2,8	33,9±5,9	31,8±6,2
Head length, cm	8,3±1,8	6,5±0,7	6,8±0,4	5,2±1,1
Number of spikelets in a ripe head	16,0±2,0	16,0±2,0	15,0±2,0	11,0±3,0
Amount of seeds per a plant	42,3	68,3	20,7	15,9

Table 2.4

Comparison of plants of wheat cultivar "Apogee" grown from the terrestrial and space seeds in Svet in space experiment Greenhouse-5

Type of seeds	Dry mass of a plant, g	Number of sprouts with heads per a plant	Plant height, cm	Head length, cm	Amount of seeds per a plant
Terrestrial seeds (first space crop)	2,29	2,1	33,9±5,9	6,8±0,4	20,7
Space seeds (second space crop)	1,21	2,0	27,0	5,0	5 + ?

To summarize, the space experiments with wheat cultivar Apogee performed on the OSS station "Mir" in greenhouse Svet during 1998–1999 gave the initial positive results of growing a sequence of crops in space flight. Harvesting a normal plant the embryological and post-embryological development of which had passed in the space flight undeniably constitutes a certain milestone in the history of space biology and plant ecology. It can be considered an established fact that plant cultivation in microgravity can be realized in several ontogenetic cycles. Future investigations of plants in space will be concerned, apparently, with microevolution and delayed genetic consequences of extended plant cultivation in space. Investigators should concentrate particularly on a more thorough evaluation of such factors of the plant environment as space radiation, composition of the space station atmosphere, possible excessive watering of roots as a result of the microgravity effects on water migration across substrate

Chapter 3

RESULTS OBTAINED IN THE DIRECTION OF FUNDAMENTAL SPACE RESEARCH “SOLAR-TERRESTRIAL PHYSICS”

3.1. Project “Interball”

Plasma thermalization and penetration through the outer polar cusps. Magnetosheath plasma flow is thermalized through the formation of “long-operating” vortex streets and local discontinuities and solitons in a distributed region over polar cusps (stagnation region). Plasma percolation through the structured boundary and secondary reconnection of fluctuating magnetic fields in a high-latitude turbulent boundary layer can account for the main part of solar wind plasma inflow into the magnetospheric trap. Unlike local shocks, the ion thermalization is accompanied by the generation of coherent Alfvén wave cascades with scales ranging from ion gyroradius to the radius of curvature of the averaged magnetic field, as well as by the generation of ‘diamagnetic bubbles’ (of few 100–1000 km thick) with a demagnetized heated plasma inside. This ‘boiling’ plasma has kinked power-law spectra with two characteristic slopes (1.2 & 2.4), that differs from the Kolmogorov law. The fluctuation self-organization in the boundary layer (synchronization of three-wave decays) was observed on certain frequency scales. Despite similar scale and spectral characteristics topologies of the summer and winter exterior cusps are different. In summer (positive dipole tilts) the outer cusp throat is open for the direct interaction of magnetosheath flows with the indent magnetopause. The summer stagnation region with the turbulent boundary layer at its bottom is mostly in the magnetosheath. In winter (negative dipole tilts) the smooth magnetopause, being at $\sim$ double distance, is more transparent for the fluctuations including ‘diamagnetic bubbles’. It becomes thick and coincides with the magnetosheath flow boundary. Just inside the magnetopause, the ‘plasma balls’ (few R_E thick) are regularly encountered, which contain highly reduced field and heated magnetosheath plasma. We suggest micro-reconnection of fluctuating fields and percolation of the ‘diamagnetic bubbles’ as most effective mechanisms for filling of the ‘plasma balls’. The data don’t conform to a unique large-scale reconnection as the general source for the heated plasma there.

The discovery of the ‘plasma balls’ suitably finalizes the Interball mission, which name has been given after ‘fireballs’ introduced by Fairfield in late 70’s.

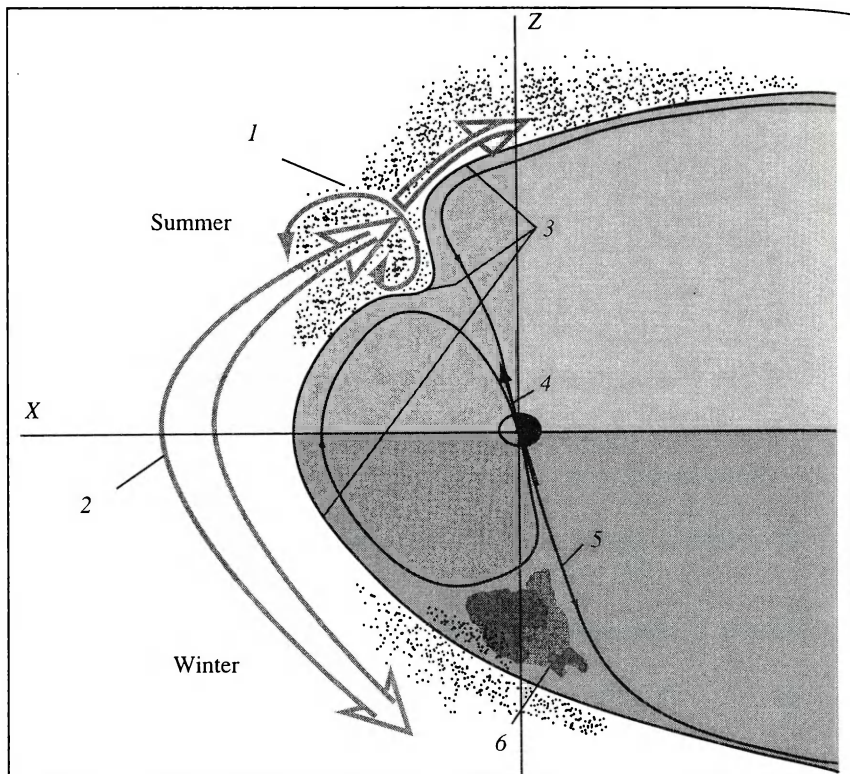


Fig. 3.1. Magnetospheric boundary in noon-midnight GSM

Plane for summer in the Northern hemisphere (upper part) – dipole tilt angle positive and winter in the Southern hemisphere (bottom) – tilt angle negative; 1 – turbulent boundary layer; 2 – MSH flow; 3 – magnetopause; 4 – magnetic dipole; 5 – magnetic field; 6 – plasma ball

Study of fine spectral and time characteristics of energetic particles. Almost Monoenergetic Ions (AMI, see Fig. 3.1) and thin dispersion structures in energetic ion and electron spectra has been discovered due to very high energetic resolution of DOK-2 spectrometer. It has been shown that AMI beams can be generated due to particle acceleration in bursts of a strong, potential, electric field, arising by the disruption of magnetospheric current sheet filaments. In particular it occurs in multiple spontaneous reconnection events in the geotail plasma sheet and by collisions of solar wind current sheets with the Earth's bow shock (see AMI near bow shock in Fig. 3.2).

Thin dispersion structures in ion and electron spectra in auroral zones has been also discovered. These structures are narrow lines with energies smoothly decreasing with time. In ion spectra, unlike the elec-

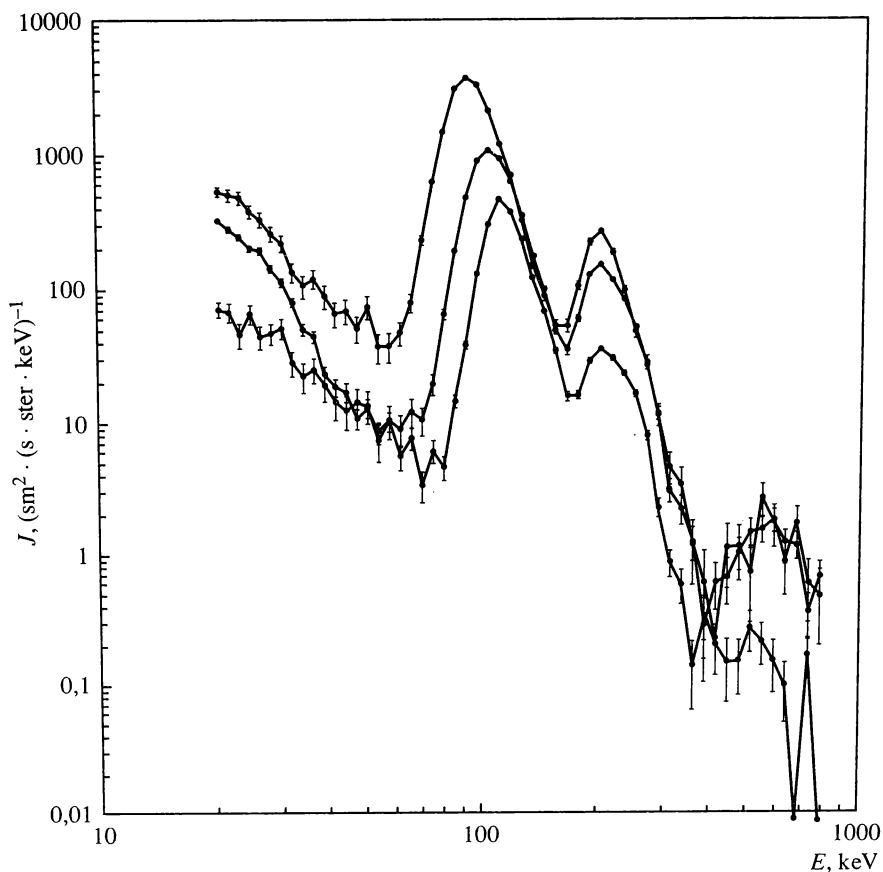


Fig. 3.2. Example of AMI near the bow shock

tron ones, we observed usually a pair of lines with the energy ratio of 1:2. It was shown that these structures are due to gradient-curvature drift of particles momentarily injected on the night side of the magnetosphere. In several cases particles made several full turns around the Earth. The pairs of lines in ion spectra should correspond to protons and α -particles. The analysis of dispersion structures in high-resolution spectra allowed to determine precisely the moment of particle acceleration T_0 , to estimate the duration of this process and find the source spectra of particles in the specific event. One example of the method of T_0 determination for a dispersion event is given in Fig. 3.3. In some dispersion events the variations of the line energy with time were like periodical sinusoidal oscillations superposed on a normal hyperbolic decrease. The periods were of 3–5 min. These oscillations were found to be well correlated with the PC-5 type variations in local magnetic field. The magnetic field oscilla-

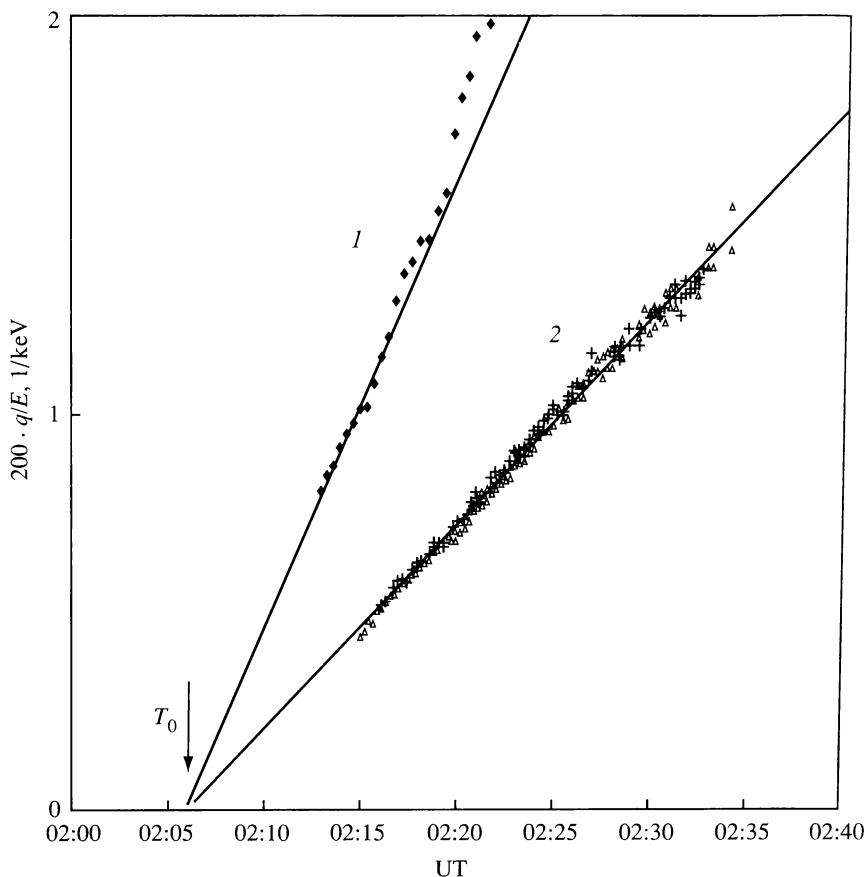


Fig. 3.3. Example of the injection time $T_0 = 2 \text{ h } 06 \text{ min } 04 \text{ s}$ determination for ion and electron dispersion structures for event 28.06.1977 in auroral zone
1 – electrons; 2 – ions

tions were linearly polarized, transversal and mainly in east-west direction. The phase relation is such that the line energy increased while eastward magnetic field component increased.

The simple explanation of this phenomenon in a frame of gradient drift model was given. The analysis of such 'wavy' dispersion events allowed to find estimates of longitudinal amplitude of such field line oscillations

Investigation of the fast and large solar wind plasma and magnetic field variations. Events with very sharp (faster than 10 min) and large (by absolute amplitude) increase/ decrease of solar wind ion flux (density) has been studied. In most cases these events do not include changing of other solar wind parameters (velocity, temperature, mag-

nitude and direction of interplanetary magnetic field). There were investigated the probability of such events as function of their amplitude, their statistical features, connection to the solar corona phenomena and their “geoeffectivity”. The statistical analyses included several tens of simultaneous observations of solar wind fast and large variations in the foreshock (ahead of the bow shock) by “Interball-1” and “Magion-4” satellites. For these events the distance between spacecraft was rather small (1–5 thousands km). The comparison of these measurements for different spacecraft positions allowed us to estimate the correlation length of structures in the plane, perpendicular to solar wind motion, is $\sim 2R_E$.

The analyses of ion flux measurements with high time resolution allowed us (also in the first time) to show that plasma variations in the foreshock are the fast magnetosonic waves going upstream from bow shock with velocity about 80 km/s but blown downstream by solar wind with the larger velocity (about 400 km/s). The estimate of the velocity of small-scale quasi-harmonic structures in the foreshock also was performed from two point observations.

The case and statistical study was made of the absolute and relative low frequency and high frequency variations of the ion flux (density) and magnetic field module in the magnetosheath. It was done using Interball-1 data both for dusk and for dawn magnetospheric flanks. The dependence of the amplitudes of the plasma and field variations on the spacecraft position relative the magnetosheath borders – radial profiles of variations – was obtained. It was shown that the amplitude of plasma flux variations are rather constant across the magnetosheath; the amplitude of field variations decrease from magnetopause to bow shock. The dependence of the magnetosheath plasma and field variations on the external condition – the direction of the interplanetary magnetic field – was also studied. It was shown (at the first time) that amplitude of these variations strongly increase if the solar wind enter to magnetosheath across the quasi-parallel bow shock.

