

**Материалы для Национального доклада о результатах
фундаментальных космических исследований в России
за 2010-2011 годы**

НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына

Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Целью научного исследования коллектива является получение качественно новых знаний и количественных сведений о фундаментальных законах, которым подчиняется взаимосвязанная динамика космической радиации и электромагнитных процессов на Солнце, в гелиосфере и магнитосфере Земли. Экспериментальные и теоретические работы направлены на создание практически важных физических основ для мониторинга состояния околоземного космического пространства и для выяснения механизмов воздействия факторов космической радиации на космические и наземные системы в условиях меняющейся солнечной активности. Проведены космические эксперименты и интенсивные теоретические исследования в комплексе с математическим моделированием и созданием современных систем хранения данных мониторинга среды. Основной тематикой работ в 2010-2011 гг. было исследование солнечно-земных связей: изучение радиационной обстановки в межпланетном и околоземном пространстве в течение цикла солнечной активности, включая 2010 и 2011 гг. – период роста 24-го цикла солнечной активности после затянувшегося минимума.

I. Разработка и создание научной аппаратуры для измерений радиации в космосе на борту ИСЗ.

В 2010-2011 гг. осуществлены успешные запуски ИСЗ с научной аппаратурой, разработанной и созданной в НИИЯФ МГУ:

- Девять ИСЗ серии ГЛОНАСС (круговая орбита на высоте 20 тыс. км) с радиометром дозы (РД), осуществляющими мониторинг околоземного космического пространства (с 2005 г. на орбите функционирует 29 ИСЗ ГЛОНАСС с РД на борту);
- Солнечно-синхронный спутник «Метеор-М1» (полярная орбита с высотой ~830 км) с приборами МСГИ-МКА и СКЛ-М для регистрации потоков электронов с энергией от ~100 кэВ до ~20 МэВ и протонов с энергией от ~1 до ~300 МэВ;
- Геостационарный ИСЗ «Электро-Л» (высота ~36000 км; долгота — 76°) со спектрометром СКЛ-Э, предназначенным для регистрации электронов радиационного пояса Земли и протонов радиационного пояса Земли и солнечных вспышек;
- Российско-Индийский университетский спутник «ЮтСат» (солнечно-синхронная круговая орбита с высотой около 800 км) с аппаратурой СОЛРАД, предназначенной для регистрации жесткого излучения (гамма-квантов с $E=0.02-5.0$ МэВ) и заряженных частиц солнечных вспышек (электронов с $E=0.1-4.0$ МэВ и протонов с $E=2-80$ МэВ). Блок детектирования ориентирован на Солнце.
- Микроспутник ИКИ РАН «Чибиc-М» (круговая орбита с высотой ~500 км и наклоном 51°) с детекторами рентгеновского и гамма-излучения РГД (0.2-2.0 МэВ) и ультрафиолетового (300-400 нм) и красного (600-700 нм) излучения ДУФ для

регистрации атмосферных всплесков оптического, ультрафиолетового, рентгеновского и гамма-излучения, связанных с грозовыми разрядами.

Проведены экспериментальные исследования радиационных полей магнитосферы Земли на борту выше перечисленных ИСЗ, а также системой радиационного контроля, функционирующей на Международной космической станции (система полупроводниковых дозиметров ДБ-8). Получен большой объем экспериментальной космофизической информации. Продолжены разработка и создание комплектов научной аппаратуры для исследования радиации в околоземном космическом пространстве на борту спутников.

Планируемые эксперименты

Проект МГУ «Ломоносов»

МГУ приступил к реализации нового научно-образовательного проекта «Ломоносов». Московский государственный университет носит имя М.В. Ломоносова, 300-летний юбилей которого отмечался в 2011 г. Имя М.В.Ломоносова «на борту» спутника – память и дань уважения выдающемуся российскому ученому, много сделавшему для становления МГУ, кроме того научная проблематика, занимавшая ум нашего великого соотечественника, близка к научным целям проекта «Ломоносов».

Запуск спутника «Ломоносов» будет третьим в рамках космической научно-образовательной программы «МГУ-250», предусматривающей создание недорогой космической платформы для экспериментов в космосе силами университетских учёных, преподавателей и студентов. Запуски спутников «Университетский-Татьяна» (2005 г.) и «Университетский-Татьяна-2» (2009 г.) имели свое продолжение в решении многих актуальных задач космических наук и образования в МГУ.

Целью создания космического аппарата «Ломоносов» является проведение фундаментальных исследований в области физики космических лучей, астрофизики и магнитосферной физики.

За основу космического аппарата (КА) «Ломоносов» взята платформа «Канопус-В», разработанная во Всесоюзном научно-исследовательском институте электромеханики имени Иосифьяна (ВНИИЭМ). КА будет выведен на круговую солнечно-синхронную орбиту с высотой 550 км. При общей массе КА около 550 кг, масса модуля научной аппаратуры составляет около 240 кг.

Проект предусматривает установку на борту КА следующей научной аппаратуры (НА):

Исследования космических лучей предельно высоких энергий (10^{19} - 10^{20} эВ) в районе обрезания энергетического спектра «ГЗК–обрезание», предсказанного Грейзеном, Зацепиным, Кузьминым (НА ТУС).

НА ТУС осуществляет регистрацию ультрафиолетового излучения широких атмосферных ливней, порожденных космическим излучением с энергией $E > 5 \times 10^{19}$ эВ. Прибор состоит из зеркала-концентратора диаметром около двух метров, в фокусе которого расположен приемник ультрафиолетового излучения – мозаика из 256 фотоумножителей. Дополнительно к исследованию частиц предельно высоких энергий НА ТУС обеспечивает изучение быстропротекающих световых явлений в верхней атмосфере, начатых в предыдущих космических проектах МГУ «Университетский–Татьяна» и «Университетский–Татьяна-2». Информативность НА ТУС 200 Мбайт/сутки.

Исследования космических гамма-всплесков – наиболее энергичных процессов во Вселенной в оптическом (НА ШОК 1-2), ультрафиолетовом и рентгеновском (НА UFFO), а также гамма-диапазонах длин волн (НА БДРГ 1-3).

Комплекс приборов ШОК, БДРГ и UFFO обеспечивает мультиволновые измерения гамма-всплесков, необходимые для изучения природы этих астрофизических источников. НА БДРГ состоит из трех детекторов гамма излучения, регистрирующих гамма кванты с энергией 0,03-10 МэВ. НА ШОК состоит из двух неподвижных быстрых широкоугольных камер, которые непрерывно снимают звездное небо. На наземный пункт приема информации передаются кадры, синхронизованные по времени с появлением сигнала в приборах НА БДРГ. НА UFFO состоит из двадцатисантиметрового зеркала с приемником, чувствительным в диапазоне длин волн 200-650 нм, и рентгеновского детектора, регистрирующего кванты с энергией 5-200 кэВ. НА UFFO работает по сигналам управления от рентгеновского детектора и НА БДРГ. Информативность мультиволнового комплекса гамма всплесков 3 Гбайт/сутки

Исследования магнитосферных частиц – возможных источников транзиентных и квазистационарных явлений в верхней атмосфере (НА ELFIN-L и НА ДЭПРОН).

НА ДЭПРОН предназначена для измерения поглощенных доз и спектров линейной передачи энергии от высокоэнергичных электронов, протонов и ядер космического излучения, а также для регистрации потоков тепловых и медленных нейтронов. НА ELFIN-L предназначена для изучения физических процессов, ответственных за динамику околоземной радиационной среды. Информативность магнитосферного комплекса около 20 Мбайт/сутки.

На борту КА будут выполняться также актуальные прикладные исследования: апробация комплекса космического автоматического слежения за малыми небесными телами, астероидами и космическими аппаратами (НА ШОК); эксперимент по оптимизации бортовой навигационной системы (НА ИМИСС-1).

В ходе орбитального полета КА находится в орбитальной ориентации, начало которой жестко связано с центром масс КА: ось «+X» направлена по вектору орбитальной скорости и лежит в плоскости орбиты; ось «+Z» направлена по радиус-вектору, соединяющему центр Земли с центром масс КА, и смотрит в зенит; ось «+Y» перпендикулярна плоскости орбиты и дополняет систему координат до правой. На рис. 1 показано положение КА в ходе орбитального полета. На рис. 2 приведены положения научных приборов и их поля зрения.

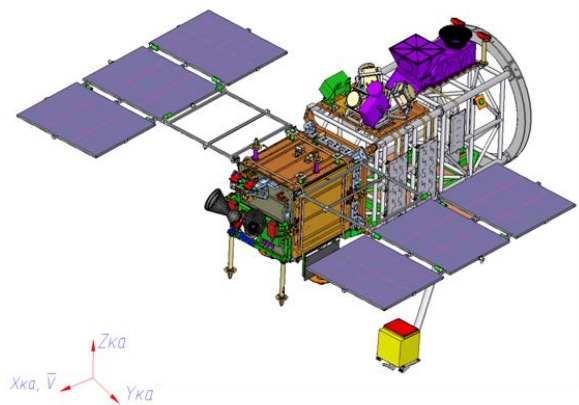


Рис. 1 КА «Ломоносов» в орбитальном полете.

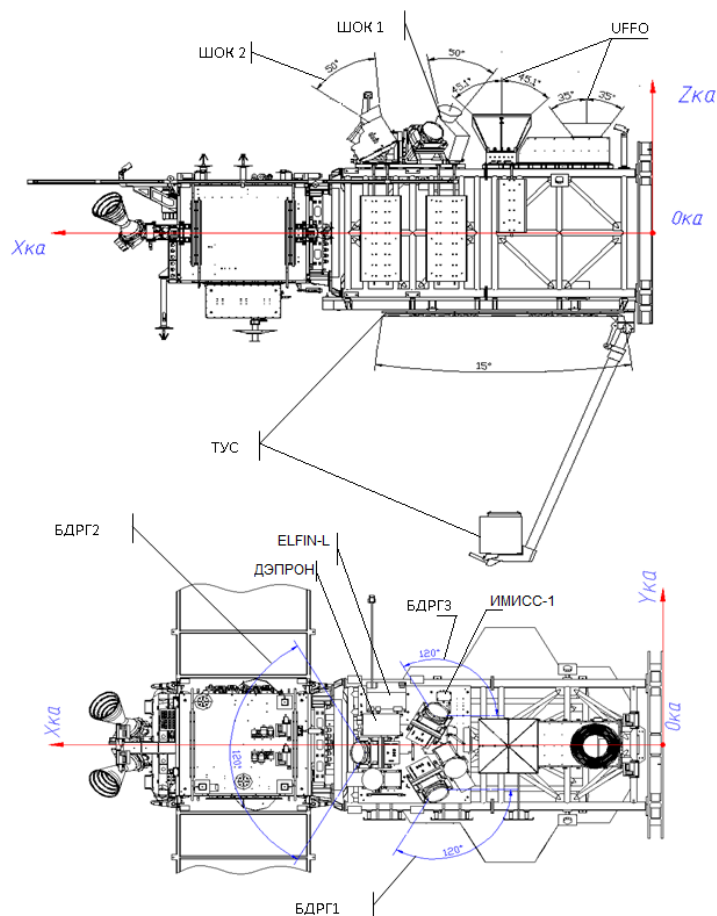


Рис. 2 КА «Ломоносов»: положения приборов и их поля зрения.

Космический эксперимент НУКЛОН

Главной целью эксперимента НУКЛОН является измерение энергетических спектров с поэлементным разрешением компонент космических лучей в диапазоне 10^{11} - 10^{15} эВ с помощью сверхлегкой установки в ходе длительного орбитального полета в качестве дополнительной полезной нагрузки на российском серийном аппарате.

Основная концепция эксперимента НУКЛОН – создание научной аппаратуры относительно небольшого веса (порядка 300 кг) и габаритных размеров (менее 1.0 м^3), способной решать актуальные задачи экспериментальной физики космических лучей в широком диапазоне энергий 10^{11} - 10^{15} эВ. Этот подход не требует собственного носителя аппаратуры, как это было в предыдущих исследованиях. Для ее экспонирования возможно использование дополнительных резервов, которые регулярно появляются на ряде серийных российских КА при выполнении долговременных целевых задач. Такая концепция позволяет минимизировать затраты и максимальным образом приблизить срок проведения космического эксперимента.

Тактико-технические характеристики научной аппаратуры.

- Комплекс научной аппаратуры (КНА) НУКЛОН должен обеспечивать регистрацию космических лучей высоких энергий в диапазоне энергий от 10^{12} до 10^{15} эВ и в диапазоне зарядов $Z=1$ -30, эффективный геометрический фактор КНА НУКЛОН должен составлять порядка $0.30 \text{ м}^2 \text{ ср}$, для всех видов частиц КЛ.

- КНА НУКЛОН должен обеспечивать поэлементное разрешение ядер космических лучей, средняя погрешность в зарядовых измерениях должна составлять не более 0.3 зарядовой единицы.

- КНА НУКЛОН должен проводить измерения энергии первичной частицы. Средняя погрешность энергетических измерений должна составлять не более 80% для индивидуального события в заданном диапазоне ядер КЛ.

- КНА НУКЛОН должен выделять события для регистрации частиц КЛ с первым неупругим ядерным взаимодействием в веществе мишени. В триггерной системе КНА должна быть обеспечена возможность изменения энергетического порога регистрации первичных частиц КЛ. Время выработки триггерного сигнала на считывание информации с датчиков КНА не должно превышать 1 мкс.

