



ИГОРЬ ВЛАДИМИРОВИЧ ГЕЦЕЛЕВ

(ведущий научный сотрудник,
профессор НИИЯФ МГУ)

«Самое сильное сожаление вызывает у нас чрезмерная и ничем не оправданная стремительность времени.»

К. Г. Паустовский

И. В. Гецелев родился 13 июня 1934 г.

В школе одновременно с учёбой занимался музыкой, танцами, хоккеем и футболом в клубах ДСО Спартак, Динамо и Торпедо, в последнем персональное шефство над ним осуществлял игрок сборной СССР А. Пономарев.

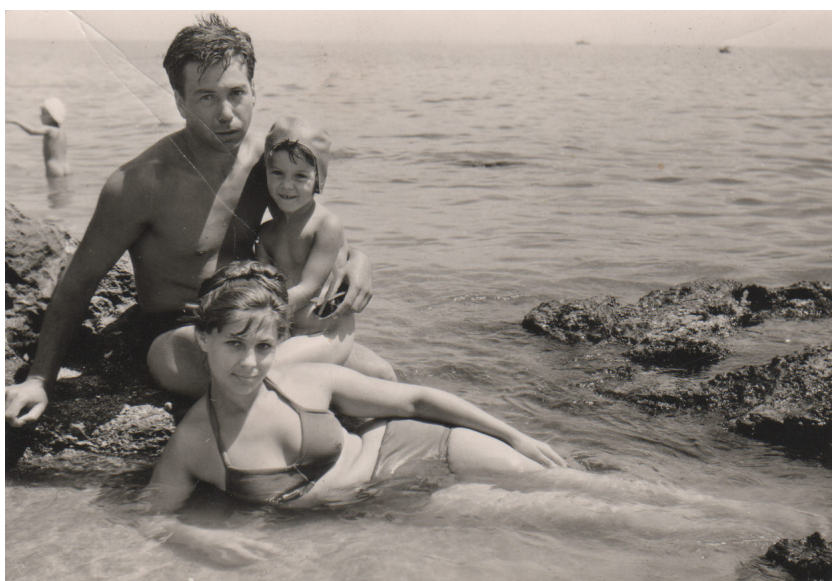
Во время учёбы в выпускном классе школы подготовил оптимальные решения задач, которые были включены в учебное пособие «В помощь сдающим экзамены по математике на аттестат зрелости».

В 1952 г. поступил в Военную академию БТиМВ им. И. В. Сталина. В 1953 г. присвоено звание младшего лейтенанта. В том же году курс был переведён в Киевское высшее военное инженерное радиотехническое училище, которое И. В. Гецелев окончил в 1956 г.

В том же году женился на Людмиле Михайловне Пучковой, в 1957 г. родилась дочь Светлана, в 1965 г. — сын Олег.



Лейтенант Гецелев,
1956 г.



И. В. Гецелев с супругой Людмилой и дочерью Светланой,
1961 г., Крым, Феодосия

В 1956–65 гг. занимался подготовкой специалистов по контролю и ремонту бортовой аппаратуры ракет «земля-воздух», регулярно участвовал в проведении их боевых пусков на полигоне. Обнаружил и вместе с сотрудниками экспериментально проверил негативное влияние в процессе модернизации противопомеховой системы, в результате которого нарушалось управление ракетами, и они вместо цели могли полететь в произвольном направлении. По поручению академика А. А. Расплетина разработал и принял участие в реализации комплекса мероприятий по устранению этого недостатка системы.

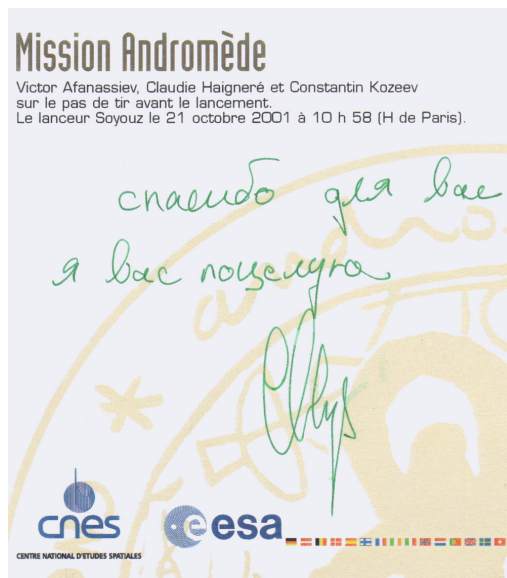
Предложил и внедрил в подведомственных войсковых частях упрощённую (без ущерба качеству) проверку дублированной бортовой аппаратуры ракет с ядерным зарядом, что позволяло исключить многомиллионные затраты на изготовление и покупку дополнительного комплекта бортовой аппаратуры и сократить в два раза дежурную смену офицеров-операторов.