Ground-based and satellite study of mechanisms for the ionospheric polarization jet formation. Long-lasting ground based measurements of a polarization jet (PJ) by the latitudinal chain of ionospheric stations in Yakutia ($3 < L < 5$; $MLT = UT + 9h$) and by 5 subauroral Russian stations were analyzed. A number of cases were found when PJ was recorded simultaneously with energetic ion observations by AMPTE/CCE and “Interball-2”. In the considered cases of strong magnetic substorms, PJ was accompanied by strong injection of ions with the energy of $\sim 20\text{--}50$ keV and intensity of $\sim 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ ster}^{-1} \text{ keV}^{-1}$. Close to the injection region near the midnight sector no ion energy dispersion has been observed, while they have been detected in the evening sector. Measurements by ionosondes at different longitudes show that the west-

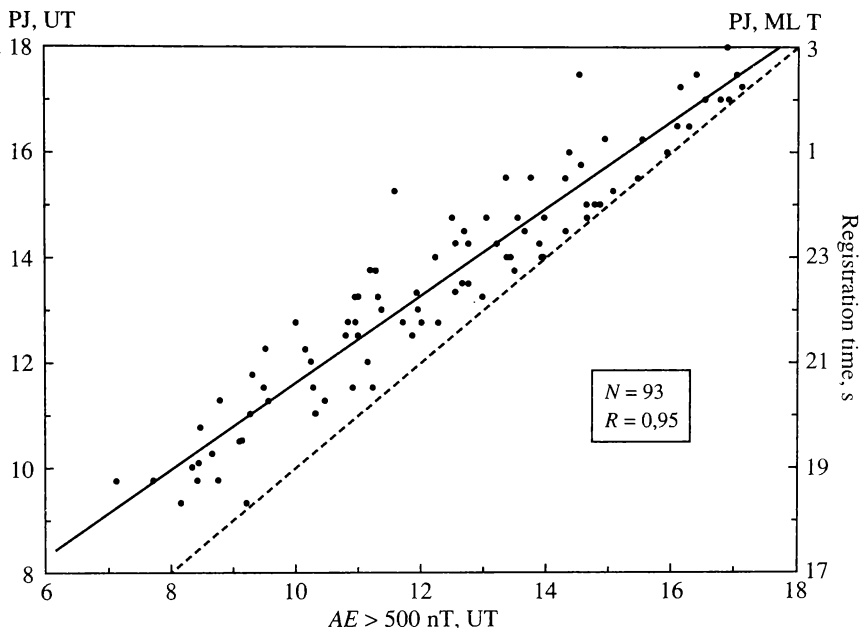


Fig. 3.4. Onset time of PJ observation at Yakutsk station versus the time of commencement of substorms with $AE \geq 500$ nT, for cases with time delays between these two events is less than 3 hours. Dashed line marks the absence of time delay

ward velocity of the front of PJ development is close to the gradient drift velocity of 20 keV ions (forming the ion dispersion events). Thus, the physical mechanism of PJ formation due to energetic ion injection during a strong substorm burst is experimentally established.

Satellite measurements show that in the near midnight sector energetic ions reach the shell $L = 3.0$ in 20–30 min after a substorm commencement with $AE > 500$ nT.

The polarization jet is formed in about 5–10 minutes after the substorm commencement. Thus polarization jet is a manifestation of substorm brake-up phase but not the recovery phase as it was considered before (Fig. 3.4).

N. Buzulukova and Yu. I. Galperin have developed a simple semi-quantitative theory of the PJ formation and its characteristics. They demonstrated that the presence of PJ strongly influences the drift trajectories of outer radiation belt particles and can produce the electric field, maintaining the PJ band.

Bow shock position determination. About 450 crossings of the Earth's bow shock (BS) by "Wind" orbiter and ~850 BS crossings by

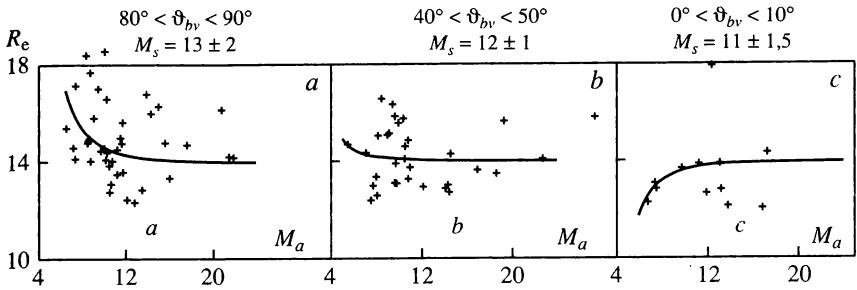


Fig. 3.5. Dependence of normalized subsolar BS position on Alfvénic Mach number for quasi-perpendicular (a), inclined (b), and field-aligned (c) solar wind flow

“Magion 4” (Interball 1 subsatellite) orbiter were analyzed in details. It was revealed that:

1) earth’s subsolar bow shock is approaching to planet with decrease of Alfvénic Mach number M_a . This unusual behavior is realized only in a case of practical coincidence of directions of interplanetary magnetic field (IMF) with those one of the solar wind ($\theta_{bv} \approx 0^\circ$, right panel). In other cases subsolar bow shock moves from the planet with the decrease of Alfvénic (and sonic M_s) Mach number in accordance with traditional expectations (central and left panels) (Fig. 3.5);

2) the cross-section of the Earth’s bow shock by terminator plane is asymmetric. Dependence of this effect on the solar wind upstream parameters was studied. It was found that asymmetry of the BS terminator cross-section exists when magnetosonic velocity $V_{ms} = V_\perp$ essentially exceeds $V_{\perp\perp}$, which is the maximal of sonic V_s and Alfvénic V_a velocities (d,f). The effect vanishes when mentioned above velocities are close each other (a,c,e), or when the solar wind flows almost along IMF (a,b). The ratio of axes of the terminator cross-section ellipsoid can be as high as ~ 1.1 whether IMF is almost perpendicular to the solar wind flow (f). In a case of Parker spiral angle of $\sim 45^\circ$ between the IMF and solar wind directions, cross-sectional ellipsoid is both elongated in the direction perpendicular to IMF and shifted by ~ 1.5 Earth’s radii in the “dawn” direction (d) (Fig. 3.6).

Plasma characteristics in the high-latitude magnetosheath in the vicinity of cusp. Gasdynamic model and the global MHD simulation are used to calculate the plasma properties in the high-latitude magnetosheath. We compared the data of “Interball” and “Polar” spacecraft, which were obtained in the high-latitude magnetosheath in the vicinity of cusp under conditions of the strong northward IMF with gasdynamic model and global MHD simulation. Magnetic field plays an important

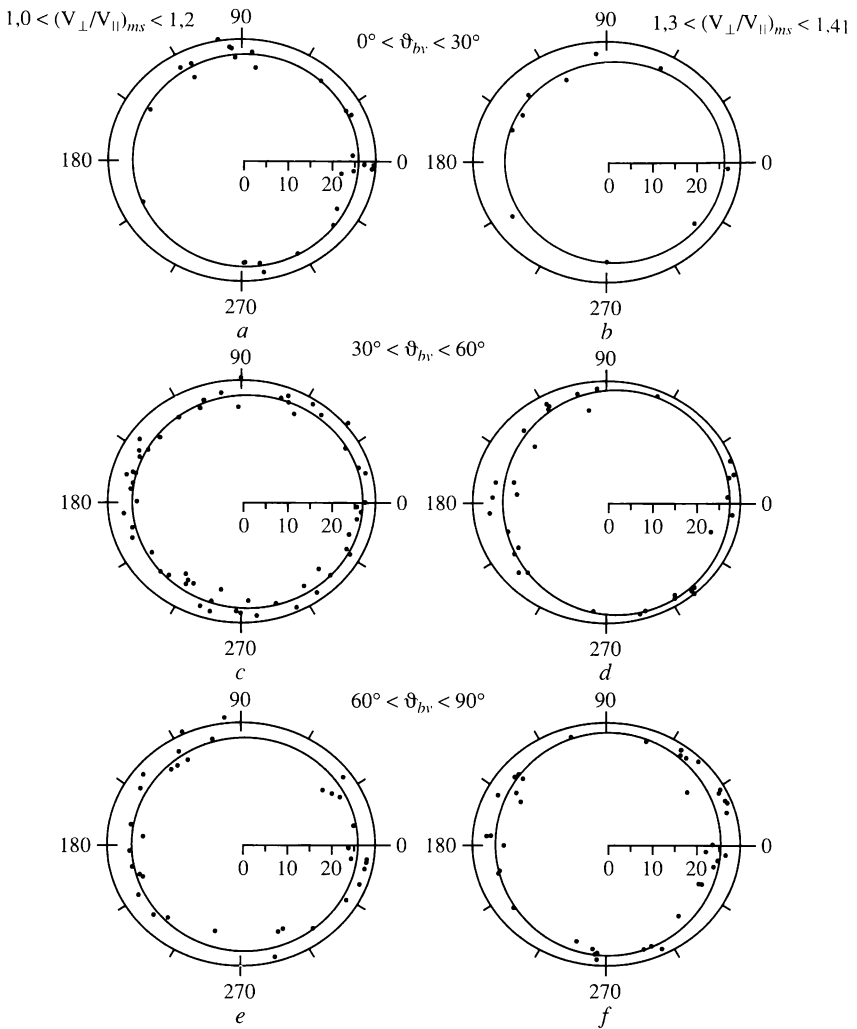


Fig. 3.6. Projections of normalized bow shock crossings to the terminator plane for quasi- field aligned (*a*, *b*) inclined (*c*, *d*), and quasi-perpendicular (*e*, *f*) solar wind flows, subdivided into cases with low (*a*, *c*, *e*) and high (*b*, *d*, *f*) anisotropy of phase velocity of fast magnetosonic wave

role in the reconnection and in the formation of depletion layer within the magnetosheath. Observed plasma properties are in the better agreement with MHD simulation rather than with gasdynamic model. Observations show that under these conditions the formation of the depletion layer at high latitudes leads to the subsonic flow that allows the steady high-latitude reconnection.

Ion velocity distributions in the highly-structured LLBL: a case for multiple reconnection. Analysis of ion velocity distributions in the highly-structured LLBL, that is one of the two basic types of LLBL (1) shows that widely accepted view of the LLBL being created by magnetosheath plasma entering along single reconnected flux tube (FTE) is not the only option. Ion observations of with SCA-1 ion analyzer on Interball-Tail probe show that in many cases ion velocity distributions have two or three magnetosheath-type components. Two of these components are counter-streaming along magnetic field line, while third component is nearly at rest relative the magnetic field (2). These observations give experimental evidence for multiple reconnection that may play a role in the formation of LLBL (Fig. 3.7, see color photo).

Auroral kilometric radiation fine structure. The fine structure of the Auroral Kilometric Radiation (AKR) is studied using multicomponent measurements of the electromagnetic field in the frequency band 4 kHz-1 MHz (the “Polrad” experiment onboard the “Interball-2” satellite). Special attention is paid to the measurements near the source of AKR: under conditions when the lower boundary of the emission range descends sufficiently low, lower than the local gyrofrequency of electrons. From the analysis of the electric field structure a conclusion is drawn that the bulk of the AKR power is carried by the signal component that is fast variable in time and frequency (flickering component). The power of a constant component (continuum) is lower by at least an order of magnitude. During strong bursts of the AKR, the relative contribution of the flickering component increases. The spatial structure of the zone of generation has at least three characteristic scales along and across the magnetic field.

Observations of small-amplitude AKR with a weakly pronounced flickering component in a broad frequency band and for along time confirm the classical theory of AKR generation in a large-scale cavity of plasma density. The dimension of this cavity in altitude is several thousand kilometers, and its latitude/longitude extension is determined by the region of precipitation of energetic electrons in the auroral zone. The large-amplitude AKR with a dominant flickering component suggests some powerful small-scale and short-lived sources. Such sources can occur at a strong inhomogeneity of the flux of precipitating particles. Another possible mechanism for origination of small-scale sources is the hypothesis of a self-support of the AKR suggested by Calvert. According to this hypothesis, the AKR itself forms density cavities, which, in turn, results in intensification of the radiation. In this case, the amplitude dependence of the AKR flickering components is naturally explained (Fig. 3.8)

AKR triggering by type III solar radio bursts. Simultaneous registration of type III solar radio bursts and Auroral Kilometric Radiation

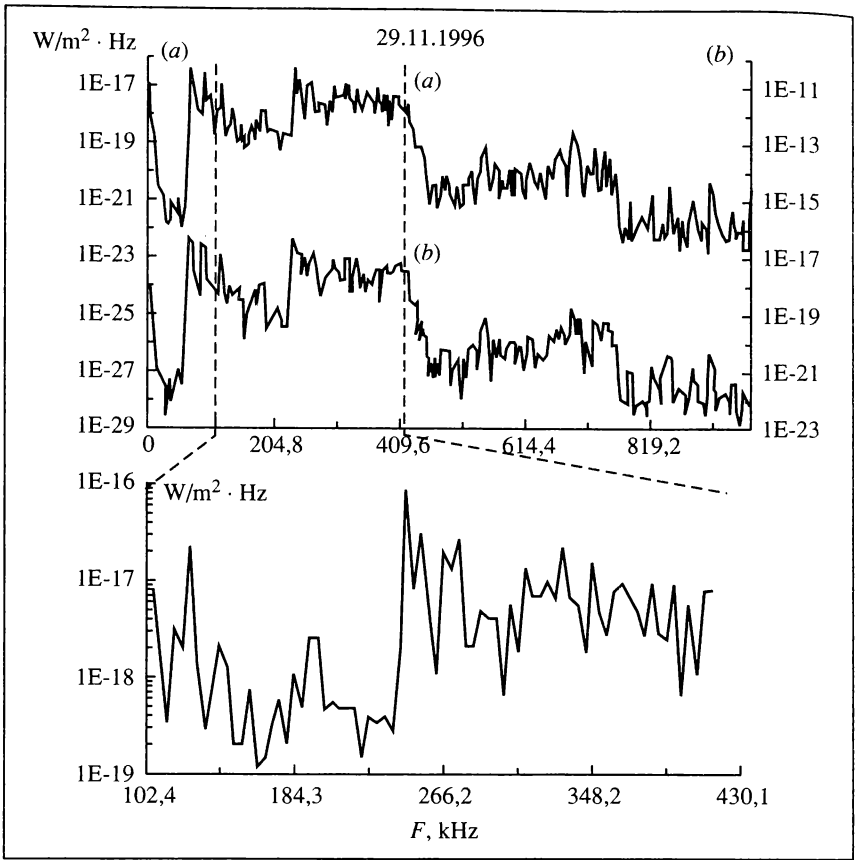


Fig. 3.8. Auroral Kilometric radiation fine structure

(AKR) have been studied by “Polrad” instrument onboard the “Interball-2” spacecraft over the time period from July 1997 to October 1998. It has been found that the onset of AKR and increasing AKR intensity occasionally coincident with the arrival of type III solar radio bursts. The time delay between the burst detection and the AKR stimulation ranges from practically simultaneous to ten minutes.