- В апертуре не менее 0.1 м^2 ср КНА НУКЛОН должен обеспечить выделение из состава КЛ электромагнитной компоненты (электронов, позитронов, гамма-квантов). Уровень режекции ядер КЛ в МИК должен составлять не менее 10^{-4} . Средняя погрешность энергетических измерений должна составлять не более 12% для индивидуального события э-м компоненты.

Основные технические характеристики научной аппаратуры

- Масса научной аппаратуры ~ 300 кг, в гермоконтейнере менее 360 кг;
- Энергопотребление научной аппаратуры < 160 Вт;
- Объем суточной телеметрии ~ 10 ГБ;
- Количество независимых датчиков в научной аппаратуре – 11104 шт.;
- Гарантийный срок эксплуатации ≥ 5 лет.

Механическая конструкция научной аппаратуры в сборе представляет собой моноблок "слоистой" структуры с габаритными размерами активной части спектрометра $\sim 500 \times 500 \times 360 \text{ мм}^3$. Схема расположения слоев показана на рис.1.

Всего 14 слоев. Последовательность размещения слоев по направлению зенит-надир:

- 1 и 2 слой оставляют систему измерения заряда;
- 3, 4, 6,7,9,10,12 слои составляют систему измерения энергии;
- 5, 8,11 слои составляют сцинтилляционную систему быстрого триггера;
- 13 слой - микро ионизационный калориметр;
- 14 слой - блок служебной электроники.

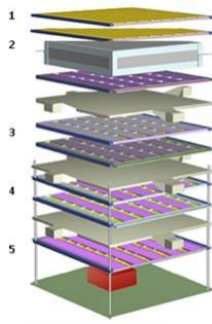


Рис.1 Схема аппаратуры НУКЛОН

Размещение КНА НУКЛОН на серийном КА

КНА НУКЛОН размещен в гермоконтейнере (ГК), оборудованном системой обеспечения теплового регулирования и системой телеметрических датчиков, контролирующих параметры среды в ГК (Рис.2).



Рис. 2 Гермоконтейнер КНА НУКЛОН

Эксплуатация КНА НУКЛОН планируется в качестве дополнительной полезной нагрузки на КА «Ресурс-П» №2 (рис.3).

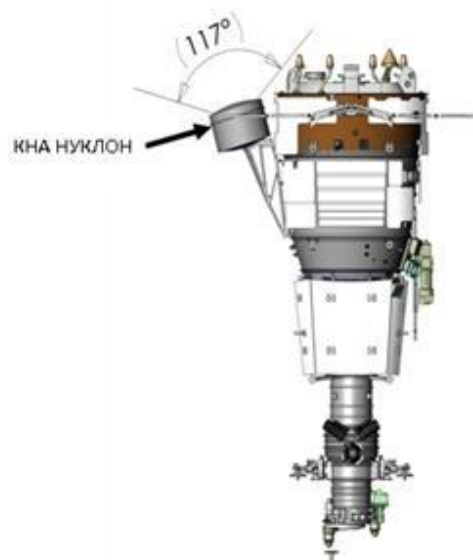


Рис. 3 КА «Ресурс-П»

Сравнительные характеристики аппаратуры НУКЛОН и современных зарубежных экспериментов по исследованию протонно-ядерной и электронной компонент космических лучей высоких энергий

Таблица 1 а. Протоны и ядра

эксперимент	$\Gamma \text{ м}^2\text{ср}$	t, Время экспозиции	$\Gamma t \text{ м}^2\text{ср год}$	Энерг. разреш, %
НУКЛОН с микрокалориметром	~0.3	5 лет	2/0.75 0.65/0.15	~70-80 ~40-50
Fermi-LAT (GLAST) (Только протоны)	~0.5	5 лет	~2.5	~50 (?)
AMS02	0.5	10 лет	5	Энергетический порог при $\sim 10^{13}$ эВ
CREAM	1.3/0.46 ядра/протоны	До 0.5 года	0.65/0.23	50
CALET	~0.4/0.15 ядра/протоны	3 года	~1.2/0.45	~50 (?)
PAMELA	0.00216	>3	0.0065	>40
ATIC	0.25/0.15 ядра/протоны	~0.2-0.3 года за все полеты	~0.006/0.0034	~30

Таблица 1 б. Электроны

эксперимент	$\Gamma \text{ м}^2\text{ср}$	t, Время экспозиции	$\Gamma t \text{ м}^2\text{ср год}$	Энерг. разреш, %
НУКЛОН с микрокалориметром	0.13	5 лет	0.65	5
НУКЛОН с большим калориметром	0.66	5 лет	3.3	5
Fermi-LAT (GLAST)	2.8-1 (100-1000 GeV)	5 лет	14-5	12/33
AMS02	0.5	10 лет	5	~20 (зависит от энергии)
CALET	~1	3 года	3	~3
PAMELA	0.00216	>3	0.0065	5.5
ATIC	0.25	~0.2-0.3 года за все полеты	~0.006/0.0034	3

По приведенным данным можно сделать следующие выводы: аппаратура НУКЛОН по своим параметрам является аппаратурой следующего поколения (в сравнении с экспериментами PAMELA и ATIC) и находится на первой линии мирового уровня, по универсальности измерений и ожидаемому объему статистического материала.

Космический эксперимент РЭЛЕК

Основная задача эксперимента РЭЛЕК (релятивистские электроны) - исследование механизмов ускорения и высыпаний магнитосферных релятивистских электронов и их возможного воздействия на верхнюю атмосферу Земли. В эксперименте также планируется

проводить изучение высотных электрических разрядов в широком диапазоне электромагнитного спектра; предполагается осуществлять измерения интенсивности электромагнитного излучения высотных разрядов в радио, оптическом, ультрафиолетовом, рентгеновском и гамма диапазонах. Эксперимент должен быть осуществлен на малом космическом аппарате серии МКА-ФКИ производства НПО им. С.А. Лавочкина. Запуск спутника планируется на 2013 г.

Научная аппаратура включает следующие приборы: два идентичных детектора рентгеновского и гамма-излучения ДРГЭ-1 и ДРГЭ-2, детектор электронов ДРГЭ-3, детектор ультрафиолетового и красного излучения ДУФ, оптический и ультрафиолетовый телескоп «Телескоп-Т», анализатор низкочастотного излучения НЧА, анализатор высокочастотного излучения РЧА, дозиметрический прибор Dostel, блок электроники БЭ.

Характеристики приборов:

Прибор ДРГЭ-1 (ДРГЭ-2):

- диапазон энергий регистрируемых гамма-квантов 0.01 – 3.0 МэВ;
- суммарная эффективная площадь всех детекторов ~500 см²;
- временное разрешение 10 мкс;
- чувствительность (минимально регистрируемый поток) – 10⁻⁷ эрг/см²;
- масса – 10 кг (1 блок);
- потребление 8 Вт (1 блок);
- информативность 200 Мбайт/сут.

Прибор ДРГЭ-3.

- диапазон энергий регистрируемых электронов 0.4 – 10.0 МэВ;
- эффективная площадь детекторов ~3.0 см²;
- временное разрешение 10 мкс;
- динамический диапазон 1 – 10⁴ см⁻²с⁻¹;
- масса – 3 кг;
- потребление 9 Вт;
- информативность 100 Мбайт/сут.

Прибор ДУФ.

- диапазон длин волн регистрируемых фотонов 300-400, 600-700 нм;
- временное разрешение 500 мкс;
- масса – 0.7 кг;
- потребление 2.5 Вт;
- информативность 10 Мбайт/сут.

Прибор «Телескоп-Т».

- диапазон длин волн регистрируемых фотонов 200-600нм;
- пространственное разрешение с высоты 800 км 2x2 км²;
- временное разрешение 100 мкс;
- масса – 4 кг;
- потребление 6 Вт;
- информативность 200 Мбайт/сут.

Прибор НЧА.

- частотный диапазон 0.1 Гц – 40 кГц;
- количество анализируемых компонентов электрического и магнитного поля - 3;
- число каналов спектрального анализатора – 256;

- суммарная масса всех блоков 2.5 кг;
- потребление 5.5 Вт
- информативность 300 Мбайт/сут.

Прибор РЧА.

- частотный диапазон 50 кГц – 15 МГц;
- количество анализируемых компонентов электрического поля - 3;
- спектральное разрешение ~0.1-2.0%;
- временное разрешение 25 нс;
- динамический диапазон 80 дБ;
- суммарная масса всех блоков 1.5 кг;
- потребление 10 Вт
- информативность 200 Мбайт/сут.

Прибор Dostel.

- спектральный диапазон линейных потерь энергии 0.1-200 кэВ/мкм;
- эффективная площадь детекторов 6.93/1.0 см²;
- масса – 1.2 кг;
- потребление 3 Вт;
- информативность 3 Мбайт/сут;

Прибор БЭ.

- масса – 2.1 кг;
- потребление 5 Вт;
- объем передаваемой информации – до 1 Гбайт/сут.



Рис. Общий вид приборов аппаратуры РЭЛЕК.

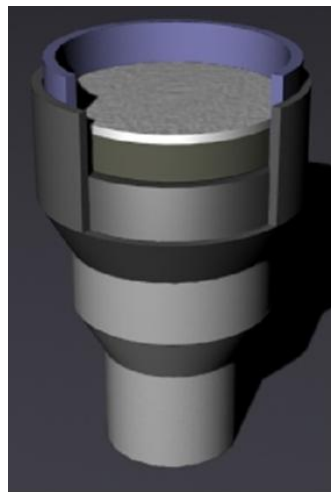


Рис. Общий вид блока детекторов рентгеновских, гамма лучей и высокоэнергичных электронов в эксперименте РЭЛЕК

II. Исследования динамических процессов на Солнце и в гелиосфере

О структуре поля конвективных скоростей в фотосфере Солнца

Исследование поведения поля горизонтальных скоростей в фотосфере Солнца с их усреднением по различным временным интервалам выявило «большие мезогранулы» с размерами порядка 15 Мм. Обнаружены участки сильной конвергенции горизонтальных течений, которая иногда сопровождается закрученностью. Получены указания на возможное сосуществование конвективных ячеек с различными направлениями циркуляции вещества – так называемых *l*- и *g*-типов.

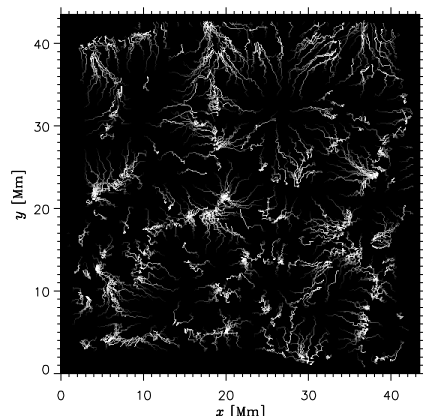


Рис. Траектории, пройденные воображаемыми пробными частицами за двухчасовой интервал. В правой верхней части рисунка видна «большая мезогранула», наложенная на супергранулу, в нижней части видны мезогранулы обычных размеров. «Большие мезогранулы» во многих случаях имеют звездчатую форму

А.В. Гетлинг, А.А. Бучнев О структуре поля конвективных скоростей в фотосфере Солнца // *Астрономический журнал*, т. 87, № 3, с. 286–292, 2010.

К вопросу об общем магнитном поле Солнца

Путем численного моделирования ячейчных конвективных течений в политропно стратифицированном вращающемся слое сжимающейся среды исследована зависимость средней спиральности поля скоростей (h) от индекса политропы (m) и скорости вращения слоя (Ω). Средней спиральности в теории турбулентного МГД-динамо отводится важная роль как параметру генерации крупномасштабного магнитного поля (в частности, общего магнитного поля Солнца), от которого зависит так называемый α -эффект. Если считать поле скоростей турбулентным, то величина спиральности оказывается сильно зависящей от гипотез о свойствах турбулентности и поэтому в ее оценках неизбежен значительный произвол. Выполненное исследование показывает, что путем численного моделирования «детерминированных», относительно устойчивых конвективных течений, можно внести бóльшую определенность в оценки спиральности.

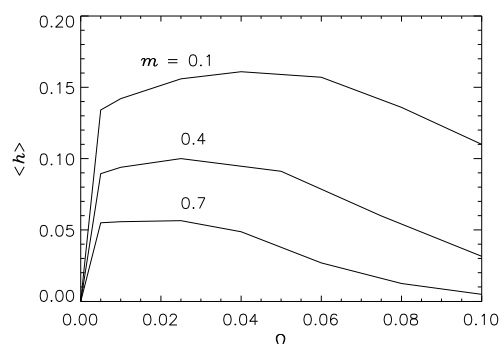


Рис. Средняя спиральность $\langle h \rangle = \mathbf{v} \cdot \text{rot } \mathbf{v}$ ячейчного конвективного течения как функция угловой скорости вращения слоя Ω при различных значениях индекса политропы m . Показано, что средняя спиральность имеет максимум как функция скорости вращения.

Гетлинг А.В. Спиральность поля скоростей при ячейчной конвекции во вращающемся слое // *Астрономический журнал*, т. 89, № 5, с. 441–448, 2012.

Корреляционные зависимости

Обнаружено, что магнитное поле Солнца на уровне хромосферы в области корональных дыр (открытых силовых линий), имеющих южную полярность, коррелирует с параметром магнитной активности Акасофу, характеризующим энергетическую составляющую солнечного ветра и эффективность его взаимодействия с магнитосферой Земли.