В 1965–89 гг. занимался научной работой в Центральном научно-исследовательском институте Министерства обороны (МО) в должностях научного сотрудника, начальника лаборатории и начальника отдела исследования факторов космического пространства и их воздействия на бортовую аппаратуру.

В 1965 г. разработал алгоритм расчёта радиационных условий полёта космических аппаратов (КА) в радиационных поясах Земли (РПЗ), который, в соавторстве с сотрудниками, был реализован на ЭВМ «Минск-22» (быстродействие ~ 5 тыс. операций в секунду). Это позволило впервые подготовить нормативный документ, содержащий уровни радиации, которые должны учитываться при разработке КА. Предусмотренные алгоритмом вычислительные операции базировались на специально адаптированных к решению основной задачи методах математического моделирования движения ИСЗ, магнитного поля Земли и полей ионизирующих излучений космического пространства (ИИКП). Варианты алгоритмов расчета географических и геомагнитных координат КА



Фотографии космонавтов В. Ф. Быковского и Е. В. Хрунова с памятливыми подписями для И. В. Гецелёва в честь его дня рождения и полёта пилотируемого корабля «Союз-5»



Фотография французской космонавтки Claudie Haigneré с памятной подписью для И. В. Гецелева в честь полёта КА «Союз» 21 октября 2001 г.

с шагом по расстоянию, по времени и для большого класса орбит с применением различных моделей геомагнитного поля использовались также для построения L,В-карт и при обработке результатов космических экспериментов, выполненных НИИЯФ МГУ, ФИАН, ИКИ, ИКФИА, ИФА и др. Применённые в алгоритме данные о пространственном распределении РПЗ были получены по результатам экспериментов, выполненных НИИЯФ МГУ на КА серий «Электрон» и «Космос». По мере получения новой информации эти данные уточнялись и в 1989 г. были представлены в виде эмпирических моделей пространственного распределения потоков протонов и электронов РПЗ, а в 2005 г. — ядер гелия. В 1965–1966 г. впервые было оценено влияние вековых вариаций геомагнитного поля на изменение L,В-координат и погрешности их расчета при использовании различных моделей.

В 1965–1967 гг. разработал метод траекторных коэффициентов, позволяющий достаточно просто оценить характеристики радиационных условий полёта в РПЗ и их изменения в зависимости от расстояний перигея и апогея, наклона и углового расстояния перигея практически для любой орбиты КА. Этот метод нашёл широкое применение в различных НТД, ГОСТах и учебных пособиях. В соответствии с рекомендацией академика С. П. Королева о проведении мероприятий по обеспечению безопасности на всех этапах жизненного цикла КА с 1968–1970 гг. начали осуществлять контроль и прогноз радиационной обстановки в период пилотируемых полётов (по поручению Н. П. Каманина в составе отряда космонавтов) и межпланетных полётов (по предложению Г. Н. Бабакина в группах анализа и управления). Работа в группах управления КА способствовала внедрению в пунктах приема телеметрической информации автоматизированной первичной обработки данных, поступающих с научных приборов, а некоторых из них перевести в разряд служебных. Созданное для этих целей программное обеспечение позволило одновременно с приемом ТМИ выделять научную информацию, согласовать темп ее поступления с возможностями ЭВМ, представлять данные в различных форматах, удобных для оперативного применения и углубленного научного анализа.