In the Fig. 3.9 (see color photo) we present the AKR onset occurred after the type III solar radio burst. The AKR onset could be seen when the type III burst is ongoing. Simultaneous data from “Geotail” satellite show that the AKR emission was permanently observed during relatively long time period even before the arrival of the type III burst. On “Interball-1” spacecraft, located close to the Geotail, strong variations of both magnetic field and plasmas begin in 10 min before the detection of the type III burst. It should result in electron precipitation in the auroral region lead-

ing to the AKR generation. That demonstrates difficulties in determination of a cause for the AKR onset observed onboard the "Interball-2".

The "Interball-2" can be summarized as follows.

1. The coincidence of the AKR intensification and arrival of type III solar radio bursts is seen in about 10% of the cases in period from October 1996 to October 1998. The AKR become more intensive and broader in frequencies shortly after a detection of the radio burst.

2. Multispacecraft observations indicate that the coincidence of the type III burst arrival and the AKR stimulation is not an evidence for the AKR triggering. Variations in solar wind parameters accompanying drifting source of the type III bursts, noted in two cases seem to be a possible primary cause of the magnetospheric instabilities that finally leads to the AKR emission. The interplanetary conditions, physical processes in the magnetotail and foreshock/magnetosheath regions should be also taken into account in the study of the AKR triggering.

3.2. Project "Coronas-F"

The international CORONAS Program (Complex Orbital Near-Earth Observations of Solar Activity), which incorporates the orbital solar observatory "Coronas-F", is aimed at investigating the Sun in different phases of the 11-year cycle. The previous mission "Coronas-I" (launched in 1994) observed the Sun near the epoch of minimum activity. "Coronas-F" will provide observations of solar activity in the vicinity of the maximum of the current cycle 23. On July 31, 2001, the satellite was launched into orbit with the following parameters: inclination $82,49^\circ$, minimum distance to the Earth 500,9 km, maximum distance to the Earth 548,5 km, and period 94,859 min. Such an orbit ensures repeated 20-day periods of continuous observations of the Sun, which are particularly important for helioseismologic studies and monitoring of solar flares. The actual stabilization of the spacecraft orientation proved to be 3–5 times better than the scheduled value of a few arc. sec. per second. It will significantly improve the spatial resolution of solar observations.

The main scientific objectives of the mission are as follows: observation of global oscillations of the Sun and study of its seismology and interior structure; a complex study of powerful dynamic phenomena of solar activity, such as active regions, flares, and mass ejections, in a broad wavelength range from optical to gamma-radiation; solar cosmic rays accelerated in active solar events, their outflow, propagation in the interplanetary magnetic field, and impact on the Earth's magnetosphere.

Scientific payload. In accordance with the tasks listed above, the scientific payload of the mission comprises four main groups of instru-

Table 1
"Coronas-F" onboard instruments

Instrument	Destination	Designing organization	Scientific leaders of the project
Helioseismology			
Spectrophotometer DIFOS	Helioseismological monitoring	IZMIRAN	V.N. Oraevsky
Monochromatic imaging with a high angular resolution			
Solar X-ray telescope CRT-K	Study of the spatial structure and dynamics of the upper solar atmosphere from narrow-band XUV-images	LPI	I.I. Sobelman I.A. Zhitnik
X-ray spectroheliograph RES-K	Hot plasma diagnostics in the solar atmosphere from X-ray and XUV images	LPI	I.I. Sobelman I.A. Zhitnik
Spectrophotometer DIOGENESS	Observations of X-ray emission from the solar active regions and flares	SRC PAS*	J. Sylwester
Electromagnetic fluxes and polarization measurements (from UV to γ -)			
X-ray spectrometer "Resik"	Solar X-ray observations with a high spectral resolution	SRC PAS*	J. Sylwester
Solar spectropolarimeter SPR-N	Polarization studies of the solar flare X-ray emission	LPI	INP MSU I.I. Sobelman I.P. Tindo S.I. Svertilov
Flare spectrometer "Iris"	Observations of solar flare activity in the X-ray spectrum range	PTI	G.E. Kocharov
Gamma spectrometer "Helikon"	Observations of solar flare activity in the X-ray and gamma ranges	PTI	E.P. Mazets
X-ray spectrometer RPS	Study of X-ray emission from solar flares and their precursors	IKI RAN	MEPhI V.M. Pankov Yu.D. Kotov
Time-amplitude spectrometer AVS	Study of the flare-generated X-ray and gamma-radiation	MEPhI	Yu.D. Kotov
Solar UV radiometer SUFR-Sp-K	Study of variations in the integral solar UV flux	IAG	T.V. Kazachevskaya
Solar UV spectrophotometer VUSS-L	Measurements of solar UV emission in the vicinity of the hydrogen resonance line	IAG	A.A. Nusinov

Table 1 (окончание)

Instrument	Destination	Designing organization	Scientific leaders of the project
Study of solar corpuscular fluxes			
SCR complex	Study of solar cosmic rays	INP MSU	S.N. Kuznetsov
Data			
SSNI	Data build-up system	IZMIRAN	A.I. Stepanov

*SRC PAS – Space Research Center, Poland Academy of Sciences.

ments: a device for detecting global oscillations of the Sun, X-ray imaging devices for spectral observations of active regions with a spatial resolution of the order of 2–3 arc.sec., devices for measuring electromagnetic fluxes from active regions and flares, and devices for measuring solar corpuscular fluxes. Measurements of electromagnetic emissions in a broad range and solar particles, both neutral (neutrons) and charged ones (electrons, protons, and nuclei), will provide a full pattern of the physical processes in solar active regions. The onboard instruments and their functions are listed in Table 1.

Spectrophotometer “Difos” The spectrophotometer “Difos” is used to measure intensity fluctuations of the solar white-light emission and provide the inherent oscillation spectrum. The intensities are measured simultaneously in six optical spectral ranges (350, 500, 650, 850, 1100, and 1500 nm) with a bandwidth of 10% of the central frequency. The photometer has been up-graded significantly compared to the version used in the “Coronas-I” mission. The sensitivity of the photodetectors was increased by more than an order of magnitude, the

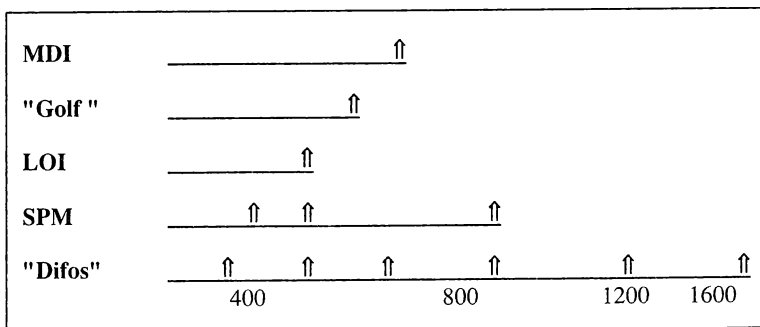


Fig. 3.10. Comparison of the DIFOS channels (“Coronas-F”) with the “Soho” instruments

MDI – Michelson Doppler Imaging of solar oscillations, “Golf” – Global low-degree velocity, LOI – Luminosity Oscillation Imager, and SPM – SunPhotoMeter

spectral range was doubled, and the number of the spectral channels was increased from 3 to 6. The global oscillations of the Sun are observed in a broad spectral range, including the most informative UV line, in which their emission intensity is much higher than in other lines. In Fig. 3.10 below, the “Difos” channels are compared with the “Soho” instruments.

Fig. 3.11 illustrates relative amplitudes of 5-min oscillation modes at the wavelength of 350 nm for 28–30 November, 2001, obtained as a result of processing “Difos” data.

Similar results were obtained for the other channels. By averaging over the modes, we have obtained the mean values of the relative amplitudes for each of the 6 channels and plotted them as a function of the wavelength (Fig. 3.12). All points fall on the smooth line, which is approximated by the expression $\lambda^{-1.2}$. A similar result was obtained for another observation interval of November 30 – December 3, 2001 (the second curve in the figure plotted with squares). Comparison of the “Difos” data with ground-based observations at similar wavelengths reveals a good agreement. The amplitude ratio of the global oscillations at 500 nm and 680 nm obtained from ground-based measurements is 1.6, and the “Difos” measurements give the ratio equal to 1.54. For another pair of wavelengths (500 nm and 870 nm), the amplitude ratio is 2.2 as obtained from ground-based measurements and 1.93 as given by “Difos” data.

Full-Sun X-ray imaging in the wavelength range (“Spirit” experiment). The “Spirit” scientific complex comprises a multi-channel telescope SRT-K and a spectroheliograph RES-K. The main task of the experiment is to provide simultaneous spectral X-ray images of the solar disk and corona, corresponding to monotemperature layers of the solar plasma in a broad temperature range $T_e = 0.05\text{--}50$ MK (1 MK = 10^6 K), with a high spatial, spectral, and time resolution. Such observations will form a basis for studying 3D structure and dynamics of the solar atmosphere and determining the physical parameters and elementary composition of the plasma features, such as active regions, coronal holes, solar flares, coronal mass ejections, bright points, prominences, etc.

The SRT-K and RES-K instruments use multi-layer focusing optics, systems of thin-film and porous spectral filters, and receivers based on open microchannel plates and cooled CCDs. An important advantage of the complex is the opportunity to obtain simultaneous full-Sun images in several spectral channels. The main characteristics of the measuring channels are given in Table 3.2. The narrow-band channels centered at the wavelengths of 171, 175, 195, 284, and 304 Å belong to SRT-K and the others, to the spectroheliograph RES-K. The MgXII channel provides monochromatic images in the 8.42 Å line

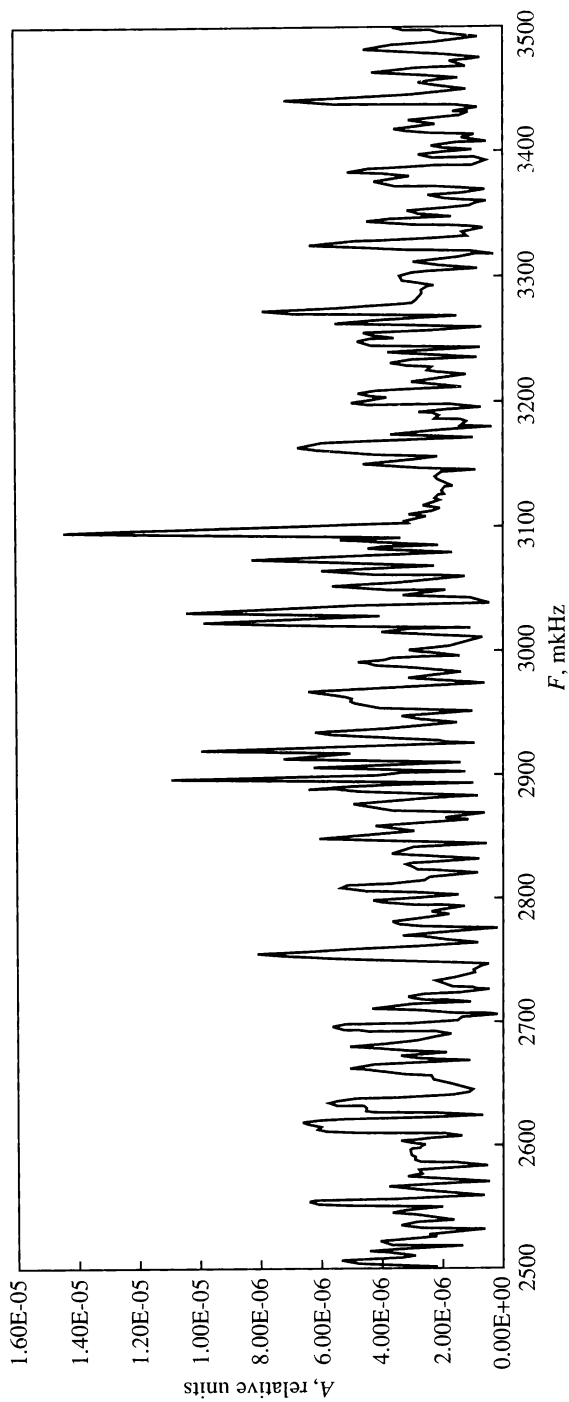


Fig. 3.11. Relative amplitudes of the solar 5-min oscillations modes at 650 nm ("Difos" data)

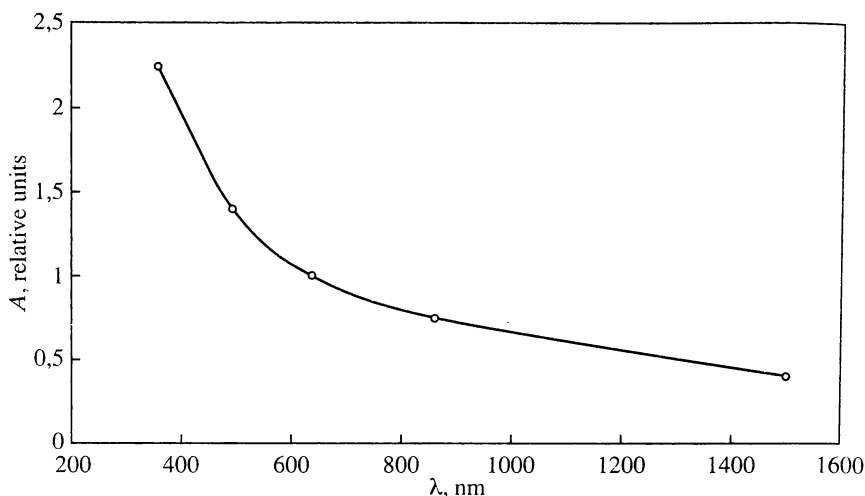


Fig. 3.12. Relative amplitudes of inner oscillations of the Sun as a function of wavelength

with the angular resolution of $6'' \times 6''$. The spectroheliograms in the wavelength ranges of 177–207 Å and 285–335 Å give simultaneous spectra of plasma structures in the solar atmosphere with the spatial, spectral, and time resolution of $5'' \times 100''$ and $8'' \times 160''$, 0.02 and 0.04 Å, and up to 2 s, respectively.

For the first 9 months, more than 80 thousand X-ray images and spectroheliograms in the range of 8.4–335 Å were recorded with a high spectral, spatial, and time resolution. Over 200 images of the Sun are obtained daily. Fig. 3.13 (see color photo) illustrates solar images obtained in the X-ray telescope channels corresponding to the temperature layers in the range of 0.05–2 MK (see Table 3.2). In the images, one can see local and large-scale plasma features, various magnetic field structures, and a flare region. Fig. 3.14 represents a monochromatic image of a part of the solar corona heated up to 10 MK, as obtained in the Mg XII 8.42 Å line. This image is matched with an image taken in the 175 Å channel, which corresponds to the temperature of 1.3 MK (spherical structure in the right-hand upper corner). High-temperature (10 MK) dynamic plasma features with different lifetimes (from minutes to tens of hours), shapes, *разной формы* (helmet-shaped, spherical, spider-like, etc.), and height distributions (up to hundreds of thousand km above the solar disk) have been first revealed in monochromatic X-ray images.