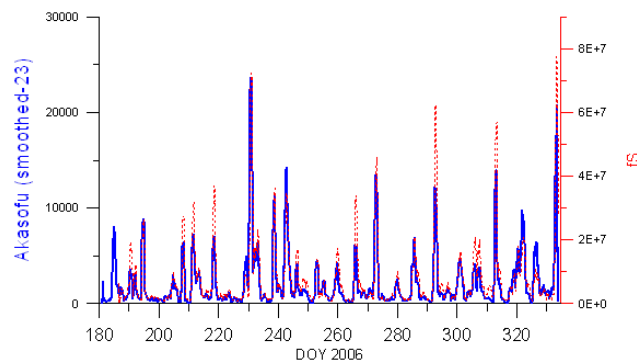


Рис. Вариации параметра Акасофу (синяя сплошная линия) и отношения магнитных потоков корональных дыр $f_{N,S} = \Phi_{3000} / \Phi_{1.5}$ на высотах 3000 м и 1.5 радиуса Солнца для вектора открытого магнитного поля южной полярности (красный пунктир) с июля по ноябрь 2006 г., последние сдвинуты вправо на 130 часов с учетом времени прихода потоков солнечного ветра.

Prosovetsky D.V., Myagkova I.N. The Correlation between Geomagnetic Disturbances and Topology of Quasi-open Structures in the Solar Magnetic Field // *Geomagnetism and Aeronomy*, Vol. 51, No. 8, pp. 1078–1082, 2011.

Солнечная активность

Показано, что длительные минимумы солнечной активности, имевшие место в прошлом, наблюдались в периоды времени, когда центр масс солнечной системы (Солнце плюс внешние планеты) находился вне солнечной сферы. Спектральный анализ длинного ряда данных о числе солнечных пятен показывает существование постоянных спектральных линий, периоды которых близки к комбинациям периодов обращения нескольких планет вокруг Солнца. Сделан вывод, что планеты влияют на процесс образования солнечных пятен. Предложена новая парадигма процесса солнечной активности и образования солнечных пятен: спусковым механизмом для начала процесса образования солнечного пятна является падение небесных тел (кометы, астероиды) на солнечную фотосферу; когда центр масс солнечной системы находится вне Солнца, большинство небесных тел не попадают на Солнце, и наблюдается длительный минимум солнечной активности.

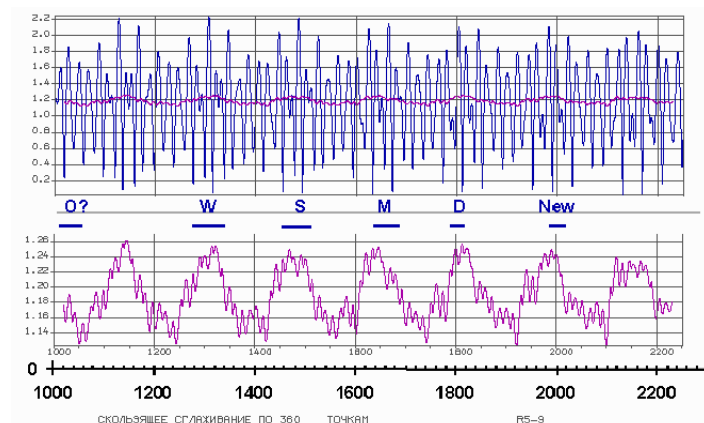


Рис. Расстояние (в солнечных радиусах) между центром Солнца и центром масс солнечной системы в зависимости от времени (верхний рис.) и сглаженные данные этого ряда с периодом 40 лет (нижний рис.). Указаны интервалы времени длительных минимумов солнечной активности.

Охлопков В.П., Стожков Ю.И. СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ В НАСТОЯЩЕМ И БЛИЖАЙШЕМ БУДУЩЕМ // *Изв. РАН. Сер. Физ.* 2011, т. 75, № 5, с.911-914

Движение Солнца относительно центра масс Солнечной системы

Исследованы динамические параметры движения Солнца относительно центра масс Солнечной системы – расстояние центра Солнца относительно центра масс, угловой момент Солнца и его изменение. Показано, что периодичность 178.8 лет не является главенствующей в механических параметрах движения Солнца, а в этом диапазоне частот главенствует периодичность 169 лет, связанная с влиянием Нептуна. Показано, что периоды, соответствующие спектральным линиям, наблюдаемым в данных чисел Вольфа, практически совпадают с комбинациями периодов обращения двух или более планет, т.е. движение планет влияет на солнечную активность.

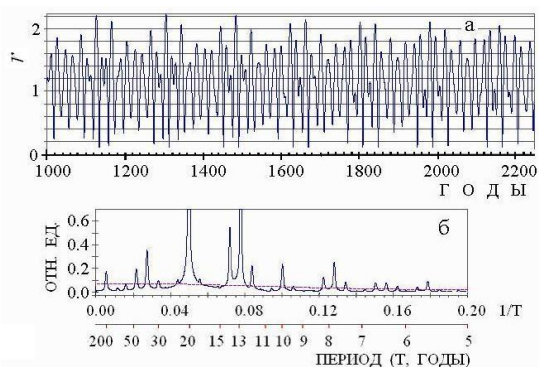


Рис. а - расстояние r (в солнечных радиусах) между центром Солнца и центром масс солнечной системы в зависимости от времени,

б - частотный спектр r .

Охлопков В.П. Основные периодичности движения Солнца относительно центра масс Солнечной системы и солнечная активность // Вестник Московского университета. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2011, № 6, с. 139-143

Прогноз квазистационарных высокоскоростных потоков солнечного ветра

Иерархический подход к прогнозированию квазистационарных высокоскоростных потоков солнечного ветра (СВ) позволил объединить разнородные входные данные в одну систему и повысить точность прогноза скорости СВ. Использовались данные за 2010 год о суточных значениях площадей корональных дыр с приборов SWAP и AIA с КА PROBA2 и SDO, соответственно, рассчитанные по изображениям Солнца в ультрафиолетовом диапазоне длин волн, а также информация об измеренной скорости потоков СВ за предыдущие обороты Солнца. На втором уровне иерархии формировался окончательный прогноз скорости СВ на 3 дня вперед. При такой методике прогнозирования пропуски в данных одного космического аппарата не оказывают критического влияния на конечный результат прогнозирования всей системы в целом.

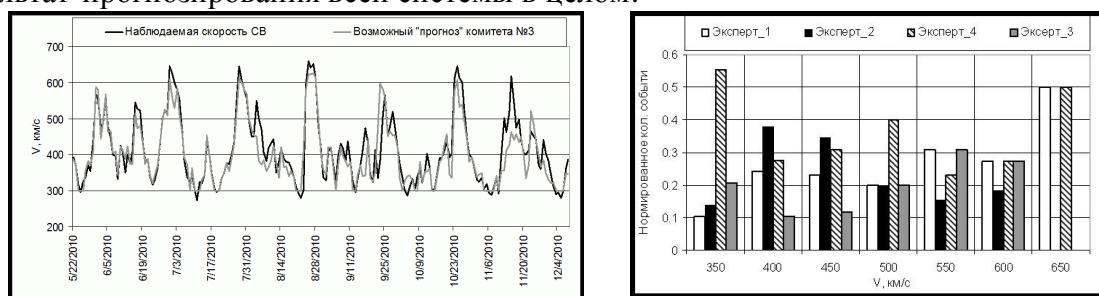


Рис. Слева на рисунке: черная кривая - среднесуточные значения наблюдаемой скорости СВ; серая кривая - «прогноз» скорости СВ комитетом №3 («прогноз» - оценка возможного потенциала прогнозирования экспертной системы). Справа – гистограмма распределения наблюдаемых скоростей СВ, которые «прогнозирует» каждый из экспертов комитета №3, нормированная на количество событий отдельно по каждому диапазону скоростей. Эксперт №1 – белые столбцы, №2 – черные столбцы, №3 – серые столбцы и №4 – столбцы со штриховкой.

Shugay, Yu. S.; Veselovsky, I. S.; Seaton, D. B.; Berghmans, D. Hierarchical approach to forecasting recurrent solar wind streams // Solar System Research, 2011, Volume 45, Issue 6, pp.546-556.

Гамма-излучение солнечных вспышек

Анализ данных, полученных спектрометром СОНГ на борту ИСЗ КОРОНАС-Ф во время солнечных вспышек 25.08.2001, 28.10.2003, 04.11.2003 и 20.01.2005, показал, что гамма-излучение от распада пионов возникает во время основного вспышечного энерговыделения, которое может быть определено как момент максимума тормозного рентгеновского и гамма излучения и радио-излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне. Данный момент времени также соответствует максимуму производной теплового рентгеновского излучения. Начало наблюдения гамма-излучения от распада пионов во время вспышки 28.10.2003 совпало со временем максимальной скорости изменения магнитного потока.

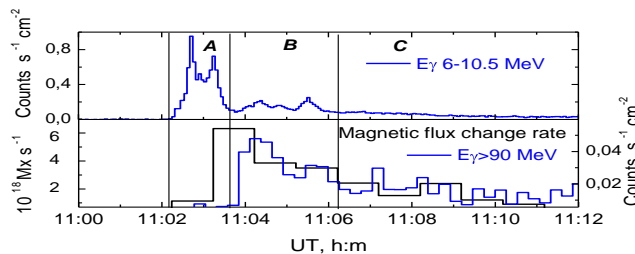


Рис. Скорость счета гамма-излучения по данным детектора СОНГ во время вспышки 28.10.2003 (синие линии) и скорость изменения магнитного потока (согласно Miklenic et al., A&A, 499, 893, 2009 – черная линия).

Kurt V.G., Yushkov B.Yu., Kudela K., Galkin V.I. Высокоэнергичное гамма-излучение солнечных вспышек как индикатор ускорения протонов высоких энергий // Космические исследования. 2010. Т.48. №1. С.72-80.

Kuznetsov S.N., Kurt V.G., Yushkov B.Yu., Kudela K., Galkin V.I., Gamma-Ray and High-Energy-Neutron Measurements on CORONAS-F during the Solar Flare of 28 October 2003 // Solar Physics. 2011. V.268, p. 175-193.

Ускорение протонов во вспышке

Сравнение данных мировой сети нейтронных мониторов во время 44 наземных возрастаний (GLE), начиная с 1972 года и по настоящее время, и потоков протонов с энергией выше 500 МэВ, измеренных на ИСЗ серии GOES, со временным поведением нейтрального излучения вспышек в широком диапазоне длин волн показало, что для 30 событий задержка времени прихода высокоэнергичных протонов на 1 а.е. (T_{onset}) относительно наблюдаемого времени максимума энерговыделения солнечной вспышки (T_0) не превышала 10 минут, что соответствует кратчайшему времени распространения частиц от Солнца. Этот результат доказывает, что для большинства событий время начала эффективного ускорения протонов, ответственных за GLE, должно быть близким ко времени максимального энерговыделения во вспышке, т.е. протоны, наблюдаемые в начальной фазе GLE, имеют вспышечное происхождение.

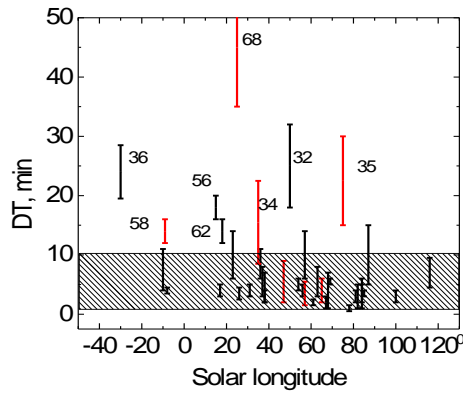


Рис. Распределения времени задержки $DT = T_{\text{onset}} - T_0$ по гелиодолготе соответствующих вспышек.

Kurt V., Yushkov B., Belov A., Chertok I., Grechnev V. A Relation between Solar Flare Manifestations and the GLE Onset // 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing, 2011, paper 0441

Динамика и энергетика солнечной вспышки

Для одной из самых мощных солнечных вспышек 20 января 2005 г. сделаны оценки мощности, вносимой ускоренными электронами во вспышечной объем в рамках модели толстой мишени, в двух предположениях о значении граничной энергии E_0 спектра электронов. Сравнение полной энергии, внесенной электронами, с тепловой энергией излучающей плазмы показало, что в начале импульсной фазы вспышки полная энергия, внесенная ускоренными электронами, в 1.5-2 раза превышает тепловую энергию плазмы, затем эти энергии становятся примерно равными и составляют $\sim(4-5) \cdot 10^{30}$ эрг для электронов и столько же для тепловой энергии плазмы.

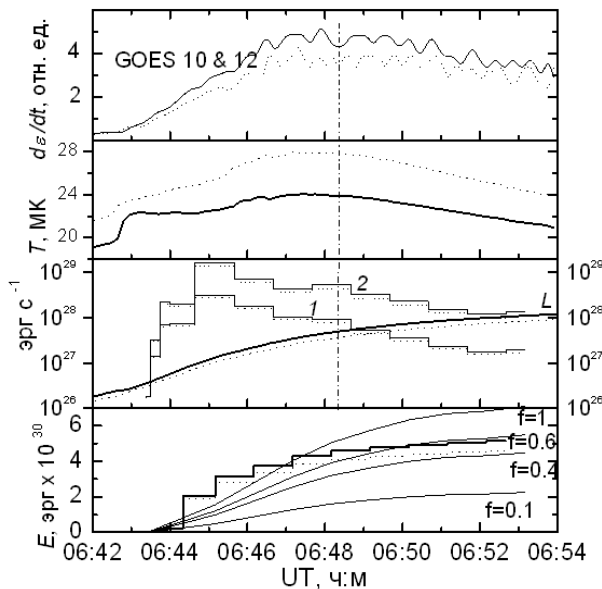


Рис. Верхняя панель: временной ход производной меры эмиссии. Вторая панель сверху: временная зависимость температуры нагретой плазмы. Третья панель сверху: гистограмма энергии нетеплового компонента, рассчитанной, исходя из граничной энергии $E_{\gamma 0}$ (1) и по модели Эмсли (2), сплошные кривые – временной ход радиационных потерь. Нижняя панель: гистограмма хода внесенной (накопленной) энергии нетеплового компонента; кривые показывают временной ход энергии теплового компонента при различных значениях коэффициента заполнения (f). На всех панелях сплошные кривые и гистограммы построены по данным GOES-10, пунктирные - GOES-12.