На основе анализа теоретических и экспериментальных данных о ИИКП разработаны методы прогнозирования их характеристик с различной заблаговременностью. Созданы модели искусственных радиационных поясов Земли, солнечных (СКЛ) и галактических (ГКЛ) космических лучей, высыпающихся из магнитосферы частиц (ВМЧ). В моделях СКЛ впервые был применён с помощью метода

Монте-Карло совместный анализ параметров распределения величин флюенсов частиц в солнечных протонных событиях (СПС) и периодов времени между ними. Впоследствии этот подход применялся при построении моделей различными зарубежными и отечественными авторами. Для краткосрочных прогнозов рекомендовались методики, основанные на анализе обнаруженной нами неравномерности гелиодолготного распределения источников СПС и корреляционных зависимостях флюенсов протонов с явлениями, предшествующими и сопутствующими возникновению СКЛ и их распространению в межпланетном пространстве. По заказу Н. П. Каманина был разработан планшет, позволяющий оценивать вероятность возникновения СПС, определять безопасные периоды времени, следить за прохождением активных областей по диску Солнца и оценивать время прихода СКЛ к КА. Планшет использовался для оценки радиационной опасности пилотируемых и межпланетных полетов и получил положительную оценку различных специалистов (в т. ч. Келдыша).



Полковник И. В. Гецелев, 1987 г.

Для прогнозирования радиационных условий полёта КА в полях различных видов ионизирующих излучений (естественных и искусственных РПЗ, солнечных и галактических космических лучей, высыпающихся частиц) разработал метод обобщения L,В-координат, основанный на предварительном расчёте времени нахождения КА в различных элементарных областях L,В-пространства. Принимал участие в подготовке и проведении пилотируемых и межпланетных полётов

Результаты прогнозирования учитывались при разработках КА и планировании различных мероприятий: коррекции траектории, выхода в открытый космос, проведения экспериментов, перехода экипажей при ухудшении радиационной обстановки в более безопасный спускаемый отсек и др. В соответствии со служебными обязанностями занимался обеспечением радиационной стойкости бортовой аппаратуры и комплектующих изделий КА, участвовал в подготовке и проведении межпланетных, пилотируемых и особо важных беспилотных полетов. Осуществлял научное руководство работами в области космических исследований и неопознанных летающих объектов (НЛО). Был членом различных координационных и ученых советов. По предложению академика С. Н. Вернова с 1965 г. принимал активное участие в работах НИИЯФ МГУ по подготовке и изданию сборника «Модель космоса», планированию и организации космических экспериментов, автоматизации обработки телеметрических данных, поступающих с различных приборов, установленных на космических аппаратах и в анализе этих данных. Руководил разработкой математического обеспечения и организовал обработку данных научных приборов, установленных на АМС серий «Марс» и «Венера». Для этих целей в 1966 г. НИИЯФ МГУ выделил в его распоряжение группу из 20 сотрудников.

В 1969 г. в МГУ им. М. В. Ломоносова защитил кандидатскую диссертацию на тему «Математическое моделирование физических характеристик радиационных поясов Земли», а в 1985 г. — докторскую на тему «Расчётная модель радиационных условий полёта космических аппаратов». В 1990 г. присвоено звание профессора, в 2002 г. избран действительным членом (академиком) Российской Академии космонавтики им. К. Э. Циолковского. В 1979 г. за работы в области космических исследований присуждена Государственная премия СССР.

С 1989 г. в должности ведущего научного сотрудника НИИЯФ МГУ продолжает заниматься изучением космической среды и совершенствованием основ построения расчётных моделей космической радиации. Проводит исследование особенностей полей заряженных частиц в радиационных поясах Земли, Юпитера и Сатурна, пространственно-временного распределения источников СКЛ и их дефицита во время инверсии магнитного поля Солнца. Материалы исследований регулярно публиковались в отечественных и зарубежных изданиях, докладывались на конференциях, семинарах и симпозиумах. В процессе деятельности имелись встречи с известными учеными, конструкторами, космонавтами, артистами, журналистами.

Награждён 10 государственными медалями, в т. ч. медалями им. С. П. Королёва, Г. М. Бабакина, Ю. А. Гагарина; почётными знаками «За освоение космоса», «Ветеран космоса» и др. Имеет свыше 300 научных работ, в т. ч. 4 монографии.



Л. В. Тверская, И. В. Гецелев, С. П. Рюмин, 32th COSPAR Scientific Assembly, Нагоя, Япония, 1998 г.



И. В. Гецелев, Л. И. Дорман, XXVI European Geophysical Society General Assembly, Ницца, Франция, 2001 г.