Fig. 3.15 represents a solar spectroheliogram obtained on 16.09.01 (03.59 UT), along with the flare spectrum in the range of 177–207 Å. The latter includes the main intensive lines of the Fe X–XXIV ions,

Table 3.2

Spectral bands of the SPIRIT instrument and excitation temperatures of ions in solar plasma

Spectral band	Basic ions	T, 10 ⁶ K
1.85–1.87 Å	FeXXIV – FeXXV	20–50
8.418–8.423 Å	MgXII	10
177–207 Å	OIV, FeIX–XXIV, CaXIV–CaXVII	0.3–16
285–335 Å	HeII, SiXI, FeXV–FeXVI, MgVIII, NiXVII, CaXVII	0.05–5
171 ± 3 Å	FeIX–FeX	1.3
175 ± 5 Å	FeX–FeXI	1.3
195 ± 6 Å	FeXII	1.6
284 ± 8 Å	FeXV	2
304 ± 8 Å	HeII, SiXI	0.05, 1.6

excited in a broad temperature range from 1 to 16 MK, a number of lines of some other elements (O, Ca, and Ni), corresponding to 0.3–5 MK. The flare region is seen as a compact feature in the spectroheliogram in the “hot” line of Fe XXIV 192.04 Å with a maximum luminosity at 16 MK.

Preliminary analysis of the images obtained in the emission lines of multi-charge ions provided the electron density and temperature distributions in various plasma features in the solar corona: active regions, flares, coronal holes, etc. in the ranges $N_E \approx 10^8 - 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ and $T_E \approx 1 - 20 \text{ MK}$.

Thus, the “Spirit” experiment has initiated a new lead the solar astrophysics -the imaging X-ray spectroscopy, which allows us to study 3D structure and dynamics of plasma features in the solar atmosphere in the temperature range $T_E \approx 0.05 - 50 \text{ MK}$ using monochromatic images of the Sun.

The first results of the “Spirit” experiment may be summarized as follows:

For the first 9 months of the “Coronas-F” satellite flight the “Spirit” instrument on board registered more than 80 thousands of solar XUV images and spectra in 10 spectral channels.

For the first time monochromatic full Sun images in Mg XII resonance line 8,42 Å were obtained. High temperature structures (3–20 MK) associated with active regions were firstly observed at the solar disk and above (up to 0,3 R_s) the limb.

For the first time full Sun images in spectral bands 8,42 Å (Mg XII), 175 Å (Fe IX–XI) and 304 Å (He II) were registered simultaneously, which is important to study of spatial structure and dynamics of solar corona.



Fig. 3.14. Monochromatic Mg XII 8.42 Å images of a coronal region heated up to 10 MK (“Spirit” experiment)

Time series of solar XUV images in several bands of the 8.42–304 Å spectral range were recorded by the “Spirit” telescopes and spectroheliographs in time scales from seconds to months.

Full Sun spectral images in more than 200 monochromatic lines of different ions with excitation temperatures from 0.05 to 16 MK were observed by the “Spirit” XUV spectroheliographs in the XUV spectral bands 177–207 and 285–335 Å. These spectra enable to realize temperature and density diagnostics of different solar structures – from flares to coronal holes.

Spectrophotometer DIOGENNES and X-ray spectrometer “Resik”.

The “Resik” and “Diogenes” instruments measure the solar radiation spectra in the wavelength range of 3–7 Å and are intended for the study of X-ray emission from active regions and flares with a high spectral resolution. The X-ray spectra obtained are comparable by their spectral

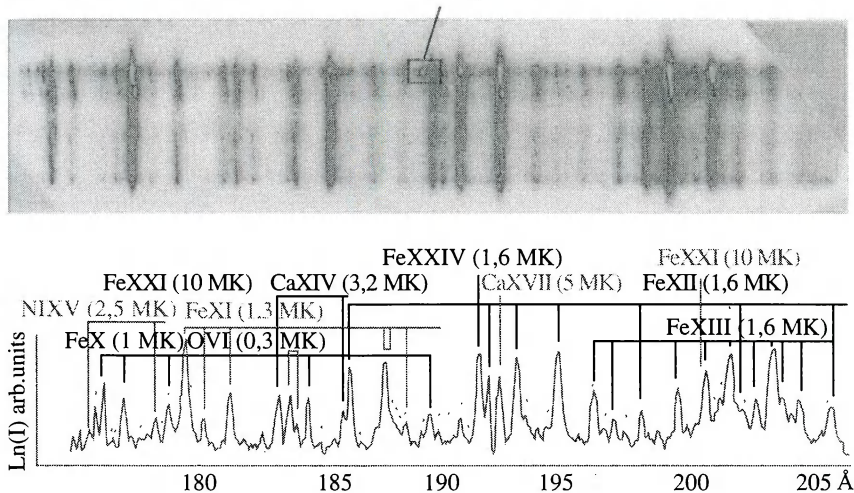


Fig. 3.15. A solar spectroheliogram of 16.09.01 (03 : 59 UT) along with the flare spectrum at 177–207 Å. The main intensive lines of Fe X–XXIV ions excited in a broad temperature range from 1 to 16 MK are also shown, as well as the lines of some other ions (O, Ca, and Ni) corresponding to the temperatures of 0.3–5 MK (“Spirit” experiment)

and time resolution with the world’s best-known measurements. Owing to the polar orbit of “Coronas-F” and the full coverage of a broad spectral range, these spectra are complementary of those obtained on Yohkoh. When X-ray flux is very large, the detectors of “Resik” and the Yohkoh spectrometers get saturated. Therefore, “Diogenes” is now the only operating spectrometer in the world, which is able to provide spectra of major flares of importance above M2 (e.g., the X5.3 flare of August 25, 2001).

Fig. 3.16 illustrates the spectra in CaXIX measured with high spatial resolution ($\sim 5''$) in the growth, intermediate, and decay phases of the most intensive flare in the current solar cycle (August 25, 2001). The temperature of the emitting plasma decreases from 2,5 MK in the growth phase to 1,2 MK in the decay phase. One can readily see the changing widths of the spectral lines, which indicate the role of the plasma turbulence in flare evolution. The line emission relative intensities provide information on the flare energy balance and the role of non-Maxwellian and nonequilibrium processes in the flare energy release region. It is the first time that the spectra with so high spatial resolution have been obtained in the given spectral range (3–7 Å) for an X-class flare. They reveal numerous emission lines formed due to the collisional excitation of atoms, excitation of the inner atomic

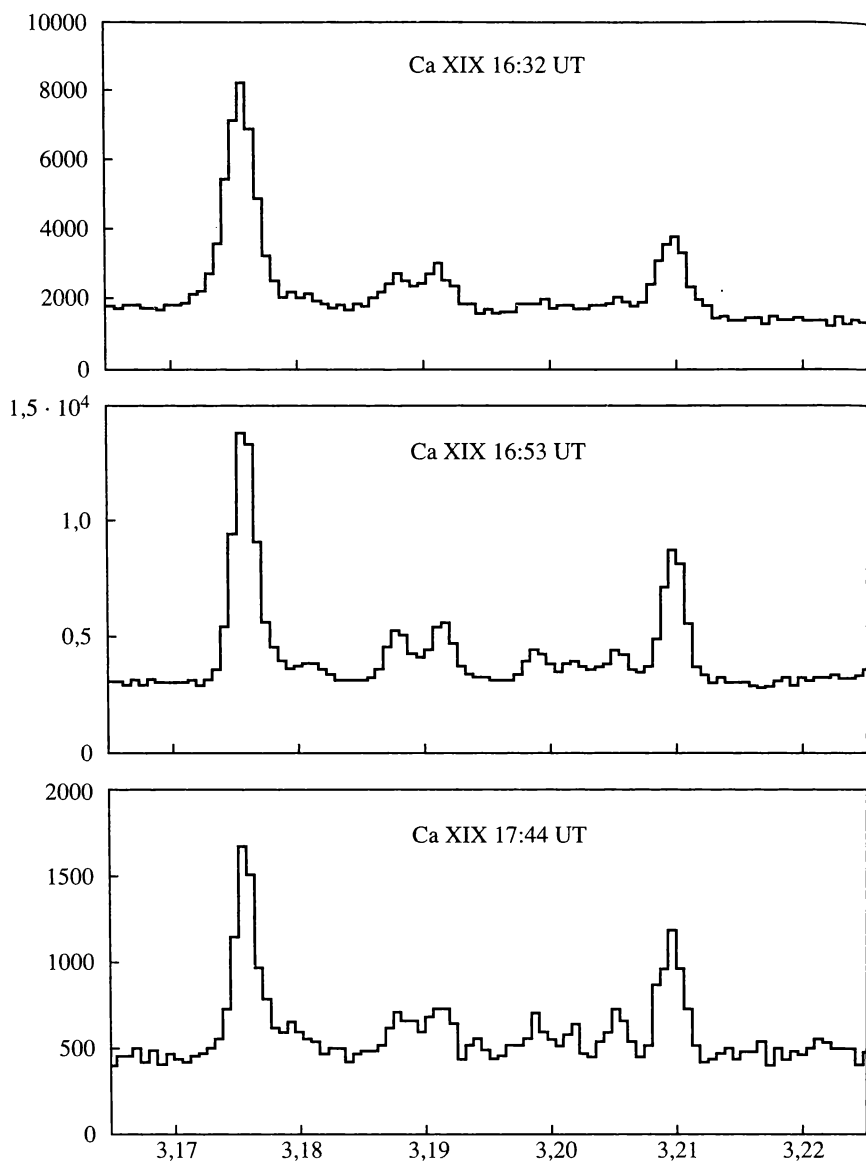


Fig. 3.16. CA XIX spectra obtained with a high spatial resolution ($\sim 5''$) in the growth, intermediate, and decay phases of the current cycle most powerful flare (25.08.2001 DIOGENNES spectrophotometer data)

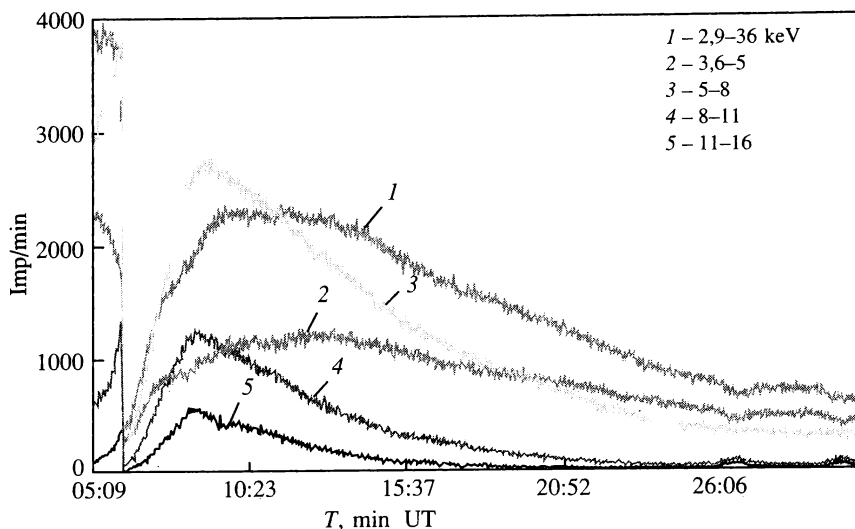


Fig. 3.17. Intensity time profile of the flare-generated X-ray emissions recorded by the IRIS device on 13.03.2002

shells, and dielectron recombination and allow a detailed diagnostics of the flare-generated plasma.

Flare spectrometer "Iris". The instrument is designed for the study of X-ray flare activity in the Sun in the spectral range of 2–200 keV. In the patrol operation mode, it has 12 energy channels ensuring the time resolution of 2.5 s. In the burst-registration mode, there are 64 energy channels ensuring 1 s time resolution and 4 channels ensuring 10 ms resolution. Spectral measurements with such a high time resolution have never been obtained before in the solar X-ray studies. Observations of the temporal fine structure of hard X-ray fluxes will provide direct information on the evolution of energy release processes in the flare explosive phase and allow a deeper insight in their physical mechanisms. Fig. 3.17 represents an intensity time profile of X-ray emissions recorded by the "Iris" device on 13.03.2002. That flare was the most intensive of all recorded flares. Its soft X-ray intensity maximum was observed at 22 : 08 : 33 UT.

Gamma spectrometer "Helikon". The instrument measures the temporal and spectral parameters of the flare-generated hard electromagnetic emission in a broad energy range from X-rays to gamma radiation (10 keV–10 MeV). It enables the monitoring of radiation conditions in the near-Earth space environment and soft solar flares, detection and recording of hard ($E_\gamma > 50$ keV) flares and gamma bursts. Over 600 solar flares and 5 gamma bursts were recorded during the interval from August 15 to January 22, 2002. Most of the flares had soft spectra and

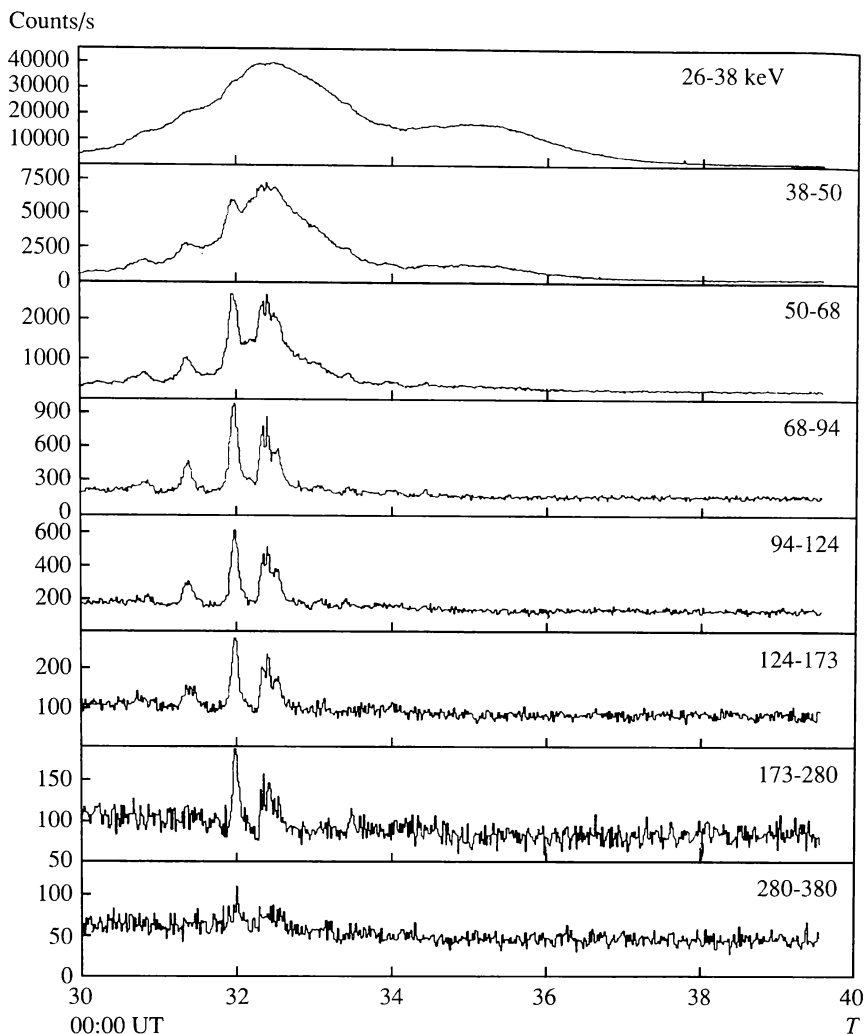


Fig. 3.18. Emission time profile for the major flare of 24.12.2001 ($T_0 = 0\text{ h } 31\text{ min } 41.895\text{ s UT}$) as recorded in the explosive phase in eight energy channels (HELIKON gamma-spectrometer data)

were recorded in the background operation mode with 1 s time resolution in eight adjacent energy ranges from 26 to 380 keV. One of the major solar flares was recorded in the explosive phase on December 24 at $T_0 = 0\text{ h } 31\text{ m } 41.895\text{ s UT}$. Fig.3.18–3.19 demonstrate the dynamics of that flare in eight energy channels and the sequence of the energy obtained in different phases of the event. The time of the beginning and the length of each spectrum record are given in the figures.