Курт В.Г., Свертилов С.И., Юшков Б.Ю., Богомолов А.В., Гречнев В.В., Галкин В.И., Богомолов В.В., Кудела К., Логачев Ю.И., Морозов О.В., Мяжкова И.Н. Динамика и энергетика теплового и нетеплового компонентов солнечной вспышки 20 января 2005 г. по данным детекторов жесткого электромагнитного излучения на спутнике «КОРОНАС-Ф» // Письма в астрон. журнал. 2010. Т.36, №4, с.292 – 303.

Поток частиц в гелиосфере при спокойном Солнце,

С целью определения возможных источников потоков частиц супратермальных энергий (0,03-10 кэВ/нукл) в гелиосфере исследовались энергетические спектры ионов С, О и Fe, относительное содержание ионов и энергетические зависимости отношений Fe/O и C/O по данным КА ACE и WIND в спокойные периоды 23 цикла солнечной активности (1996-2010 гг.). Показано, что потоки исследуемых частиц в спокойные периоды разбиваются на 3 типа, различающиеся формой энергетических спектров С, О и Fe и зависимостью величин относительного содержания ионов Fe/O и C/O от энергии. Источниками этих типов потоков являются: слабые импульсные вспышки; ускоренные ионы короны Солнца; энергичный хвост частиц солнечного ветра. Рассчитаны распределения величин относительного содержания всех изучаемых ионов. Различия гистограмм распределений Fe/O, Fe/C и Fe/CNO определяются величиной первого ионизационного потенциала (FIP) изучаемых ионов.

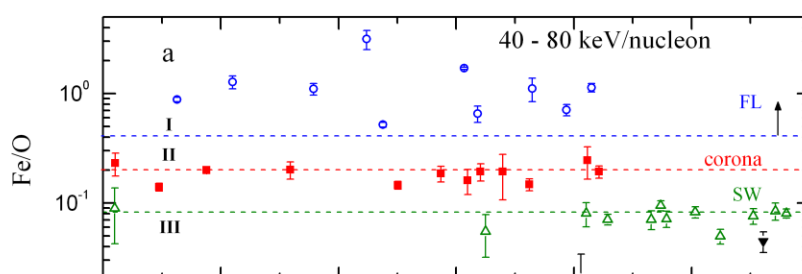


Рис. Величины Fe/O с энергиями 40-80 кэВ/нуклон в спокойные периоды в 23 цикле солнечной активности. Линия I соответствует среднему содержанию ионов в импульсных вспышках СКЛ. Линии II и III показывают среднее содержание ионов в короне и в солнечном ветре. Данные для периодов группы I обозначены синими кружками, группы II – красными квадратами и группы III – зелеными треугольниками.

1. Зельдович М.А., Ишков В.Н., Логачев Ю.И., Кечкемети К. Ионный состав потоков малоэнергичных частиц в спокойное время солнечной активности на 1 а.е. // Известия РАН, сер. физич., 2011, т. 75, № 6, 825-827.
2. Зельдович М.А., Логачев Ю.И., Сурова Г.М. Энергетические спектры и относительное содержание ионов С, О и Fe на 1 а.е. при спокойном Солнце // Астрономический журнал, 2011, т. 88, № 4, с. 409-416
3. Ishkov V.N., Zeldovich M.A., Kecskeméty K., Logachev Yu.I. Relative ion Fe, C and O abundances in quiet time particle fluxes in the 23 SC // Advances in Space Research, 2011, v. 46, p. 1433-1438

Характеристики событий СКЛ

Проведен статистический анализ фазы спада солнечных событий за последние три цикла солнечной активности, для которого использовалась база данных для протонов, электронов и альфа-частиц, созданная на основе результатов КА IMP-8, SOHO, ACE и «Helios-1, -2» в диапазоне жесткостей частиц (R) от 0.1 до 500 МВ. Рассмотренная совокупность форм зависимости характеристического времени спада (τ) от жесткости частиц (R) позволяет сделать вывод о том, что единой зависимости $\tau(R)$ нет и, поэтому, их единой модельной интерпретации в широком интервале жесткостей в настоящее время не существует. Показано, что экспоненциальный спад потоков частиц, возникающий при одинаковых интегральных свойствах окружающего пространства, характеризует однородность и квазистационарность пространства в некотором околосолнечном секторе.

Наиболее распространенные сектора однородного пространства имеют размер около 15° , достаточно часто они достигают 45° , реже 90° , в исключительных случаях - 180° и крайне редко распространяются на все окосолнечное пространство (360°). Постоянство τ в последовательных событиях может наблюдаться только для одного сорта частиц, что говорит о том, что в соответствующих секторах стабильны только высокочастотные, ответственные за рассеяние электронов, или низкочастотные, ответственные за рассеяние протонов, участки спектра флуктуаций магнитного поля.

1. Дайбог Е.И., Кечкемети К., Логачев Ю.И., Сурова Г.М. Жесткостная зависимость характеристического времени спада и длины свободного пробега в событиях СКЛ // Космические исследования, 2010, т. 48, №6, с. 516-523
2. Kecskestéy K., Yu.I. Logachev, M.A. Zeldovich, and J.Kóta Modulation of the Galactic Low-Energy Proton Spectrum in the Inner Heliosphere // Astrophys. J., 2011, v. 738, № 2, p.173-182.

Спектр частиц солнечных космических лучей

Предложена новая единая форма описания энергетических спектров частиц солнечных космических лучей в полтора раза более широком, чем ранее, интервале энергий ($0.1 \div 1000$ МэВ/нуклон), состоящая из двух степенных участков спектра, разделенных коленом.

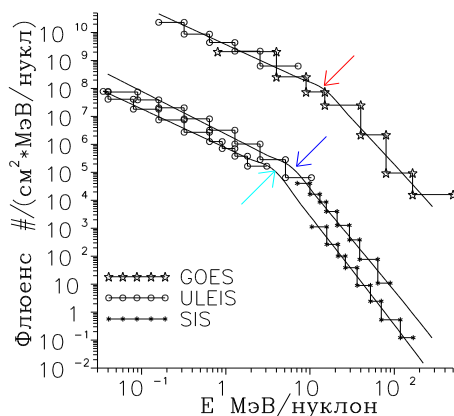


Рис. Логарифмически усредненные потоки флюенсов 28-и событий СКЛ и аппроксимирующие их спектры для протонов, кислорода и железа (сверху вниз). Стрелочками указаны точки перегиба (колена).

Ныммик Р.А. Перегибы (колена) в крупномасштабных спектрах протонов и тяжелых ионов СКЛ: их представление, параметры и закономерности // Известия РАН, серия физическая, 75(6), с.828-830, 2011.

Предельно большие потоки СКЛ

На основе результатов измерения исторических потоков СКЛ, базирующихся на анализе содержания радиоактивных изотопов в Гренландских льдах, на один порядок величины в сторону предельно малых вероятностей расширено знание вида функции распределения величин предельно больших потоков протонов в индивидуальных событиях СКЛ.

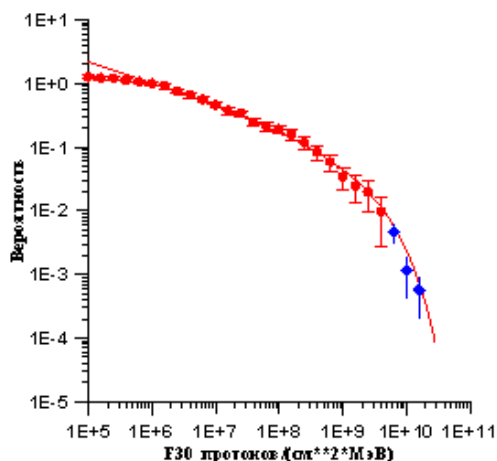


Рис. Распределение событий СКЛ с флюенсом протонов с энергией >30 МэВ и величиной потока $F_{30} > 10^6 \text{ см}^2$.

Точки – экспериментальные данные согласно измерениям на спутниках;

ромбики – экспериментальные данные, вычисленные автором по данным изотопов Гренландского льда;

линия – функция распределения, используемая автором в его многочисленных работах.

Nymmik R.A. Some problems with developing a standard for determining solar energetic particle fluxes // *Advances in Space Research*, vol.47, p. 622-628, 2011.

III. Теоретические модели электромагнитных процессов в космическом пространстве

Магнитосферы планет на основе параболоидной модели

На основе построенной обобщенной (параболоидной) модели магнитосферы планеты и по данным научных экспериментов в магнитосфере Земли и последних космических миссий к планетам Солнечной системы: Галилео (Юпитер), Кассини (Сатурн) и Мессенджер (Меркурий), а также данных о структуре полярных сияний, наблюдаемых на космическом телескопе (КТ) «Хаббл» в верхней атмосфере планет-гигантов Юпитера и Сатурна, выполнены комплексные исследования и получены важные характеристики структуры и динамики магнитосфер планет Солнечной системы.

УФ снимки полярных сияний Сатурна, полученные на КТ «Хаббл», проектировались в магнитосферу в рамках параболоидной модели. Показано, что низкоширотная граница сияний связана с перестановочной неустойчивостью, а высокоширотная – со сдвигом азимутальной скорости на границе между открытыми и замкнутыми силовыми линиями.

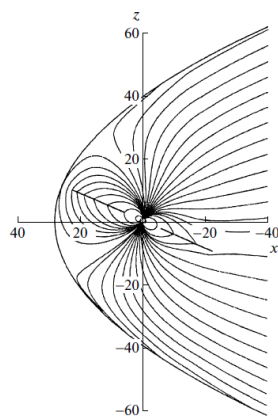


Рис. 1. Структура силовых линий в сечении полдень-полночь в магнитосфере Сатурна.

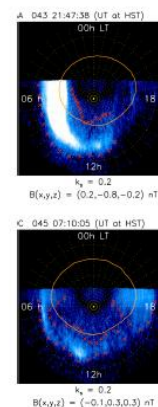


Рис. 2. Изображения овала полярных сияний Сатурна, полученные на космическом телескопе «Хаббл», и рассчитанная по модели высокоширотная граница овала.

1. *Belenkaya, E. S., Alexeev, I. I., Blokhina, M. S., Bunce, E. J., Cowley, S. W. H., Nichols, J. D., Kalegaev, V. V., Petrov, V. G., and Provan, G.* IMF dependence of Saturn's auroras:

modelling study of HST and Cassini data from 12–15 February 2008 // *Ann. Geophys.*, 28, 1559-1570, doi:10.5194/angeo-28-1559-2010, 2010.

2. *Igor I. Alexeev et al.* Mercury's magnetospheric magnetic field after the first two MESSENGER flybys // *ICARUS* Volume: 209 Issue: 1 Special Issue: SI Pages: 23-39 DOI: 10.1016/j.icarus.2010.01.024

3. *Belenkaya, E. S., Cowley, S. W. H., Nichols, J. D., Blokhina, M. S., and Kalegaev, V. V.* Magnetospheric mapping of the dayside UV auroral oval at Saturn using simultaneous HST images, Cassini IMF data, and a global magnetic field model // *Ann. Geophys.*, 29, 1233-1246, doi:10.5194/angeo-29-1233-2011, 2011.

Модель магнитосферы Меркурия

Разработана глобальная модель магнитосферы Меркурия, учитывающая множественные суббуревые возмущения и турбулентность в хвосте, сопровождающиеся образованием вихревых электрических и магнитных полей в токовом слое хвоста магнитосферы. Показано, что самые эффективные механизмы ускорения в магнитосфере Меркурия – рассеяние частиц на плазменной турбулентности и рассеяние в результате многократных диполизаций во время суббуревых возмущений (которые происходят гораздо чаще, чем на Земле, и имеют существенно меньшую продолжительность). Оценен верхний предел энергий ускоренных частиц.