А. В. Дмитриев, И. В. Гецелев и А. Н. Зайцев (ИЗМИРАН), XXVIII XXVI European Geophysical Society General Assembly, Ницца, Франция, 2003 г.



И. В. Гецелев с коллегами, XXVII ежегодный семинар «Физика авроральных явлений», Полярный геофизический институт, Апатиты, 2004 г.

1. Математическое моделирование космической среды

1.1. Естественные радиационные пояса Земли (ЕРПЗ)

Автором вместе с коллегами разработана модель пространственного распределения потоков электронов и протонов ЕРПЗ, опубликованная в 1991 г. в виде препринта НИИЯФ МГУ. При её построении использовались результаты экспериментов, выполненных в 1975–1985 гг. на отечественных КА серий «Космос», «Электрон», «Молния» и зарубежных КА серий «Explorer», «Injun», «Telstar», «ATS», «OGO» и др. В модели приведены значения интегральных потоков электронов с энергиями от 0.04 до > 7 МэВ на L от 1.2 до 11 и протонов с энергиями от 0.1 до > 400 МэВ на L от 1.2 до 9. Модель представлена в виде таблиц для периодов максимума и минимума солнечной активности,

в которых для каждой L -оболочки и энергии частиц даётся зависимость потока от величины магнитного поля B в диапазоне значений от B_0 на геомагнитном экваторе до B_{\max} на малых высотах, где поток не превышает $1 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Выбрано разбиение L, B -пространства, позволяющее достаточно подробно отобразить особенности пространственного распределения потоков частиц. В промежутках между максимумом и минимумом солнечной активности предполагается изменение потоков по синусоидальному закону.

На рис. 1 и 2, в качестве примера, приведены экваториальные профили и высотные хода на $L = 3$ потоков электронов и протонов различных энергий для эпохи максимума, рассчитанные по данной модели.

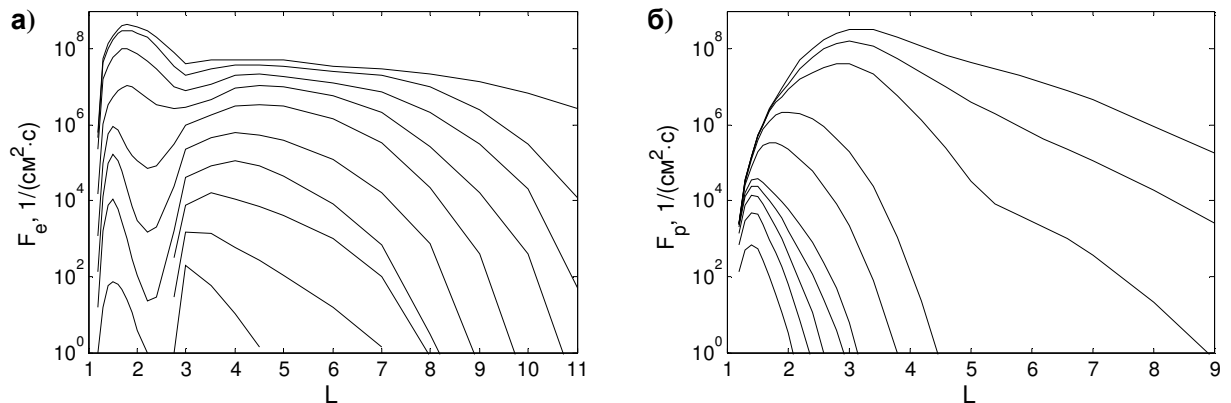


Рис. 1. Экваториальные профили интегральных потоков а) электронов с $E > 0.04, 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6$ МэВ, б) протонов с $E > 0.1, 0.4, 1, 4, 10, 30, 50, 100, 200, 400$ МэВ для эпохи максимума по модели НИИЯФ.