X-ray spectrometer RPS-1. The device is intended for the study of solar flares and their precursors in the X-ray range of 3–30 keV. During the observations, the calibration parameters of the instrument were refined, the maps of background conditions were constructed, and a statistical base of experimental data was built up.

Time-amplitude spectrometer AVS. The device is designed to measure the flare-generated gamma- and X-rays, in particular, for the analysis of the events of the solar flare-gamma burst type in the following energy ranges: $E = 3\text{--}30\text{ keV}$, $E = 0.1\text{--}8.0$ and $2.0\text{--}80.0\text{ MeV}$. Several tens of the events potentially belonging to the above-mentioned type were recorded during the observations. Their energy spectra were obtained in different phases (before, during, and after the events). The duration of the candidate events ranges from 16 seconds to 3–5 minutes. Fig. 3.20 illustrates the differential energy spectrum of the 18.09.2001 event reconstructed from measurements. One can readily see a bend in the spectrum at 300 keV and a probable spectral feature that can be associated with the annihilation line at 511 keV.

Solar UV radiometer SUFR-Sp-K. The SUFR-Sp-K device measures UV fluxes from the Sun as a star in several spectral ranges from 1 to 130 nm. It operates in a broader spectrum range than the corresponding SOHO instrument. Besides the scientific tasks, the instrument performs monitoring of the essential element of the space weather – geoeffective solar radiation. The device provided X-ray data ($\lambda < 12\text{ nm}$) on the major flare of importance X-5.3B observed on August 25, 2001, at 16 : 23 UT.

Solar UV spectrophotometer VUSS-L. The VUSS-L device is designed to measure the solar UV radiation in the vicinity of the hydrogen resonance line $\text{H}\text{L}_{\alpha}$. The measurements are made in the band of about 120 nm. A large volume of data was obtained on the solar UV flux and intensity in the Lyman-alpha line, which was preliminarily estimated to be about $10\text{ erg/cm}^2\text{ s}$. The time record of the solar UV flux measured with VUSS-L is shown in Fig. 3.21.

The UV radiation of the Sun as a star recorded by the SUFR-Cn-K and VUSS-L instruments affects the Earth's upper atmosphere and is an important characteristic of solar activity over the time scale of a solar cycle.

Solar cosmic ray complex. The complex of instruments for SCR studies comprises a gamma-ray and neutron spectrometer “Song”, Cosmic ray monitor MKL, and X-ray spectrometer SKI-3. The complex is intended for combined investigations of solar cosmic rays and their manifestations in the Earth's space environment. The “Song” device provides records of X- and gamma-ray spectra in the range of 0.03–100 MeV, detailed spectra of gamma lines in the range of 0.3–20 MeV, $> 20\text{ MeV}$ neutrons, and charged SCR particles – $> 70\text{ MeV}$ protons and $> 50\text{ MeV}$ electrons. The MKL device is used

Fotons/ $\text{cm}^2 \cdot \text{c} \cdot \text{keV}$

a

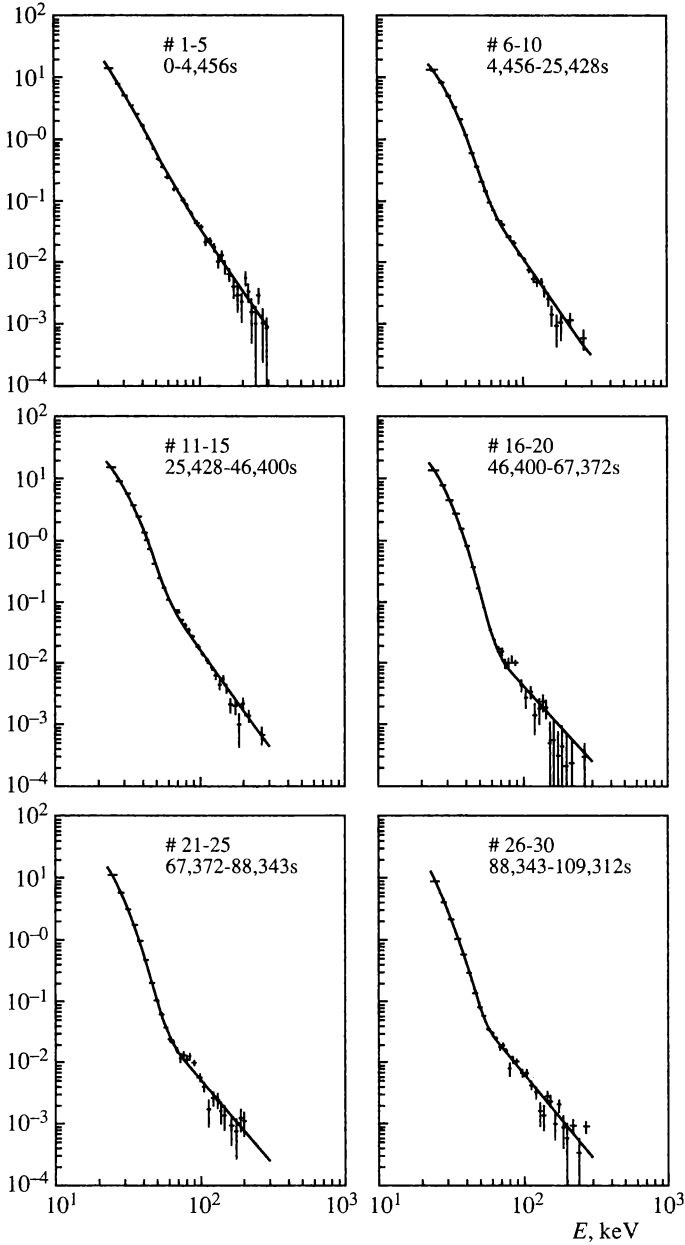
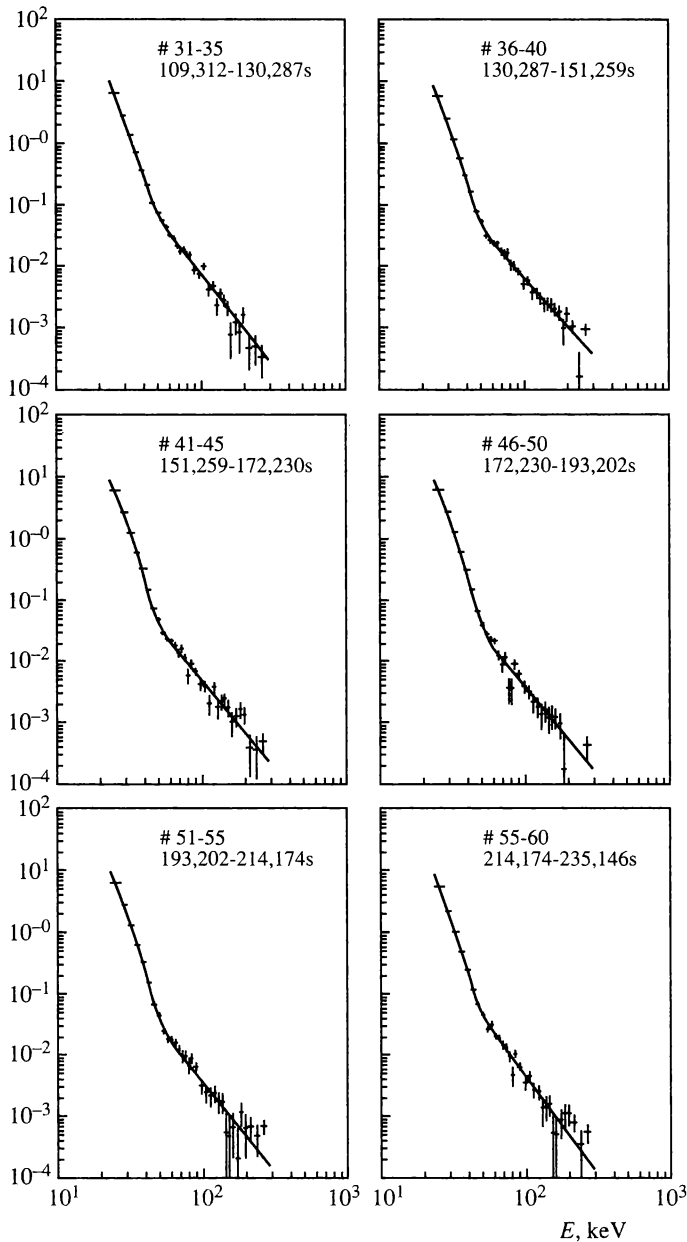


Fig. 3.19. Energy spectra of a major flare of December 24, 2001 obtained successively in different phases of the event ("HELICON" gamma spectrometer data)
a – 0–109 s; *b* – 109–235 s

Fotons/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{keV}$

b



V , foton/c · keV

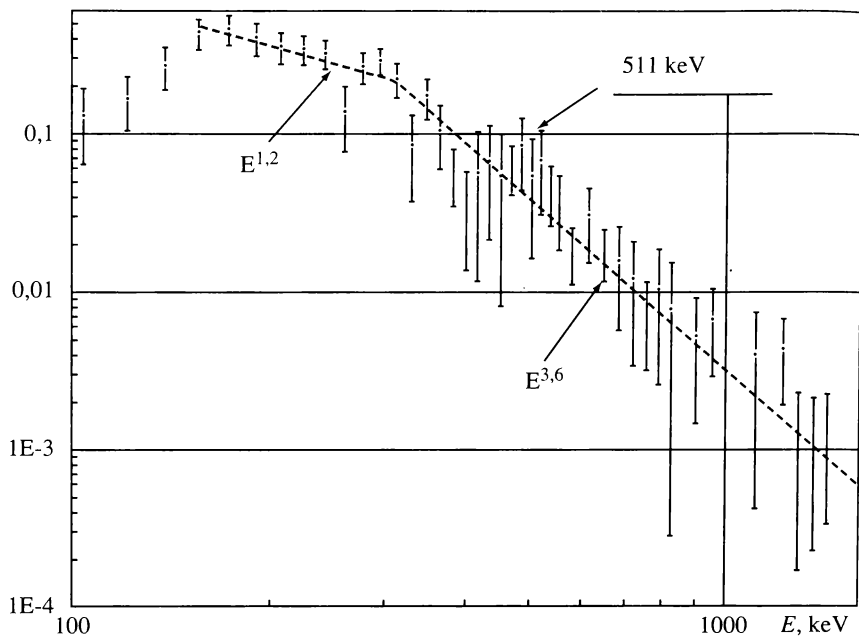


Fig. 3.20. Differential energy spectrum of the 18.09.2001 event obtained with the amplitude-time spectrometr AVC

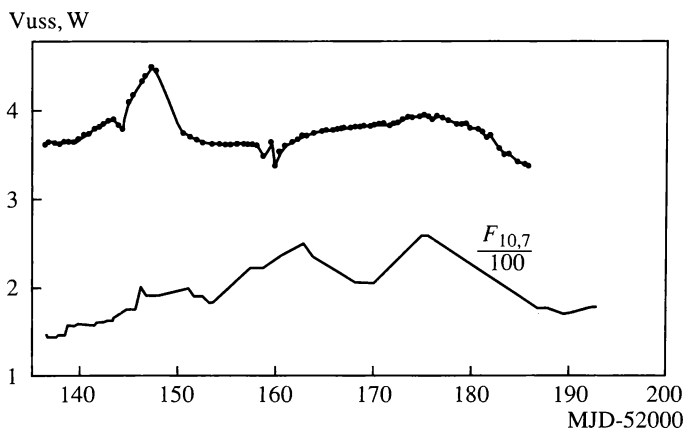


Fig. 3.21. Time record of a signal proportional to the UV flux as obtained with the "Vuss-L" device and 10.7 cm solar radio flux. The abscissa axis shows days in MJD system

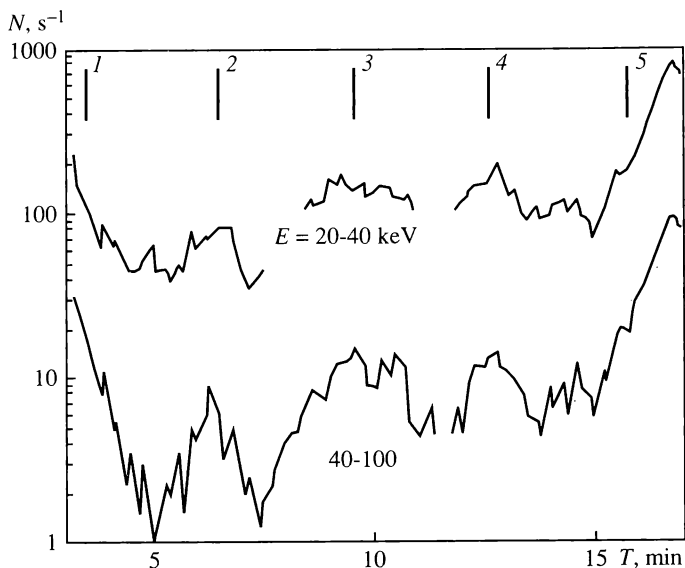


Fig. 3.22. Readings of the X-ray monitoring detector of the SPR-N device during a solar flare

1, 2 and 5 correspond to the magnetospheric electron bremsstrahlung; 3 and 4 correspond to X-ray emission from an extra-magnetospheric source (solar flare)

to measure the fluxes and spectra of the 1–200 MeV protons and 0.5–12 MeV electrons. The CKI-3 device determines the chemical composition and ion spectra within $Z = 1$ –10 for He in the energy range of 1.5–20 MeV/nucleon and Ne in the energy range of 4–40 MeV/nucleon. As distinct from the “Soho” and “Yohkoh” instruments, the “Song” spectrometer is able to measure the high-energy (up to 100 MeV) gamma quanta, including those, which result from the decay of π^0 -mesons produced in high-energy proton interactions. As shown by the “Coronas-F” onboard measurements of solar neutrons, the “Song” spectrometer has a background at least 5–7 times as low as the SMM GRS device – the only one recording solar neutrons in the same energy range.