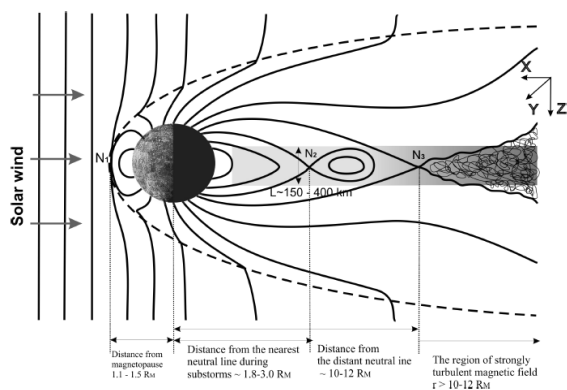


Рис. Схематическое изображение магнитосферы Меркурия, обтекаемой солнечным ветром. Показаны наиболее важные магнитосферные области с расстояниями до центра планеты

Zelenyi L.M., A.G. Korgov, H.V. Malova, V.Yu. Popov, A.V. Artemyev and D.C. Delcourt, Charged particle acceleration in the Hermean magnetosphere: the role of dipolarizations, plasma turbulence and induction electric fields // in the book: *Advances in Geosciences*, A6, v19, p.p. 9-28, 2010

Токовый слой хвоста земной магнитосферы

Построена самосогласованная теория анизотропных токовых равновесий, поддерживаемых в плазме с немаквелловским распределением частиц по скоростям (рис. 1) в случае, когда плазма состоит из холодных электронов и двух горячих ионных компонент с разными температурами. Ионные популяции плазмы описываются в рамках квазиadiaбатического приближения, в то время как электроны – в МГД приближении. Получены приближенные стационарные решения системы уравнений Власова-Максвелла и проведено их параметрическое исследование. Показано, что эти решения могут описывать разнообразные профили токовых слоев: от тонких токовых структур с максимумом плотности тока в нейтральном слое до сравнительно «толстых» токовых слоев с двумя или тремя максимумами плотности тока. Также показано, что электронная компонента с анизотропным распределением доминирует в центре токового слоя и может поддерживать узкий центральный пик плотности тока (рис.2). Ионная компонента доминирует на периферии токового слоя, определяя его характерную толщину. Результаты численного моделирования в двухтемпературной плазме (метод крупных частиц) согласуются с

экспериментальными данными, полученными на спутниках Cluster.

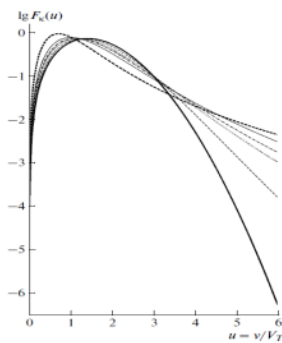


Рис. 1. Сравнение нормированных функций распределения в логарифмических координатах: $F_k(u) = u^2 A_k (1 + u^2/(2k-3))^{-(k+1)}$ (т. наз. капта-распределения; $u = v/V_T$, V_T - тепловая скорость). Распределение Максвелла $F_m(u) = u^2 \exp(-u^2/2)$ показано толстой сплошной линией. Капта распределения изображены при значениях $k=2,4,5,10$ (штриховые и штрих-пунктирные линии).

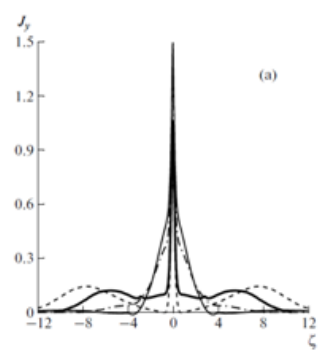


Рис. 2. Профили плотности тока в равновесном токовом слое в случае, когда в нем присутствуют холодные пролетные и горячие захваченные ионы при разных величинах относительного коэффициента плотности захваченной плазмы (минимальному значению соответствует профиль, обозначенный тонкой сплошной линией, максимальному – штриховой линией).

Малова Х.В., Л.М. Зелёный, О.В. Мингалев, И.В. Мингалев, В.Ю. Попов, А.В. Артемьев, А.А. Петрукович, Токовый слой в бесстолкновительной немаксвелловской плазме: самосогласованная теория, моделирование и сравнение со спутниковыми экспериментами // Физика плазмы, Т.36, N9, с. 897-915, 2010

IV. Исследование радиационной среды и плазменных процессов в околоземном космическом пространстве

Положение магнитопаузы

Обнаружен класс квази-стационарных событий, когда длительное воздействие (несколько часов) межпланетного магнитного поля, сонаправленного с потоком плазмы солнечного ветра (квази-радиальное поле), приводит к такому же длительному глобальному расширению магнитосферы. Размеры магнитосферы могут увеличиться до 30% от ожидаемых. С помощью данных спутников THEMIS впервые получены экспериментальные доказательства того, что формирование переходного слоя в квази-радиальном поле сопровождается аномально низким давлением плазмы, которое может составлять только 20% от динамического давления солнечного ветра.

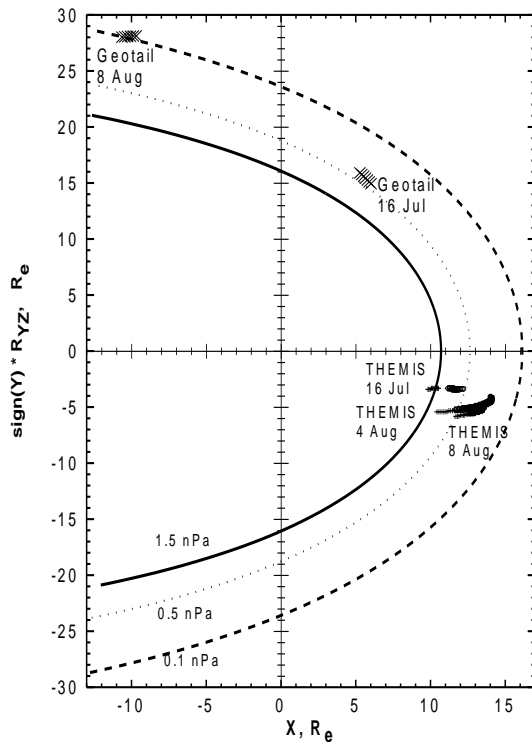


Рис. Положение 5 спутников THEMIS и Geotail, а также границы магнитосферы (магнитопаузы), рассчитанной по модели для трех квази-стационарных событий: 16 июля, 4 августа и 8 августа 2007. Ожидаемое положение магнитопаузы рассчитано для наблюдаемых давлений солнечного ветра 16 июля и 8 августа - 1.5 нПа (сплошная кривая), 4 августа - 0.5 нПа (точки), а также наблюдаемого давления плазмы в переходном слое - 0.1 нПа (пунктир). Спутники находились внутри магнитосферы в течение нескольких часов, что согласуется с положением магнитопаузы, рассчитанной для anomalously низкого давления в переходном слое.

Suvorova, A. V., J.-H. Shue, A. V. Dmitriev, D. G. Sibeck, J. P. McFadden, H. Hasegawa, K. Ackerson, K. Jelinek, J. Safrankova, and Z. Nemecek Magnetopause expansions for quasi-radial interplanetary magnetic field: THEMIS and Geotail observations // J. Geophys. Res., 2010, 115, A10216, doi:10.1029/2010JA015404.

Модель проникновения СКЛ на высокие широты

По данным 5 низковысотных КА POES исследовано проникновение солнечных космических лучей (СКЛ), протонов с энергиями от 240 кэВ до >140 МэВ и электронов с энергиями от 100 кэВ до >300 кэВ, на высокие широты при различных уровнях геомагнитной активности. Построена эллиптическая модель проникновения СКЛ, которая описывает такие важные эффекты, как сдвиг границы обрезания на низкие широты с ночной и вечерней стороны в результате магнитного эффекта тока хвоста и частичного кольцевого тока, соответственно. Модель так же позволяет предсказывать эффект поглощения в полярной шапке как результат повышенной ионизации D-слоя ионосферы интенсивными потоками солнечных протонов и электронов с энергиями >2.5 МэВ и >100 кэВ, соответственно.

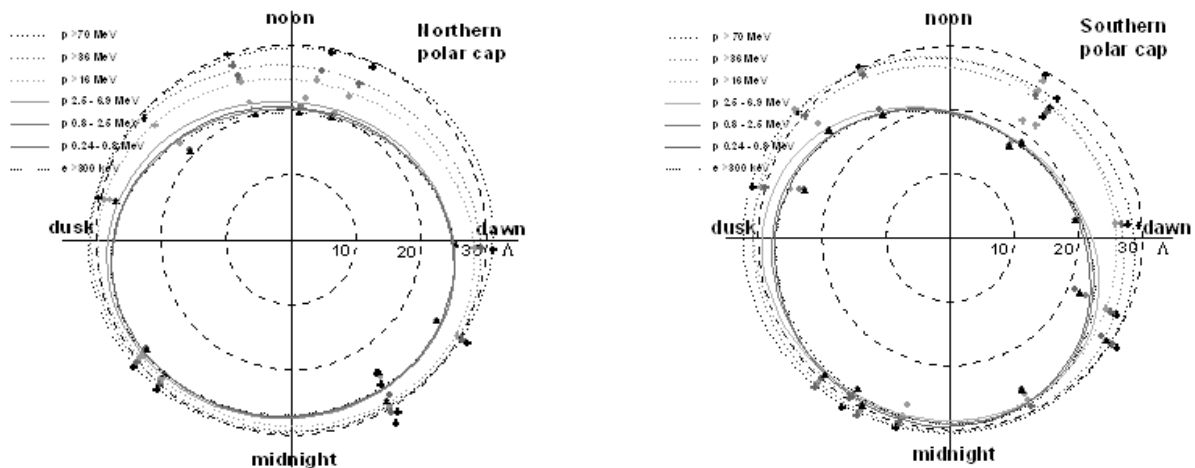


Рис. Границы обрезания СКЛ в инвариантной системе координат во время магнитной бури в 17:00 UT 14 декабря 2006 г. в северном (слева) и южном (справа) полушарии. Видно существенное понижение широты границы обрезания со сдвигом в сторону ночи и вечера.

Dmitriev, A. V., P. T. Jayachandran, and L.-C. Tsai. Elliptical model of cutoff boundaries for the solar energetic particles measured by POES satellites in December 2006 // *J. Geophys. Res.*, 2010, 115, A12244, doi:10.1029/2010JA015380.

Границы проникновения СКЛ в магнитосферу Земли

По данным одновременных измерений на 3-х ИСЗ серии “Космос” исследован эффект гистерезиса между главной фазой и фазой восстановления сильной магнитной бури в положении границ проникновения солнечных протонов в магнитосферу. Наблюдается отчетливый гистерезис в положении границ: на фазе восстановления на одних и тех же местных временах кривая идет на несколько градусов выше. Разница для вечернего сектора при одном и том же значении *Dst* на разных фазах бури достигает 5°. Эта разница обусловлена развитием асимметричного кольцевого тока на главной фазе бури с преимущественной инжекцией частиц в вечернем секторе.

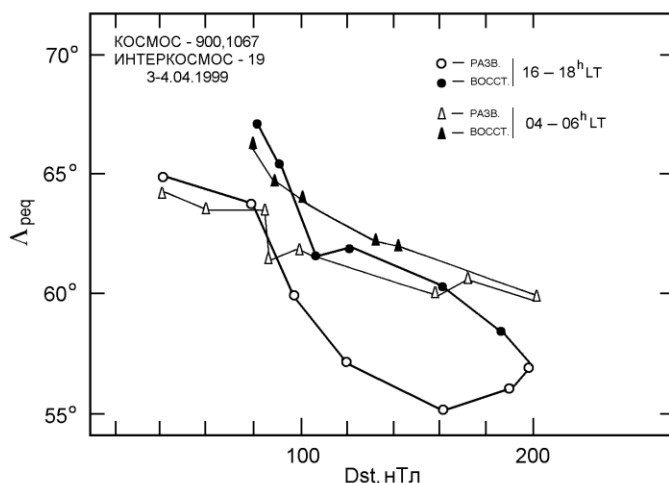
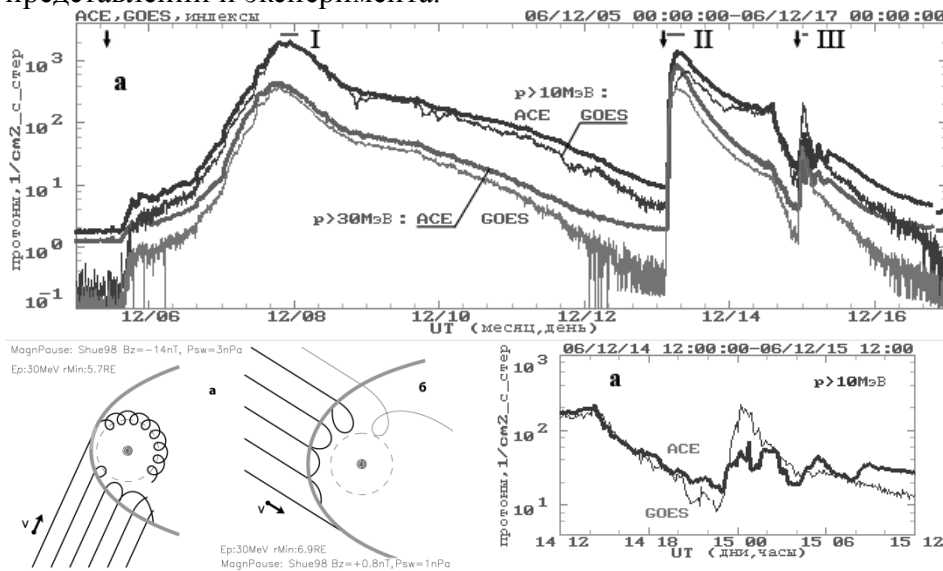


Рис. Положение экваториальных (Λ_{req}) границ проникновения протонов СКЛ с энергией больше 1 МэВ на разных фазах сильной магнитной бури 3-4.04.1979 г. Точки соединены во временной последовательности. Светлые кружки и треугольники – вечерние и утренние точки на фазе развития бури, соответственно; темные – на фазе восстановления.

Тверская Л.В. Диагностика магнитосферы по релятивистским электронам внешнего пояса и проникновению солнечных протонов // *Геомагнетизм и аэрономия*. Т.51 №1. с.8-24. 2011

Проникновение солнечных энергичных частиц в магнитосферу Земли

Заряженные частицы ускоряются в солнечных вспышках; они могут выйти в гелиосферу, заполнить её и проникнуть в магнитосферу Земли, причём плотность потока проникшей радиации может оказаться ниже, равной или, локально, выше чем вне магнитосферы. Для исследования причин такого эффекта в работе [1] был выделен период, в котором наблюдались все три упомянутых режима в сопоставимых условиях. Для объяснения вариаций режима проникновения были привлечены представления о зависимости эффективности проникновения от угла падения частиц на магнитопаузу (который задаётся направлением межпланетного магнитного поля и существующим в этом поле пичч-угловым распределением частиц) и характеристик магнитопаузы (её формой и удалённостью от Земли) [2]. Удалось показать качественное согласие модельных представлений и эксперимента.



На верхнем рисунке потоки частиц в трёх событиях с разными режимами проникновения отмечены как I, II и III. На профиле снизу растянуто событие III. На левом нижнем рисунке даны модельные схемы влёта в магнитосферу и глубины проникновения для событий III (а) и II (б).

1. Власова Н. А., Павлов Н. Н., Панасюк М. И. и др. Некоторые особенности проникновения солнечных космических лучей в магнитосферу Земли: 05-17 декабря 2006 г. // Космич. исслед. 2011. Т.49. №6. С. 500-515.
2. Павлов Н.Н. Исследование возможностей проникновения энергичных солнечных частиц в магнитосферу Земли. 6-я конференция "Физика плазмы в солнечной системе" (Сборник тезисов), ИКИ РАН, 2011, с. 85.

Определение характеристик окружающего Землю плазменного кольца

Создана база данных измерений давления плазмы за период с августа 2007 по сентябрь 2010 г. работы спутников проекта THEMIS. Анализировались моменты функций распределения ионов и электронов, восстанавливаемые двумя различными приборами: ESA (ионы с $E=1.6$ эВ - 25 кэВ и электроны с $E=2$ эВ - 32 кэВ) и SST (ионы с $E=25$ кэВ - 6 МэВ и электроны с $E=25$ - ~900 кэВ). Впервые определена структура статистически усредненного распределения давления плазмы в окружающем Землю плазменном кольце на геоцентрических расстояниях от ~6 до ~10 R_E . Показано, что распределение давления близко к азимутально симметричному.

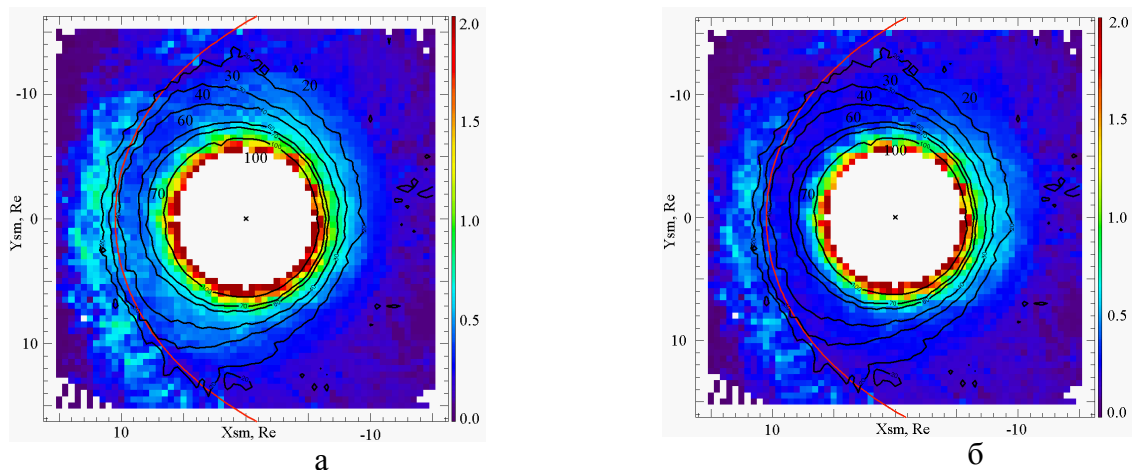


Рис. Распределение p_{\perp} - среднего значения перпендикулярных к магнитному полю (а) и p_{\parallel} - компонента вдоль магнитного поля (б) составляющих тензора полного плазменного давления (ионов и электронов). Дополнительно нанесены – среднее положение магнитопаузы по модели [Shue et al., 1998] и уровни постоянной величины модуля локального магнитного поля

Кирпичев И.П., Антонова Е.Е. Распределение давления плазмы в экваториальной плоскости магнитосферы Земли на геоцентрических расстояниях от 6 до 10RE по данным международного проекта THEMIS // Геомагнетизм и аэрономия, т. 51, № 4, с. 456-461, 2011.

Флуктуации скорости плазмы в хвосте магнитосферы

Получено глобальное статистически усредненное распределение диагональных компонент тензора вихревой диффузии в плазменном слое магнитосферы Земли в магнитоспокойное время и во время магнитосферной суббури на геоцентрических расстояниях до 30 радиусов Земли. Проведен анализ зависимости диагональных компонент тензора вихревой диффузии на различных геоцентрических расстояниях в плазменном слое магнитосферы Земли. Использована база данных 5 спутников международного проекта THEMIS. Определялись амплитуды флуктуаций и автокорреляционное время. Исследована зависимость данных коэффициентов от фазы суббури и геоцентрического расстояния. Полученные результаты позволяют объяснить локализацию начала взрывной фазы магнитосферной суббури на сравнительно небольших геоцентрических расстояниях $<10R_E$, где невелик уровень турбулентных флуктуаций и движение плазмы перед началом взрывной фазы суббури близко к ламинарному.

Проведено одновременные измерения коэффициента квазидиффузии поперек плазменного слоя, толщины слоя и крупномасштабного поля «утро-вечер» для события 12 сентября 2004 г., когда спутники проекта CLUSTER пересекали плазменный слой и имелись одновременные данные измерений радара SuperDARN, позволяющие оценить величину поля «утро-вечер». Результаты анализа показали, что экспериментально определенная толщина турбулентного плазменного слоя хорошо соответствует теоретическим предсказаниям равновесного турбулентного плазменного слоя Антоновой и Овчинникова.

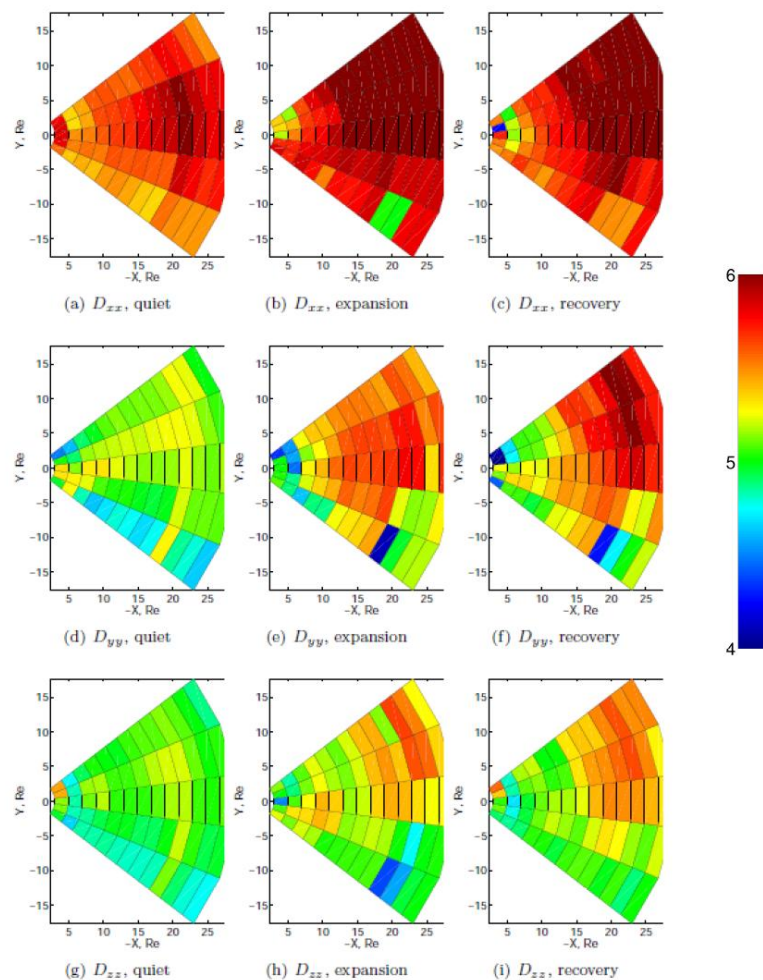


Рис. Глобальное распределение коэффициентов квазидиффузии в ночной магнитосфере

Stepanova M., V. Pinto, J. A. Valdivia, and E. E. Antonova Spatial distribution of the eddy diffusion coefficients in the plasma sheet during quiet time and substorms from THEMIS satellite data // J. Geophys. Res. V. 116. A00I24. doi:10.1029/2010JA015887, 2011.

Stepanova M., E.E. Antonova Modeling of the turbulent plasma sheet during quiet geomagnetic conditions // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. V. 73. Issue 13. p. 1636–1642. 2011.

Исследования внешнего радиационного пояса Земли

По данным одновременных измерений, проводившихся в ноябре 2009 года на борту солнечной обсерватории «КОРОНАС-Фотон» и ИСЗ «Метеор-М №1», исследовались динамика внешнего радиационного пояса Земли и положение его высокоширотной границы. Показано, что в период низкой солнечной активности резкие (на несколько порядков) возрастания интенсивности электронов внешнего РПЗ наблюдаются после прихода к Земле высокоскоростных потоков солнечного ветра, и это происходит одновременно с возрастанием волновой активности на высокоширотных наземных станциях. Среднее положение границы на данных высотах имеет форму овала. Положение и форма овала на уровне ионосферы определяется особенностями главного магнитного поля Земли: координатами северного магнитного полюса и интенсивностью недипольных гармоник внутреннего поля Земли.

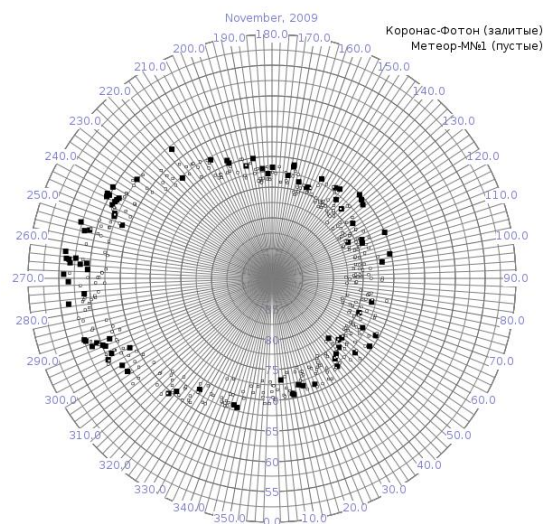


Рис. Пересечения (в географических координатах) высокоширотной границы внешнего радиационного пояса спутниками «КОРОНАС-Фотон» ($E_e > 200$ кэВ, белые значки) и «Метеор-М №1» ($E_e > 100$ кэВ, черные значки), зарегистрированные в ходе одновременных наблюдений в ноябре 2009 г.

Разброс точек для каждого спутника связан с эффектом магнитосферных токовых систем, которые стремятся сдвинуть овал в ночную область, но вследствие вращения Земли в течение суток воздействуют на разные участки овала.

В.О. Барина, А.В. Богомолов, В.В. Калегаев, И.Н. Мяжкова, М.И. Панасюк, Д.А. Парунакян, М.О. Рязанцева, Л.И. Старостин Динамика внешнего радиационного пояса Земли в ноябре 2009 года по данным экспериментов, проводившихся на ИСЗ «КОРОНАС-Фотон» и «МЕТЕОР-М №1» // Вестник МГУ, серия 3. Физика. Астрономия. №6. С. 122-127. 2011.

Квазистационарные возрастания потоков электронов

Проведен анализ ранее обнаруженных возрастаний потоков энергичных электронов к полюсу от внешней границы внешнего радиационного пояса. Показано, что обнаруженные возрастания локализованы на широтах аврорального овала и могут появляться в результате образования локальных магнитных ловушек для энергичных частиц.

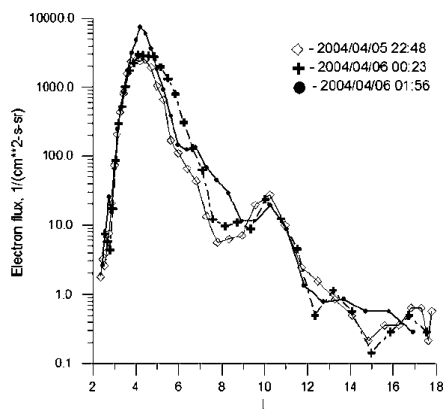


Рис. Зависимость потока электронов с энергией > 300 кэВ, измеренная на спутнике «КОРОНАС-Ф», от L (где L – параметр МакИлвайна) для трех последовательных пролетов в высокоширотной области южной полусферы 5-6 апреля 2003 г.