The flare observed on 04.11.2001 at 16:20 UT gave rise to one of the most powerful increases of high-energy solar particles in the Earth’s environment. Fig. 3.22 illustrates the data from the SPR-N patrol detector obtained at the time when the satellite was crossing the polar cap. The X-ray flux in regions 1 and 5 corresponds to electron bremsstrahlung in the radiation outer belt; in region 2, a burst of magnetospheric electrons (MKL data) was detected; and enhancements 3 and 4 are real X-ray enhancements. Comparison with the GOES data has shown that, in spite of a continuous increase of the X-ray thermal emission from 16:03 till

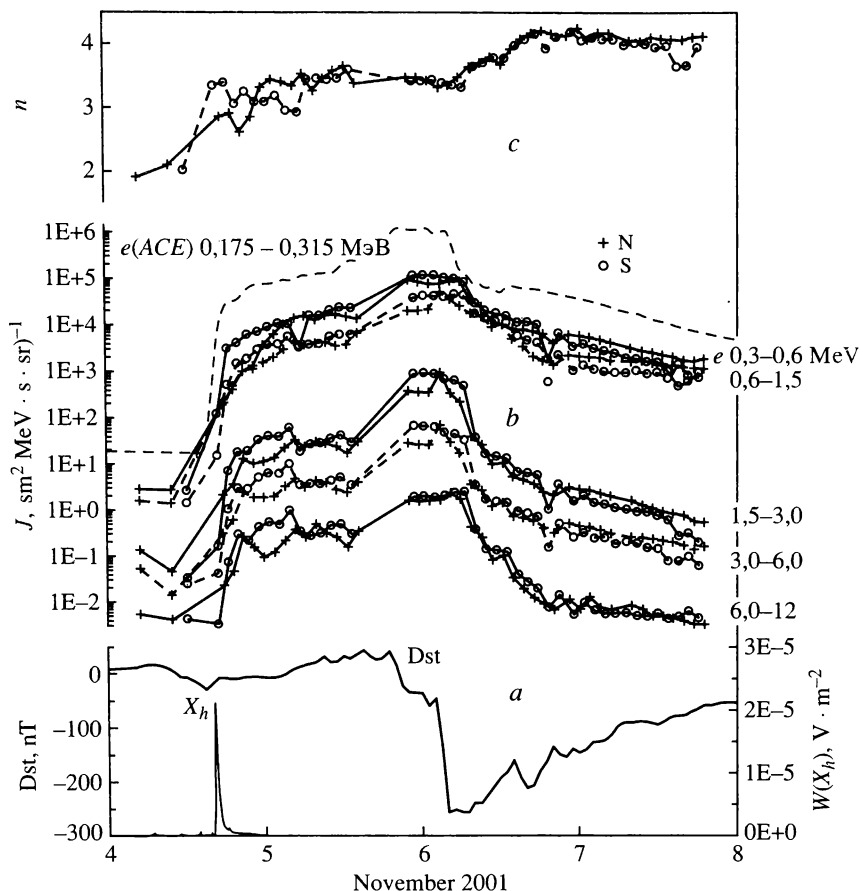


Fig. 3.23. some interplanetary and magnetospheric effects of the solar flare of 4.11.2001

Lower panel: flare-generated thermal X-rays X_h as given by "Goes-8" data and Dst-variation of November 4-7, 2001. Middle panel: 0.175–0.315 MeV electron fluxes in interplanetary space as given by ACE data and 0.03–12 MeV electron fluxes in polar caps and given by the "Coronas-F" SCR

16:20 UT, the bremsstrahlung revealed at least two pulses of particle acceleration on the Sun.

The flare produced high-energy particles, and geomagnetic disturbances started at 20:00 on November 5 as a result of the arrival of coronal plasma ejected in the November 4 flare. In Fig. 3.23, *a* shows radiation from the solar flare of November 4, 16:20 UT as recorded by GOES 8 and the Dst-variation. One can see that geomagnetic disturbance due to the arrival of a coronal mass ejection CME started at 20:00 UT on November 5. Since the mean CME velocity is ~ 1700 km/s, there must be

Table 3.3

The content of various elements (nuclei with energies of 11.4–23 MeV/nucleon)

Time	C	N	O	Ne	Mg	Si
22 h 04 Nov – 15 h 05 Nov	39.0 ± 3.9	11.9 ± 1.7	100	14.4 ± 2.3	17.9 ± 2.4	17.4 ± 2.2
22 h 05 Nov – 07 h 06 Nov	45.5 ± 3.4	10.4 ± 1.3	100	12.0 ± 1.4	20.6 ± 2.0	16.8 ± 1.8
07 h 06 Nov – 19 h 06 Nov	42.4 ± 6.5	11.2 ± 2.7	100	12.4 ± 2.7	16.8 ± 3.4	10.4 ± 2.6
19 h 06 Nov – 20 h 07 Nov	54.7 ± 12.6	8.5 ± 2.0	100	12.2 ± 4.6	21.6 ± 6.7	18.9 ± 6.0

a powerful shock wave in front of the CME. This conclusion was corroborated by ACE, “Wind”, and “Geotail” observations. The shock wave may be a powerful source of energetic particles. The measured protons and ions with the energies of 1–100 MeV/nucleon increased from the flare onset till the CME arrival at the Earth. In the process, the electrons were effectively accelerated by the shock wave. In Fig. 3.23b represents the time dependence of the 0.3–12 MeV electron fluxes measured simultaneously by other satellites outside the Earth’s magnetosphere. Shows variation in the power index of the electron energy spectrum Fig. 3.23a. The electron spectrum did not virtually change, while the CME was approaching the Earth. The electron spectrum softened and the electron flux decreased (the same as the proton and ion fluxes), as the CME moved away from the Earth.

The “Coronas-F” instruments also measure ion fluxes with the energies of 2–40 MeV/nucleon. Time variations of the ions from C to Si are similar to those obtained for protons and electrons. The ion composition remained practically unchanged during the burst of high-energy particles. Table 3.3 gives the content of various elements (nuclei with energies of 11.4–23 MeV/nucleon) in per cent of the oxygen content for four time intervals during the flare of November 4–7, 2001.

3.3 Research of the Solar wind by radiophysical methods

Using the data of radio occultation experiments with spacecraft “Venera”, “Ulysses”, “Galileo” the new information on the characteristics of solar wind was obtained for heliocentric distances between 5 and 80 solar radii such as velocity, spatial spectrum and intensity of the irregularities of the electron concentration, outer scale of plasma turbulence, anisotropy of irregularities. During coronal sounding experiments it was established, that the spectrum of the frequency fluctuations has a maxi-

mum, the appearance which one is conditioned by effect of the outer scale of turbulence of circum-solar plasma. The authentic information on the outer scale for the first time is obtained and is established, that it increases with heliocentric distance according to the power law with an exponent 0.8. In equatorial regions the outer scale changes from $7 \cdot 10^5$ up to $7 \cdot 10^6$ (i.e. from 1 up to 10 solar radii), and in polar coronal holes it approximately three times is more. The technique of finding of the outer scale of plasma turbulence is grounded on spectral and correlation analysis of large-scale continuous measurements of frequency fluctuations of the sounding signal at widely-spaced ground stations.

It is shown that the spectral index of electron density irregularities for distances larger than 20 radii of the Sun in inertial interval of 10^{-4} – $5 \cdot 10^{-2}$ Hz does not depend almost on heliocentric distance, and its average value is close to value applicable to spectrum of Kolmogorov (11/3). In the region of initial acceleration of the solar wind for distances between 5 and 10 solar radii the spectral density in inertial interval spectral index is close to 3.0. In the same region the high level of plasma irregularity reaching (20–30)% is detected. It is detected also that heliolatitude dependence of the characteristics of the solar wind is strong.

The speed of the solar wind in polar regions in some times exceeds the appropriate values for low latitude regions while intensity of the irregularities in high latitude regions is below, than in equatorial regions. In equatorial regions the speed of the solar wind regularly increases with heliocentric distance from 100 up to 400 km/s. The strong difference in turbulence regimes is revealed in the transition region between subsonic and supersonic flow of the solar wind, where is registered also change of the anisotropy coefficient of small-scale irregularities from 10 up to 2. The technique of analysis of the irregularities anisotropy of the solar wind is grounded on the analysis of simultaneous observations frequency and amplitude fluctuations of radio waves at widely spaced ground stations.

The analysis of the Faraday rotation fluctuations of the polarization plane of the “Helios-1” and “Helios-2” signals was carried out during superior conjunctions of these spacecraft. The technique permitting on experimental data to determine the characteristics of Alfvén waves propagating in the outer corona – intensity, velocity, spectrum of the magnetic field irregularities, characteristic frequencies is developed. It is established, that in the region of the solar wind acceleration on heliocentric distances between 3 and 10 radii the temporal spectra of fluctuations of the rotation angle of polarization plane contain quasiharmonic component with characteristic frequency about 4 millihertz, corresponding to 45-minute period of oscillations of the magnetic field. It is supposed, that the background spectrum is determined by an ensemble of Alfvén waves with random phases and quasiharmonic component in the

form of isolated trains. The amplitude of quasiperiodic fluctuations of the magnetic field has value about 0.1 from induction of regular magnetic field. From condition of excess of the contribution of isolated trains above the contribution of the turbulent background the estimations of characteristic transversal to radial direction of the scale of magnetic field fluctuations are obtained, which one appears about 30000 km. The obtained results demonstrate, that propagating from the Sun Alfvén waves play an essential role in the energy balance of plasma in the outer corona of the Sun and region of the solar wind acceleration. .

The change of the turbulence regime for irregularities of coronal magnetic field near boundary distance of 6 solar radii is revealed. The values of speed of the Alfvén waves for some heliocentric distances are retrieved. Typical velocity of Alfvén waves at heliocentric distances of 5 solar radii has compounded ~600 km/s.

The results were obtained jointly with the specialists of the Bonn and Bochum universities (Germany), which have provided for processing a large volume of the experimental data obtained with spacecraft “Helios”, “Galileo”, “Ulysses” and have participated in the processing and the interpretation of experimental dependences.

3.4. Development of radiophysical methods for research of the Earth ionosphere

The improvement of radio occultation method of space monitoring of atmosphere and ionosphere with usage of radiolines Satellite-Satellite was conducted. The experimental investigations are carried out using radiolines Station MIR-geostationary satellites. The new effective holographic method of investigation of height profiles of atmosphere temperature and electron concentration of ionosphere using phase and amplitude variations was advanced and developed . The new method of monitoring of small-scale irregular structure of troposphere and stratosphere is designed with usage of radiolines Satellite-Satellite.

Chapter 4

RESULTS OBTAINED IN THE DIRECTION OF FUNDAMENTAL SPACE RESEARCH “PLANETS AND SMALL BODIES OF SOLAR SYSTEM”

Russian scientific instrument HEND was developed for NASA spacecraft “2001 Mars Odyssey”, which was launched in April 7, 2001. HEND (High Energy Neutron Detector) measures flux of fast neutrons from Mars for studying of the mineralogical composition of Martian sub-surface. In particular, HEND allows to find the water-rich regions on Mars. The knowledge about subsurface water is very important for plans of future missions to Mars and for testing the presence of life on the planet. In October 24 2001 the “Odyssey” was inserted on the Martian elliptical orbit and started the aerobraking stage.

During a month of orbital flight from November 19 till December 19, 2001, HEND has obtained a large volume of data on the flux of neutrons along 70 shrinking revolutions around the planet at distances 250–20 000 km from the Martian surface. These data were used to create 3-dimansional model of neutron cloud around Mars.

At February 18th, 2002, HEND has started the mapping of Martian neutrons at different energy ranges. The first data has clearly pointed out that there are regions on Mars with high content of water ice in the subsurface layer (Fig. 4.1 (see color photo)). They were named “permafrost regions” similarly to terrestrial permafrost areas. The southern permafrost region covers about 10 million squ. km above 60° of south latitude. According to present estimations, there is about 35–50 weight per cents of water ice in the upper-most layer of this region. The data from HEND agrees very well with data from another instruments on the Odyssey.

The data of May – July 2002 shows the beginning of seasonal evaporation of carbon dioxide frost from the northern hemisphere. Fig. 4.2 (see color photo) 2 compares maps of neutron fluxes of Mars measured in February and in September 2002 (top and bottom maps, respectively). September data provides clear evidence for the presence of another large northern permafrost region on Mars.

RESULTS OBTAINED IN THE DIRECTION OF FUNDAMENTAL SPACE RESEARCH “STUDIES OF COSMIC RAYS AND RADIATION”

5.1. Studies of sep on the “Coronas-F” satellite

According to the Federal space program of Russia the Coronas-F satellite was launched on July 31st, 2001 for studies of active processes on the Sun. The instrument set SKL (consisting of “Song”, MKL, SKI-3 instruments) designed for measuring fluxes of energetic neutral and charged particles, generated in solar flares (a joint effort of the Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics MSU and the Institute of Experimental Physics of the Slovak Science Academy, Kosice, Slovakia) was installed onboard “Coronas-F”. The “Song instrument measures X-ray continuum in the 0.06–100 MeV energy range, γ -lines in the 0.3–25 MeV energy range, neutrons in the 20–100 MeV energy range and electrons within 10–110 MeV. The MKL instrument measures electrons with energies of 0.3–12 MeV, protons within 1–90 MeV. The SKI-3 instrument measures nuclei with energies of 2–40 MeV/nucl. The satellite also carries the SPR-N instrument, which measures the polarization of flare emissions (the instrument was developed by SINP MSU in collaboration with the Lebedev Physics Institute of the Russian Science Academy).

The flares which occurred on September 21st; November 4th, and December 11th, 2001 at 08h 08 min the maximums of the flare are given according to “Goes” data) were studied. The first and third flares did not lead to noticeable increased of energetic particles in near-Earth space. The second flare led to one of the largest increases of solar energetic particles in near-Earth space. Fig. 3.22, cap. 3 shows the data of the patrol detector of the SPR-N instrument, measured when the satellite passed through the polar cap. The flux of emission in locations 1 and 5 corresponds to electron bremsstrahlung of the outer radiation belt, an increase of magnetospheric electrons (data of the MKL instrument) was observed in location 2, increases are actual increases of emissions. Comparison with “Goes data shows, that in

spite of continuous increase of the flux of thermal emission from 16h 03 min to 16h 20 min the bremsstrahlung gives evidence of at least two particle acceleration pulses on the Sun. After the flare solar energetic particles appeared and at 20h on November 5th geomagnetic disturbances (associated with the arrival of the coronal plasma, ejected in the flare of November 4th) began. The lower panel of Fig. 3.23 shows the emissions of the solar flare at 16:20 UT on November 4th, according to “Goes” data and the Dst variation. It can be seen, that the geomagnetic disturbance, associated with the arrival of the CME at the Earth, began at ~20h UT on November 5th. The mean travel velocity of the CME is ~1700 km/s, therefore there should be a powerful shock in front of it. Measurements of the interplanetary magnetic field on ACE, WIND, GEOTALL satellites confirm this conclusion. This shock can serve as a powerful source of energetic particles. The measured fluxes of protons and ions with energies from 1 to 100 MeV/nucL grew from the moment of the flare to the time of arrival at the Earth. It is interesting, that the shock effectively accelerated electrons. The middle panel in Fig. 3.23 shows the time dependencies of electron fluxes with energies from 0.3 to 12 MeV, which were not measured by other satellites outside the magnetosphere during this time. The upper panel of Fig. 3.23 shows the changes in the energy spectra of electrons. The electron spectrum practically did not change during the time while the CME moved towards the Earth. The electron spectrum became softer, and the flux of electrons, protons and ions began to decrease when the CME moved away from the Earth. The “Coronas-F” satellite also measured fluxes of ions with energies from 2 to 40 MeV/nucL. The time variations of ions from C to Si were similar to the variations of protons and electrons. The chemical composition of ions during the whole energetic particle flare did not change. Table 3.3 shows the content (in percent) of different elements relatively to oxygen for four time intervals during November 4–7. The acceleration of electrons in interplanetary space at the front of the shock was also observed after the flares of November 22nd at 20h 26 min and 23h 30 min.