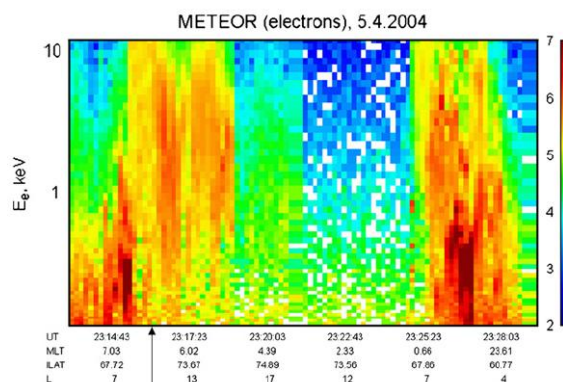


Рис. Высыпания авроральных электронов, измеренные на спутнике «Метеор-3М» 6 апреля 2003 г. (стрелка показывает положение одновременно измеренного максимума возрастания к полюсу от внешнего радиационного пояса)

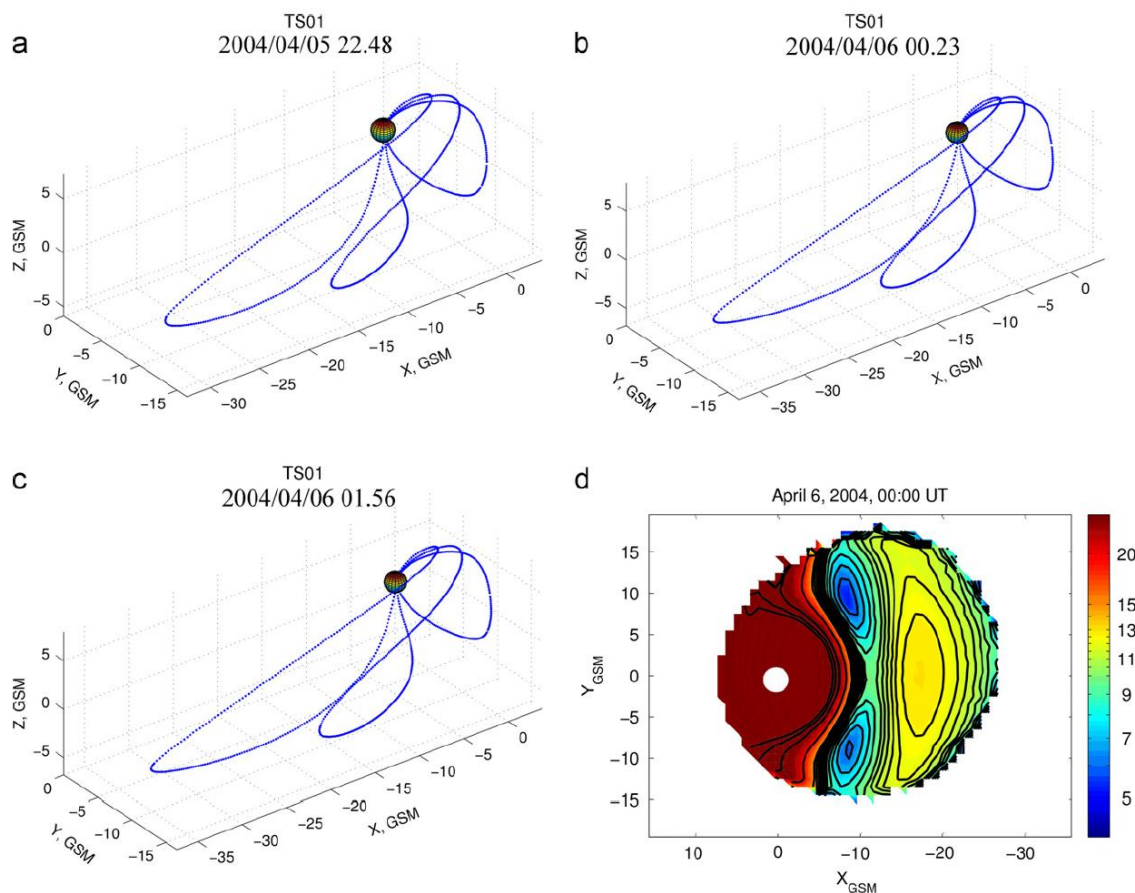


Рис. Результаты проецирования возрастания 5-6 апреля 2003 г. с использованием модели Цыганенко-2001 на экваториальную плоскость и положение контуров минимумов магнитного поля в экваториальной плоскости $B_{\min} = \text{const}$

Antonova E.E., I.M. Myagkova, M.V. Stepanova, M.O. Riazantseva, I.L. Ovchinnikov, B.V. Mar'in, M.V. Karavaev Local particle traps in the high latitude magnetosphere and the acceleration of relativistic electrons // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, V. 73, Issue 11-12, p. 1465–1471, 2011.

Кольцевой ток

В результате анализа экспериментальных данных по кольцевому току (КТ) получены количественные закономерности, позволяющие с высокой степенью достоверности судить о радиальном профиле давления КТ во время магнитной бури по наземным магнитным данным (по D_{st} -вариации).

1. Установлено, что на главной фазе и фазе восстановления бурь функции, описывающие зависимости положения максимума давления в вечернем секторе от текущей величины D_{st} принципиально различаются и на фазе восстановления эта зависимость значительно круче. Показано, что степенная зависимость L_m от D_{st} на главной фазе бурь с показателем близким к экспериментальным значениям получается из уравнений дрейфового движения ионов КТ в электрическом и магнитном полях геомагнитной ловушки; она отражает близкий к дипольному характер магнитного поля вблизи максимума КТ и масштабную инвариантность картины конвекции частиц.

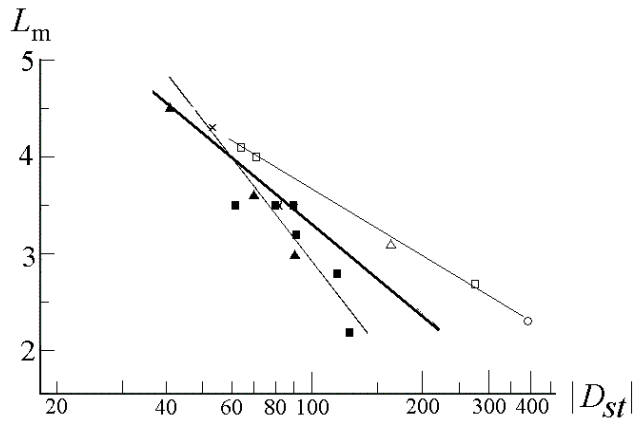


Рис. Среднеквадратичные экспоненциальные аппроксимации положения максимума давления по данным о КТ вблизи экваториальной плоскости в вечернем секторе MLT в зависимости от текущей величины D_{st} (в нТл). Светлые значки относятся к главной фазе, темные – к фазе восстановления бурь. Толстая линия – аппроксимация по всем 16 точкам (без разделения на фазы бурь).

2. Рассмотрена форма внешней кромки радиального профиля давления КТ и показано, что она очень хорошо описывается законом $p(L) \approx aL^{-2} \exp(-L/L_0)$. Такая аппроксимация отвечает экспоненциальному росту полной энергии частиц КТ на данной L -оболочке с уменьшением L . На главной фазе бурь типичное значение $L_0 \sim 4$, а на фазе восстановления $L_0 \sim 2$. На главной фазе бурь параметр a антикоррелирует с величиной L_m , т. е. более глубокое вторжение КТ должно обеспечиваться более высоким давлением горячей плазмы на периферии ловушки. На фазе восстановления типичных бурь численные значения параметров a , L_m и L_0 КТ хорошо согласуются с текущими значениями D_{st} посредством формулы Десслера-Паркера-Скопке. Показано, что полученные зависимости $L_m(D_{st})$ для фазы восстановления бурь следуют из этой формулы. Эффект значительного увеличения крутизны внешней кромки КТ при переходе от главной фазы к фазе восстановления типичных бурь можно связать с различием в асимметрии КТ на этих двух фазах.

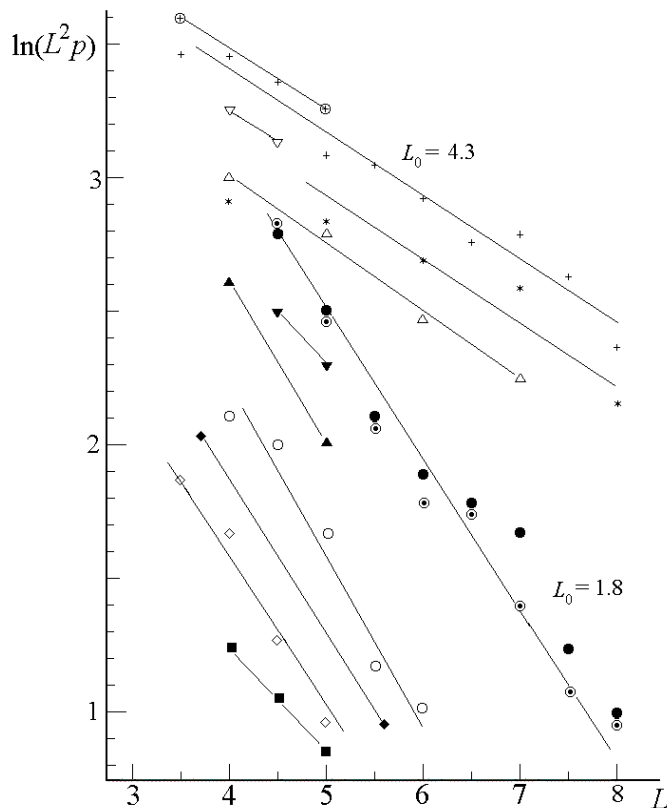


Рис. Радиальные профили величины $\ln(pL^2)$ на внешней кромке буревого КТ вблизи экваториальной плоскости, построенные по данным различных ИСЗ. Отдельные ряды точек (одинаковых значков) для наглядности разнесены по вертикали.

3. На главной фазе бурь величина отношения давления плазмы к давлению магнитного поля в максимуме КТ практически не зависит от силы бури и значения L_m , что отражает противостояние магнитного поля Земли экспансии КТ и свидетельствует об ограниченных возможностях инжекции частиц КТ на малые L во время бурь. На фазе восстановления бурь эта величина быстро увеличивается с ростом L_m , отражая увеличение доли плазмы в общем балансе давлений.
4. Показано, что максимальный возможный вклад КТ в буревую D_{st} -вариацию ограничивается Южно-Атлантической аномалией геомагнитного поля и не превышает 250–300 нТл.

Ковтюх А. С. Радиальный профиль давления буревого кольцевого тока как функция D_{st} // Космич. исслед. 2010. Т. 48. №3. С. 218-238.

Долготная асимметрия потоков протонов

Представлены результаты исследований динамики потоков протонов с энергией 30–80 кэВ и 80–240 кэВ, что соответствует диапазону энергий частиц кольцевого тока, по данным трех низковысотных полярных спутников серии NOAA (POES 15, 16, 17) во время геомагнитной бури 21–22.I.2005. Выявлены особенности долготной асимметрии во время геомагнитной бури потоков энергичных протонов в двух областях: ниже и выше по широте границы изотропизации (квазизахваченных и высыпающихся частиц). Обнаружена постоянная долготная асимметрия потоков высыпающихся частиц. Асимметрия потоков квазизахваченных частиц наблюдается от начала бури до поздней фазы восстановления. Максимум усредненных по долготе потоков высыпающихся частиц достигается на начальной фазе бури.

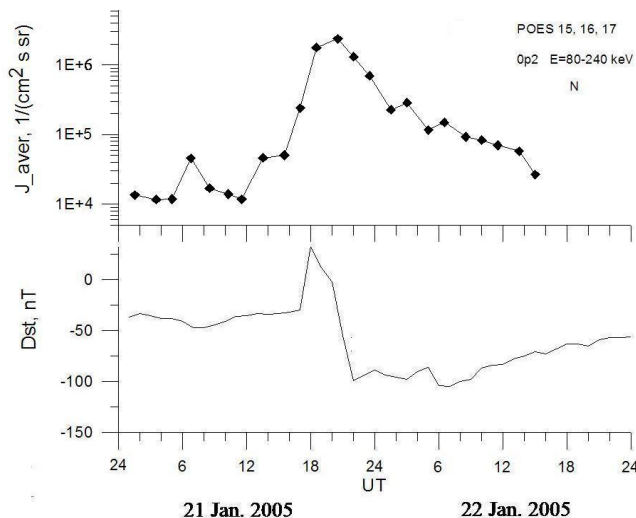


Рис. Временные профили усредненных по долготе максимальных потоков высыпающихся протонов и D_{st} -индекса 21–22.I.2005

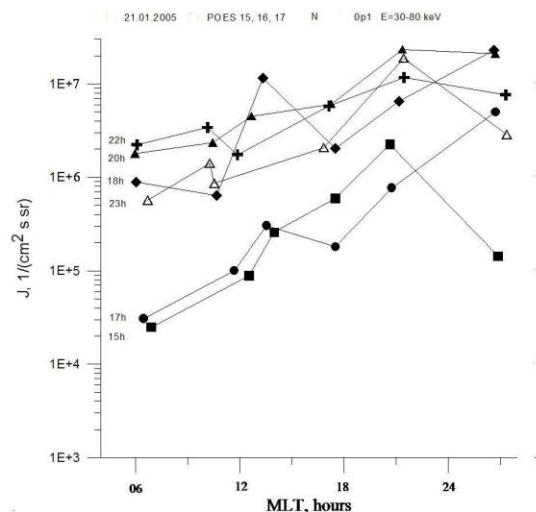


Рис. Долготное распределение максимальных потоков высыпающихся протонов 21.I.2005.

Kalegaev V.V., Vlasova N.A., Some peculiarities of longitudinal distribution of proton fluxes at high latitudes // Advances in Space Research. 2011. V. 48. С. 2028-2035. doi: 10.1016/j.asr.2011.08.010.

УФ излучение верхней атмосферы

В результате статистического анализа потоков энергичных электронов в околоземном пространстве и интенсивности свечения ночной атмосферы в диапазоне 300-400 нм обнаружены три области повышенной интенсивности УФ излучения на низких, средних и высоких широтах. Полученные численные оценки интенсивности УФ излучения показали, что стабильные и квази-стабильные потоки высыпающихся электронов не обеспечивают наблюдающуюся интенсивность УФ излучения на малых и средних широтах. В то же время УФ излучение на высоких широтах может быть обусловлено высыпающимися электронами. УФ излучение на низких широтах связано с мезосферным атомарным кислородом, концентрация которого существенно увеличивается на широтах от 20° до 40°.

Panasyuk M.I., Bogomolov V.V., Garipov G.K., et al. Transient Luminous Event Phenomena and Energetic Particles Impacting the Upper Atmosphere: Russian Space Experiment Programs // Journal Geophys. Res. 2010. V.115, A00E33, doi: 10.1029/2009JA014763.

Dmitriev A.V., H.-C. Yeh, M.I. Panasyuk, V.I. et al. Latitudinal profile of UV nightglow and electron precipitations // Planetary and Space Science. 2011. V.59, p. 733–740.

Свечения ночной атмосферы Земли

Данные спутника «Университетский-Татьяна-2» впервые позволили выделить среди кратковременных (длительностью от долей мсек до сотен мсек) вспышек УФ-излучения в верхних слоях атмосферы (получивших название транзиентов) не только вспышки, генерируемые непосредственно над молниями, но и вспышки далеко от молнии (иногда на расстоянии в тысячи км от грозовой области). Впервые регистрировались серии вспышек, ежеминутно наблюдавшихся на траектории спутника, в том числе и над безоблачными районами. Последние представляют особый интерес, так как свидетельствуют о возбуждении и затем высвечивании верхней атмосферы на огромных пространствах, примыкающих к грозовым областям.

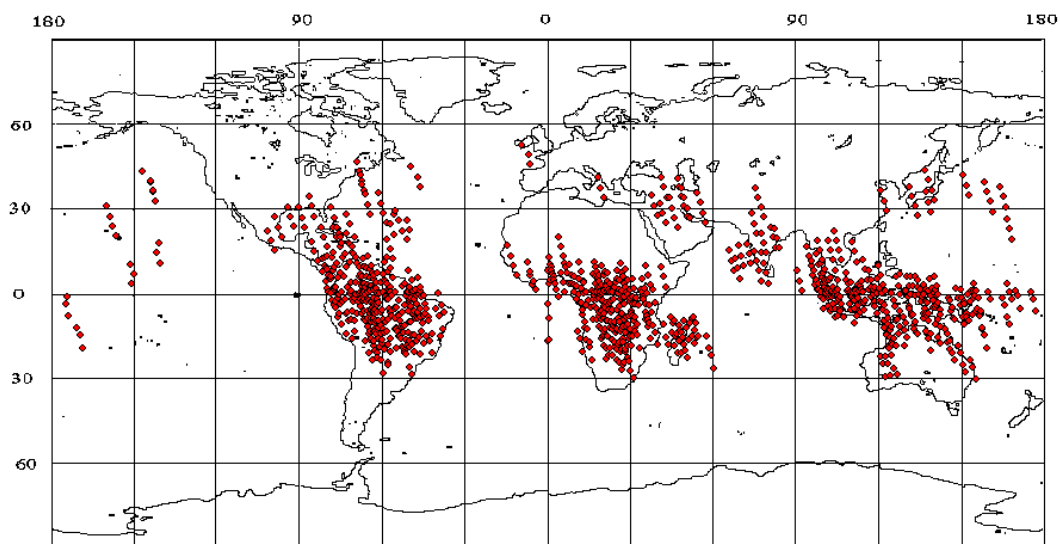


Рис. Распределение на карте Земли вспышек, входящих в серии.

1. Ведыкин Н.Н., Гарипов Г.К., Клименко И.И. и др. Атмосферные вспышки в УФ и ИК диапазонах по данным спутника «Университетский-Татьяна-2» // ЖЭТФ. 2011. Т. 140. С. 900-910.

2. Садовничий В.А., Панасюк М.И., Яшин И.В. и др. ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ СРЕДЫ НА СПУТНИКАХ УНИВЕРСИТЕТСКИЙ–ТАТЬЯНА И УНИВЕРСИТЕТСКИЙ –ТАТЬЯНА– 2 // Астрономический вестник. 2011. т.45. №1. С. 3-29.
3. G.K. Garipov, B.A. Khrenov, P.A. Klimov et al. Global Transients in ultraviolet and red-infrared ranges from data of the “Universitetsky-Tatiana-2” satellite // Archiv-astro. 2011.

V. Космическая дозиметрия

Радиационные условия на Луне

Разработана методика расчетной оценки радиационных условий на Луне для лунных экспедиций. Вычисленные потоки частиц первичного (протоны и ядра ГКЛ и СКЛ) и вторичного (протоны и нейтроны из алюминиевого экрана и лунного грунта) излучения использованы для оценки среднегодовой поглощенной и эквивалентной среднетканевой дозы на поверхности Луны и в глубине лунного грунта.

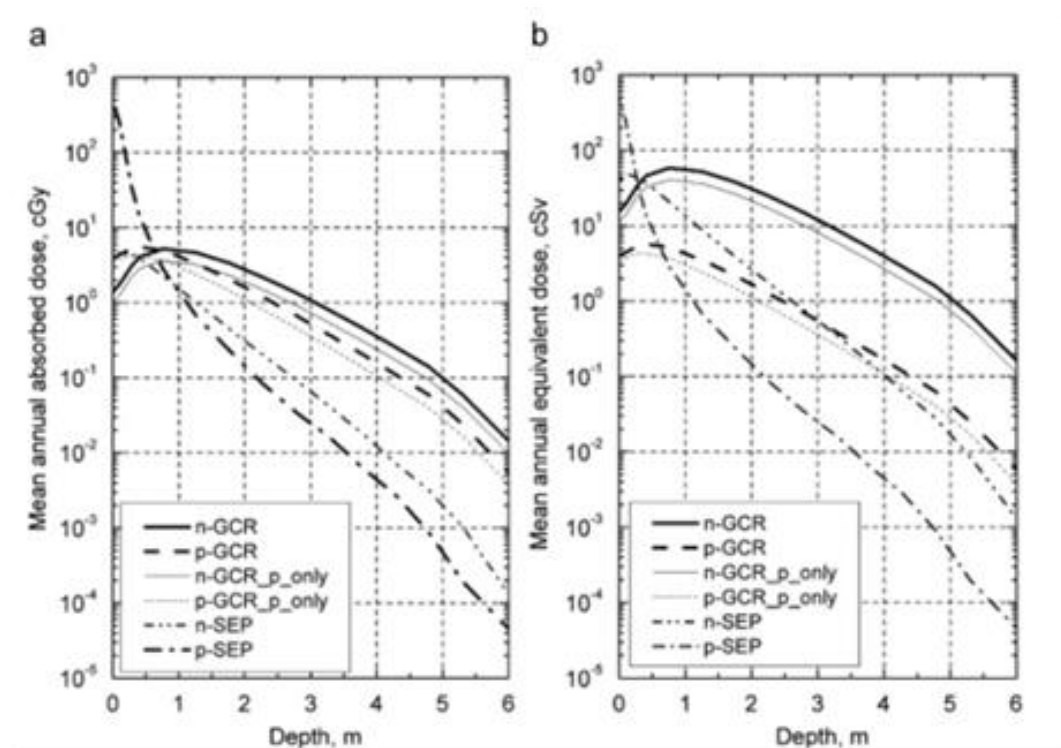


Рис. Вклады от протонов (p) и нейтронов (n) в поглощенную (a) и эквивалентную (b) среднетканевые дозы в зависимости от глубины лунного грунта

Denisov A.N., N.V. Kuznetsov, R.A. Nymmik, M.I. Panasyuk, N.M. Sobolevsky Assessment of the radiation environment on the Moon // Acta Astronautica. 2011. V.68. С. 1440–1447.

Радиационная обстановка у Юпитера

Проведено изучение радиационной обстановки планируемой космической исследовательской миссии к Юпитеру и его спутнику Европа. Осуществлено моделирование пространственного распределения потоков заряженных частиц радиационных поясов Юпитера и доз радиации за различной защитой в окрестности Европы с учётом нескольких факторов и указаны наиболее безопасные, с точки зрения воздействия радиации, области посадки спускаемого аппарата на поверхность Европы и орбиты вокруг неё высотой 100 км.

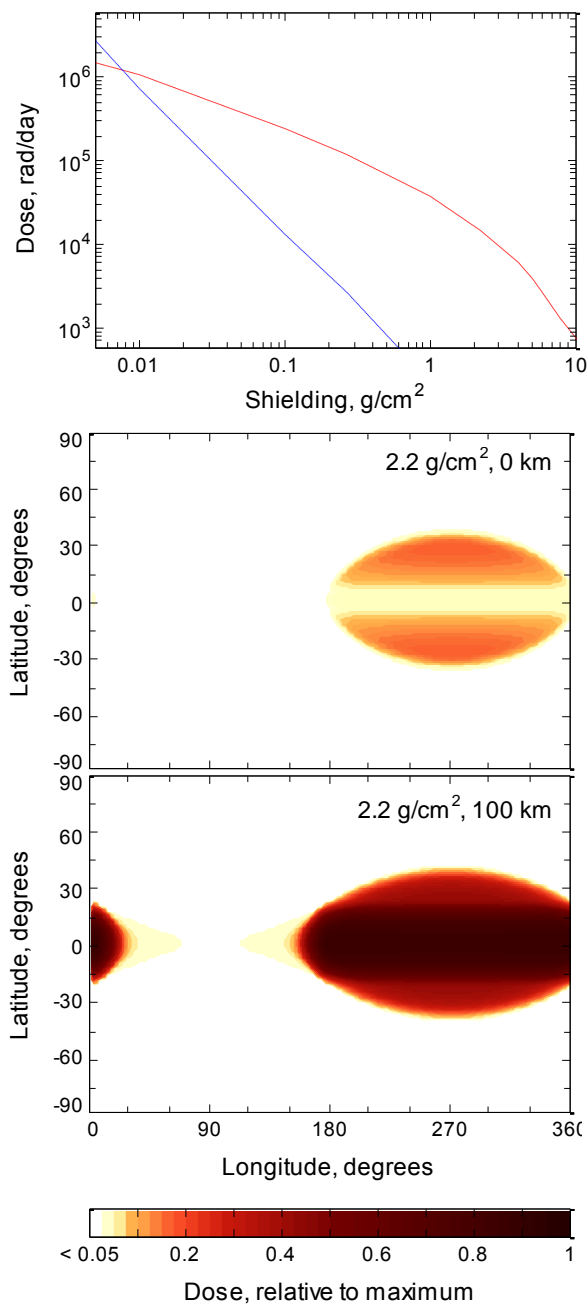


Рис. Верхний график – дозы радиации от электронов (верхняя кривая) и протонов (нижняя) в области орбиты Европы. Нижние графики – пространственное распределение доз за 2.2 г/см^2 Al на поверхности Европы и на высоте 100 км.

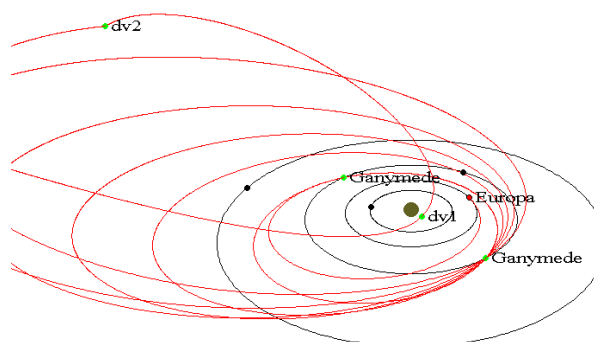
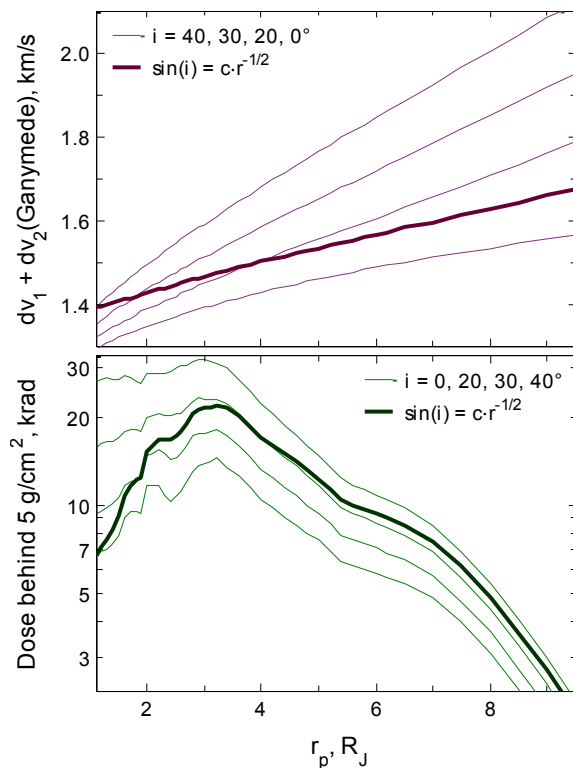


Рис. Верхние графики – зависимость суммарного импульса $dv_1 + dv_2$ и дозы за 5 г/см^2 за время 1-го пролёта Юпитера от радиуса перигея для нескольких указанных наклонений орбиты (тонкие кривые) и для аппроксимации реальной зависимости наклонения от радиуса перигея (жирные). Нижний график – пример оптимальной траектории гравитационных манёвров в системе Юпитера.