5.2. Studies of heavy and ultra-heavy cosmic ray nuclei in scope of the ‘Platan’ experiment

The Ioffe Physical-Technical Institute in collaboration with SINP MSU conducts systematic studies of heavy and ultra-heavy cosmic ray nuclei using solid-state track detectors ‘Platan’ onboard OSS ‘Mir’ and the ISS, starting from 1978.

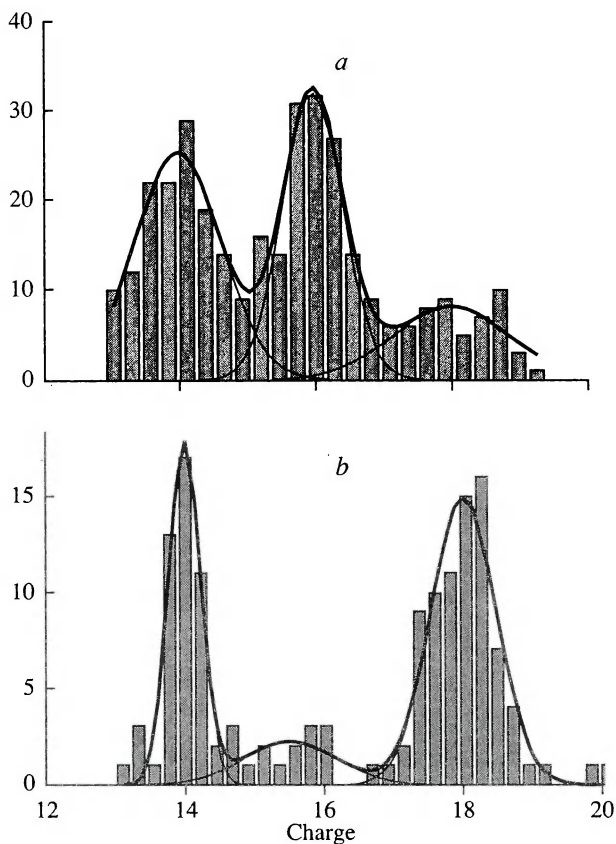


Fig. 5.1. Charge distribution of cosmic ray particles measured inside the Earth's magnetosphere in experiments:

a – Platan-3, 1988–1990: detector thickness – 180 mkm; solar cosmic rays; *b* – Platan-5, 1994–1997; detector thickness – 60 mkm; anomalous Ar and galactic Si, S, K nuclei

The goal of the experiment is to carry out a systematic study of the energy spectra of heavy and super-heavy cosmic rays (CR) on large time-scales (the order of several solar cycles) and to obtain data on the variations of the function, describing particle penetration into the Earth's magnetosphere. This function can be used to reconstruct the spectrum of nuclei penetrating into the Earth's orbit, and to accomplish the reverse procedure.

The integral nature of the solid-state track detector of nuclei (STD) also permits to study low energy CR small energy nuclei of different origin (galactic, solar and anomalous) due to the difference in the shape of the energy spectra in corresponding energy intervals, and the degree of particle ionization. And, finally, recording of particles during different

phases of the solar activity (SA) cycle permits to distinguish between different CR components. In this case the integral STD can be regarded as differential in time on time-scales of 20–30 years.

Recently an estimate was made of the flux of Argon nuclei in the anomalous cosmic ray (ACR) component in the 15–60 MeV/nuc energy range. The importance of these results is due to the fact, that currently there are no data on the existence of ACR Argon ions trapped in the Earth's magnetosphere in this energy range.

The experiment permits to estimate the flux of interplanetary ACR Argon, since the contribution of GCR argon inside the magnetosphere is quite small. Obtaining data on the interplanetary ACR Ar at high energies is very important because according to some model concepts ions in the heliosphere can be accelerated to such energies only if their charge exceeds +1 (Fig. 5.1).

The charge distributions for light element ions, recorded in the "Platan-3" and "Platan-5" experiments are shown in Fig. 5.1a and 5.1b respectively. In the "Platan-5" experiment (with detector layer thickness of 60 microns). Ar nuclei of the ACR component can be reliably resolved against the background of less abundant neighboring GCR nuclei at energies of 15–20 MeV/nuc.

5.3. Dynamics of the Earth's outer radiation belt during the 23-RD solar activity cycle

Studies of the magnitude and dynamics of electron fluxes of the Earth's outer radiation belt with energies of 0.8–6.0 MeV were carried out on the geostationary satellite "Express-2A" (at altitudes of 36.0 thousand km) during maximum of the 23rd SA cycle. Fig. 5.2 shows experimental data for 3 ranges of electron energies, as well as Dst index variations and solar wind velocity V_{sw} . The histograms denote the averaged 27 day values of electron fluxes. The results were obtained using the monitoring instrument set "Diera", developed at SINP MSU. Significant (within 2–3 orders of magnitude) variation of electron fluxes can be seen, depending on the level of solar and geomagnetic activity. In particular, a prolonged decrease of electron intensity, caused by the decrease of solar wind velocity to values of $V_{sw} \leq 400 \text{ km s}^{-1}$, can be seen at the end of 2000 and the beginning of 2001. The obtained results indicate the necessity for developing the mechanism of electron acceleration to relativistic energies in the outer regions of the Earth's magnetosphere, which can be induced by solar wind and interplanetary magnetic field parameters.

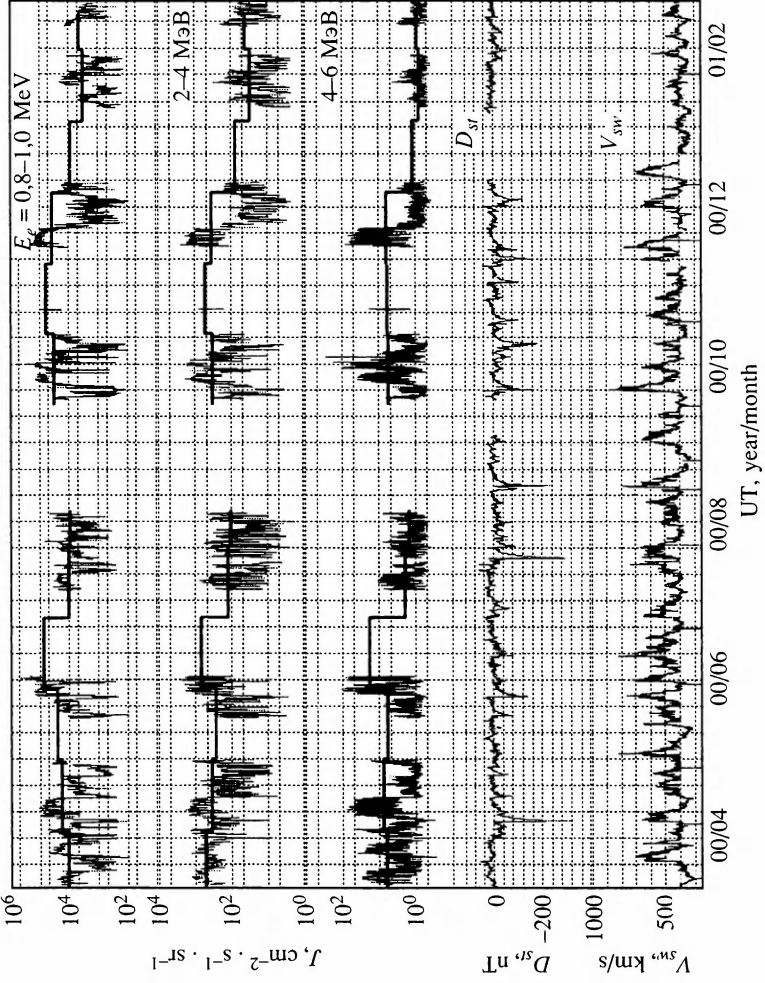


Fig. 5.2. Variations of outer radiation belt electrons according to data of the "Express-A2" satellite

5.4. Radiation environment monitoring on the OSS “Mir”

Radiation environment monitoring was carried out onboard the OSS using the R-16 dosimeter, developed at INP MSU. This research is a continuation of the work, which started on “Mir” station in 1986, using a similar instrument.

Fig. 5, shows the daily averaged doses inside the OSS, measured by two dosimeters D1 and D2 of the R-16 instrument. The two dosimeters have different passive shielding thicknesses, and, respectively, different threshold energies for the measured particles. Fig. 5.3 shows significant variations of the dose according to the data of the low-energy dosimeter D2, caused by SEP proton fluxes from the powerful flares of 2000–2001. The time period of 01.01–04.01 is of specific interest due to the minimum values, recorded by the D2 dosimeter, which are close to measurements of the higher energy dosimeter D1. This could be caused by the absence of SEP events during this period, the decrease of relativistic electron intensity in the outer radiation belt due to low velocity of the solar wind and decrease of the inner belt proton fluxes at low altitudes during solar activity maximum due to atmospheric density increase.

5.5. Studies of ^7Be isotopes in the upper atmosphere of the Earth

During a number of years (starting from 1996) studies of the concentration dependence of the radioactive isotope Be-7 in the upper atmosphere of the Earth on solar flare activity were carried out on satellites of

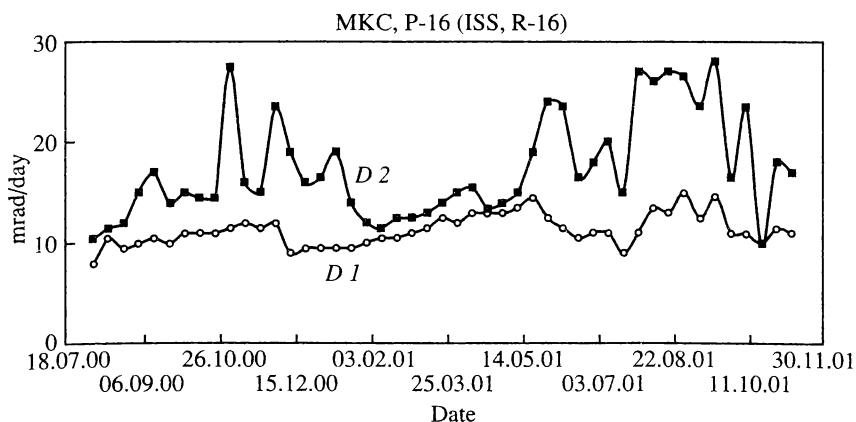


Fig. 5.3. Variations of radiation doses onboard ISS according to data of the R-16 instrument

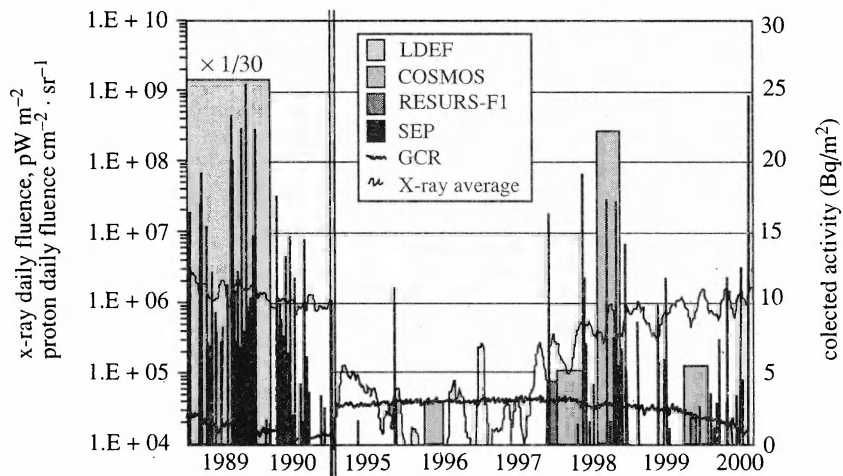


Fig. 5.4. Be-7 activity measured in different experiments versus solar proton and X-ray fluences

the 'Cosmos' and 'Resource' series. Constant orientation of satellites permitted to collect different nuclei, which were in thermal equilibrium with the surrounding atmosphere, on one side of the detector (orientated in the velocity vector direction). After satellite recovery the gamma-spectroscopy technique was used to study the different radioactive isotopes deposited on the plate. The Be-7 isotope was discovered in all the experiments. As a result of prolonged satellite experiments the solar origin of Be-7 isotopes in near-Earth space was proved: the most probable mechanism of their generation are interactions of cosmic rays penetrating into the magnetosphere during solar flares (Fig. 5.4).

MAIN RESULTS ACHIEVED AT “EXTRA ATMOSPHERE ASTRONOMY”

6.1. “Rentgen-Ksvant” Project

Astrophysical “Rentgen” observatory on “Kvant” module was docked to “Mir” space station in 1987 and had operated till March, 2001”. It was more than 3000 observational session made during 14 years of operation. The scientific devices were fully functional and operated till “Mir” station reentry. Many important scientific results were obtained during observational period and KVANT module became the leading atrophysical observatory with the longest operational period in the world history. Four different scintific experiments were in the operation on RENTGEN observatory. Namely they are TTM/COMIS, HEXE, GSPC and Pulsar-X-1 experiment sensiitive from several keV up to several hundred keV.

Regular observations of X-ray sources by X-ray telescopes of RENTGEN observatory have started in 1987, much before of launch of ther X-ray observatories as ASCA (1993), RXTE (1994), BeppoSAX (1996). In 1998–1993 years “Rentgen” observatory onboard “Kvant” module got unique data for many space X-ray sources, which were intensively observed by other observatories in the following years. Intensive work of “Rentgen–Kvant” have continued until very end of mission. Between of very last results one might to note the following.

A catalog of X-ray sources as observed by the TTM/”Comis” telescope onboard the “Mir–Kvant” observatory is produced. Brief information about the 67 sources detected at a confidence level higher than 4 sigma between 1988 and 1998 is provided. X-ray properties and characteristic spectra of different types of sources are briefly descrbed. In the catalog the complete information about the observations of individual sources is provided, including total session number, total exposition time, time when source was ‘switched-on’ which is important for study of transient sources. Totally 67 sources are described. Eighteen sources are transients, 13 – pulsars, 18 – bursters, 17 are Black Hole candidates 2 – microquasars with superluminal jets (namely GRS 1915 + 105 and

GR(O J1655–40), one source is the supernova remnant – Crab nebula, two Active Galaxy Nuclei – NGC 4151 and CEN A and six X-ray Novae. From the other side studied objects could be classified as high mass X-ray binaries – 15 objects and low mass X-ray binaries – 46 sources. Six of 67 objects included into catalog are extragalactic ones (SMC X-1, LMC X-1, LMC X-2, LMC X-4, NGC 1415 and Cen A). Short spectral classification for every class of the observed objects is also provided.

Additional analysis of 175 sessions of Galactic-center observations with the TTM/COMIS telescope onboard the “Mir–Kvant” observatory from 1987 until 1998 was performed to study of recently discovered of ‘mepty-field’ X-ray bursts. Because of its wide field of view ($\sim 15^\circ \times 15^\circ$), much of the Galaxy and, hence, a large number of X-ray sources were simultaneously within the telescope aperture. During the observations, 47 X-ray bursts were detected, 33 of which are most likely type I bursts related to unstable helium burning on the surfaces of neutron stars. All the detected type I bursts were identified with known X-ray sources; the pre- and post-burst luminosities of these sources measured with the TTM telescope were high. No bursts were detected from voids, i.e., from sources whose luminosities in quiescence did not exceed the TTM detection threshold. This result allowed to constrain the combination of the number of binary sources with low accretion rates and the properties of X-ray bursts from such sources, in particular, the peak luminosity during bursts and the frequency of their occurrence.

For analysis of observations of the burster 4U 1724–307 (1E 1724–3045) in the globular cluster Terzan 2 from 1971 until 2001 it was used data from many different experiments. Uhuru, OSO-8, Einstein, and EXOSAT observations are used in addition to data from the TTM telescope and from the ASM and PCA instruments onboard the RXTE observatory. Based on PCA/RXTE scannign observations, we have mapped the sky in the Galactic-center region. The derived light curve of the burster 4U 1724–307 shows the source to be variable on a time scale of 30 yrs: over the first 20 years of observations (1970–1990), the source flux was approximately constant, while in the 1990s, it rose over ~ 5 years and declined over approximately the same period, approaching its original value. It was discussed several scenarios to explain the behavior of the unusual light curve, including the evolution of the mass outflow rate from the donor-star surface, the episodic appearance of a second source in the globular cluster, and gravitational microlensing. As one of the scenarios, also consider the possibility that the passage of a third star affects the accretion rate in the binary 4U 1724–307. It was shown that if this event is responsible for the 10-year-long rise in the luminosity of the burster 4U 1724–307, then the size and period of this binary can be estimated.

6.2. “Granat” Project

The goals of “Granat” observatory (1990–1998) has been wide-range astrophysical research in X-ray and gamma-ray bands (from 3 keV up to 100 MeV) allowing to obtain localization, analysis of spectra and temporal variability of compact sources (neutron stars and black holes), detecting cosmic gamma-ray bursts and high energy solar flares, search for transient cosmic sources with only short-lived flares. X-ray sources stand out due to their monstrous gravitational and magnetic fields, extremely high plasma temperatures (up to some billion degrees) and densities of radiation energy not available in ground based laboratories. In the course of observations highly valuable information had been obtained on the nature of neutron stars and black holes – the objects in Universe whose energy is powered by accretion of matter in strong gravitational fields. The basis of fruitful work of the observatory working in hard X-ray band had been felicitous orbit choice of “Granat” spacecraft (apogee 200000 km, period 4 days). Such an orbit allowed to carry out long term continuous observations above the Earth’s radiation belts, which is especially important for the instruments capable of detecting X-rays. Stable spacecraft operation which allowed to point telescopes at the required regions of celestial sphere, good angular and spectral resolution of scientific instruments and devoted work of all specialists involved in project secured the success of “Granat” observatory.

For the first time early afterglow of bright cosmic gamma-ray burst of July 23rd, 1992 (GRB920723) imaged by the secondary optics of “Sigma telescope had been detected. After the burst with a duration of ~6s, fading soft gamma emission (35–300 keV) had been observed for ~1000s. Approximately 20 per cent of burst energy had been emitted during this stage. The afterglow had been fading at the power law with the index of -0.7 . Steep decrease of the hardness had been observed at the moment when the afterglow starts to prevail over the emission of gamma-burst itself.

The early afterglows of two bright gamma-ray bursts 910402 and 920723 have been analyzed in 100–500 keV energy range at the time scales up to 1000s. Lightcurves show powerlaw behavior with the slope close to -0.6 and -0.7 , hardness of the energy spectrum also decreasing abruptly at the beginning of afterglow phase. The afterglow of GRB910402 showed an increase of spectral hardness with time.

Data of ART-P telescope collected during observations of transient X-ray pulsar 4U0115 + 634 at the time of its flare in February 1990 had been analyzed. The source was exhibiting a strong regular and irregular variability. Bursts of X-ray emission with duration of 300–500s had been observed. Two absorption features at energies ~ 12 and ~ 22 keV had been detected in the photon spectrum of the source, apparently related to

the resonance scattering of its emission at the first and second harmonics. The value of magnetic field in the neutron star corresponding to these features reached $\sim 1.3 \times 10^{12}$ Gs. The ratio of line energies differed a few from the harmonic one (1:2), moreover, this value and line energies themselves were significantly changing with the phase at the timescales of one pulsation period. Spectral states and flare properties of X-ray bursters had been studied. Using the data from ART-P telescope of “Granat” observatory the detailed analyses of emission of two bursters near the Galactic Center (A1742-294 and SLX1732-304) had been performed. It has been shown that the quiescent emission of both sources is well described by the spectrum typical for the low-mass X-ray binaries with a prominent exponential break, while the low state spectrum of the second source can be satisfactorily fitted by a simple power law. The dependence of pulse profile on the flux value had been found in A1742-294 for the first time. Direct measurement of the mean interval between these events had shown that it turned out to be several times less than previously thought. The evolution of luminosity and source temperature during the most powerful bursts detected from these sources had been investigated in detail.

6.3. “Burst” Project

The extraordinary manifestation of activity of Cygnus X-1 (Cyg X-1) was discovered by the Russian-American experiment “Konus”–“Wind” jointly with GRB experiment aboard the “Ulysses” spacecraft. The most firmly established black hole candidate Cyg X-1 is one of the brightest galactic X-ray sources. Cyg X-1 is known to exhibit two states of X-ray emission: most of the time it spends in the hard state where the soft X-ray (2–10 keV) luminosity is relatively low, sometimes it undergoes a transition to the soft state, in which the soft X-ray luminosity increases by a factor 2–4, while the hard X-ray (10–100 keV) luminosity decreases by a factor about 2. Six exceptionally intense gamma-ray outbursts from this source with durations from 10000 to 20000 s were detected between 1995 and 2003 in the energy range 10–1000 keV. The peak fluxes of these outbursts were an order of magnitude higher than those observed earlier. The outburst fluences reached 3×10^{-3} erg cm⁻². The detailed temporal and spectral characteristics of these events were obtained by the “Konus”–“Wind” experiment. The spectral data indicate that these outbursts display the same parameters as those of the underlying hard or soft states, suggesting that they represent another manifestation of these states. These results clearly demonstrate the abilities of Interplanetary Network to localize and investigate the long-duration intense bursts from transient X-ray sources.

The fast spectral variability of cosmic gamma-ray bursts (GRBs) was studied using the data obtained by the “Konus”–“Wind” (aboard “Wind” s/c), “Konus-A” (aboard “Kosmos-2367” s/c) and “Helicon” (aboard “Coronas-F” s/c) experiments. Despite the limitations due to disturbances from the radiation belts and Earth occultation, the “Konus-A” and “Helicon” experiments on the low-earth spacecraft played an important role providing the simultaneous and independent detection of bursts by similar instruments, thereby substantially increasing the registration reliability of fine details in temporal and spectral characteristics of bursts. The obtained data contain a body of information for constructing the models of generation mechanism of powerful emission in gamma-ray sources. The processing of data on time histories and spectra of special sub-group of short hard gamma-ray bursts was performed. The unusual properties of these bursts attract interest to them and are widely discussed in the scientific literature. The comprehensive data on time history and spectra for more than 100 such GRBs are collected in the catalog, which is prepared in the paper and electronic forms.

The “Konus”–“Wind” experiment is one of three basic points of the Interplanetary Network (IPN), which performs very precise localizations of GRB sources by triangulation method. In 1999–2003 the IPN precisely localized more than 150 GRBs. This permitted to carry out a high-sensitivity search of activity of GRB sources in optical and radio bands by ground-based telescopes, to study GRB afterglows and their related characteristics, especially the cosmological redshifts.

A renewal of activity of the soft gamma repeater SGR 1900 + 14 was observed in February 2002 by the “Konus”–“Wind” and “Helicon” experiments. Several tens bursts had been detected from this source during two days. The similar behaviour of SGR 1900 + 14 was observed earlier in May 1998.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Глава 1. Состояние работ по космическим проектам научного назначения Федеральной космической программы России	7
1.1. Физика космической плазмы и солнечно-земных связей	7
1.2. Внеатмосферная астрономия	12
1.3. Космическая биология и физиология	19
1.4. Исследования Земли из космоса	21
1.5. Физика космических лучей	21
1.6. Планеты и малые тела Солнечной системы	23
1.7. Космическое материаловедение	26
Глава 2. Результаты, полученные по направлению ФКИ “Космическая биология и физиология”	27
2.1. Окуломоторные реакции и координация головы и глаз в условиях микрогравитации	27
2.2. Результаты исследований влияния факторов космического полета на сенсомоторные функции	31
2.3. Физические и радиобиологические основы для совершенствования норм радиационной безопасности космических полетов	39
2.4. Цитогенетические нарушения в лимфоцитах крови членов экипажей орбитальной станции “Мир”	43
2.5. Системы жизнеобеспечения и оптимальный изотопный состав среды обитания космонавтов в условиях длительных экспедиций	45
2.6. О физиологических механизмах изменений костной системы человека в космическом полете	52
2.7. Гравичувствительность эндотелиальных клеток человека <i>in vitro</i>	57
2.8. Исследование влияния условий невесомости на постэмбриональное развитие птенцов японского перепела	63
2.9. Рост и развитие пшеницы в ряду поколений в условиях космического полета на борту орбитального комплекса “Мир” ..	68
Глава 3. Результаты, полученные по направлению ФКИ “Физика космической плазмы и солнечноземных связей”	75
3.1. Проект “Интербол”	75
3.2. Проект “Коронас-Ф”	87
3.3. Исследования околосолнечной плазмы радиофизическими методами	106
3.4. Развитие радиофизических методов для исследования ионосферы	108
Глава 4. Результаты, полученные по направлению ФКИ “Планеты и малые тела Солнечной системы”	109

2.8. Investigations into the effects of microgravity on the post-embryonic development of the japanese quail	176
2.9. Growth and development of wheat in a sequence of generations under the spaceflight conditions of the OSS "Mir"	180
Chapter 3. Results obtained in the direction of fundamental space research "Solar-terrestrial physics"	185
3.1. Project "Interball"	185
3.2. Project "Coronas-F"	195
3.3. Research of the Solar wind by radiophysical methods	213
3.4. Development of radiophysical methods for research of the Earth ionosphere	215
Chapter 4. Results obtained in the direction of fundamental space research "Planets and small bodies of solar system"	216
Chapter 5. Results obtained in the direction of fundamental space research "Studies of cosmic rays and radiation"	217
5.1. Studies of sep on the coronas-F satellite	217
5.2. Studies of heavy and ultra-heavy cosmic ray nuclei in scope of the "Platan" experiment	218
5.3. Dynamics of the Earth's outer radiation belt during the 23-rd solar activity cycle	220
5.4. Radiation environment monitoring on the OSS "Mir"	222
5.5. Studies of ^7Be isotopes in the upper atmosphere of the Earth	222
Chapter 6. Main results achieved at "Extra atmosphere astronomy" ...	224
6.1. "Rentgen-Kvant" Project	224
6.2. "Granat" Project	226
6.3. "Burst" Project	227

Глава 5. Результаты, полученные по направлению ФКИ “Исследование космических лучей и радиации”	111
5.1. Исследования солнечных энергичных частиц на ИСЗ “Корона-Ф”	111
5.2. Эксперимент “Платан” по изучению тяжелых и сверхтяжелых ядер космических лучей	112
5.3. Динамика внешнего радиационного пояса Земли в максимуме 23-го цикла солнечной активности	114
5.4. Мониторинг радиационной обстановки на МКС	116
5.5. Исследование изотопов ^7Be в верхней атмосфере Земли	116
Глава 6. Результаты, полученные по направлению ФКИ “Внеатмосферная астрономия”	118
6.1. Проект “Рентген-Квант”	118
6.2. Проект “Гранат”	120
6.3. Проект “Всплеск”	122

CONTENTS

Introduction	124
Chapter 1. State of works on scientific space projects of the Federal Space Programme of Russia (for January 1. 2002)	126
1.1. Physics of space plasma and solar-terrestrial interactions	126
1.2. Extra Atmospheric astronomy	130
1.3. Space biology and physiology	137
1.4. Earth observations	139
1.5. Space ray physics	139
1.6. Studies of planets and small bodies of the solar system	141
1.7. Materials processing in space	143
Chapter 2. Results obtained in the direction of fundamental space research “Life Science”	144
2.1. Oculomotor reactions and eye-head coordination in microgravity ...	144
2.2. Microgravity effects on sensory-motor functions	150
2.3. Physical and radiobiological basis for improving space flight radiation safety standards	157
2.4. Cytogenetic studies of blood lymphocytes from OS “Mir” crews	159
2.5. Life support systems and optimal isotope composition in cosmonaut habitats for long-term missions	161
2.6. Physiology mechanisms of human skeletal system changes in space flight	166
2.7. Gravisensitivity of the cultured human vascular endothelium	171

Results of Fundamental Research in Russia. 1999–2001. National report / Ed. by A.A. Boyarchuk. – Moscow, Nauka, 2004.–232 p.
ISBN 5-02-002860-6

The national report conducting a three-year period (1999–2001) of conducting fundamental space research and is prepared by the Council for Space Research of the Russian Academy of Sciences (RAS) basing on the materials submitted by the RAS research institutes and higher educational institutions responsible for scientific programs of space projects under the Russian Federal Space Program.

Научное издание

**РЕЗУЛЬТАТЫ
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
В РОССИИ. 1999–2001.**

Национальный доклад

*Утверждено к печати Исполнительным бюро по космосу
Российской академии наук*

Зав. редакцией *Н.А. Степанова*

Редактор *С.М. Бабич*. Художник *Ю.И. Духовская*

Художественный редактор *В.Ю. Яковлев*. Технический редактор *О.В. Аредова*

Корректоры *З.Д. Алексеева, Т.А. Печко, М.Д. Шерстенникова*

Подписано к печати 12.02.2004. Формат 60 × 90 1/16. Гарнитура Таймс
Печать офсетная. Усл.печ.л. 14,5 + 0,5 вкл. Усл.кр.-отт. 17,0. Уч.-изд.л. 15,0
Тираж 550 экз. Тип. зак. 9603

Издательство “Наука”, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 90

E-mail: secret@naukaran.ru Internet: www.naukaran.ru

ППП “Типография “Наука” 121099, Москва, Шубинский пер., 6



RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

NATIONAL REPORT

THE RESULTS
OF FUNDAMENTAL
SPACE RESEARCH
in Russia
1999–2001

NAUKA