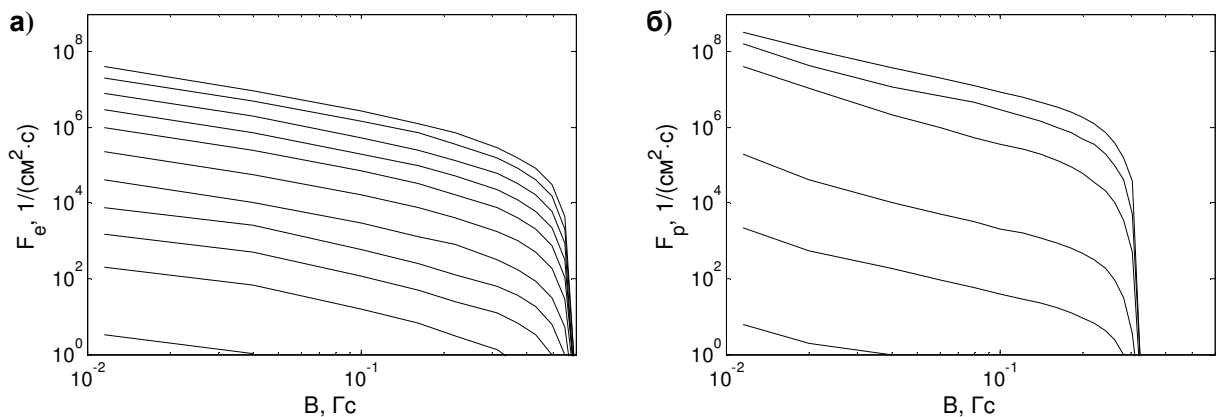


Рис. 2. Высотный ход интегральных потоков а) электронов с $E > 0.04, 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ МэВ, б) протонов с $E > 0.1, 0.4, 1, 4, 10, 30$ МэВ на $L = 3$ для эпохи максимума по модели НИИЯФ.

На рис. 3 представлено экваториальное распределение и высотный ход на $L = 3$ суммарных доз радиации от протонов и электронов ЕРПЗ за сферическими защитами различной толщины для эпохи максимума.

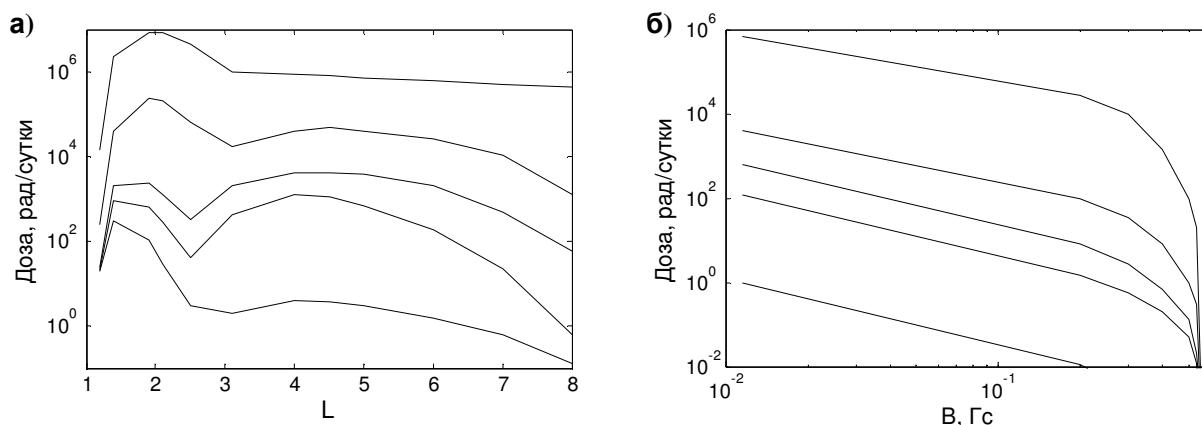


Рис. 3. а) экваториальное распределение, б) высотный ход на $L = 3$ доз радиации за сферическими защитами 0, 0.1, 0.5, 1, 3 г/см² для эпохи максимума.

Разработана также модель пространственного распределения низкоэнергичных частиц. Модель содержит значения потоков электронов с энергиями от 1 до > 40 кэВ и протонов с энергиями от 1 до > 100 кэВ на L от 1.2 до 7 для эпох минимума и максимума солнечной активности. Зависимость от фазы солнечного цикла обнаруживается для протонов на $L < 2.0$ при $B > 0.1$ Гс, а для электронов — в большом диапазоне значений параметра L от 1.5 до 4.5. На рис. 4, в качестве иллюстрации, приведён высотный ход потоков протонов для периодов минимума и максимума солнечной активности.

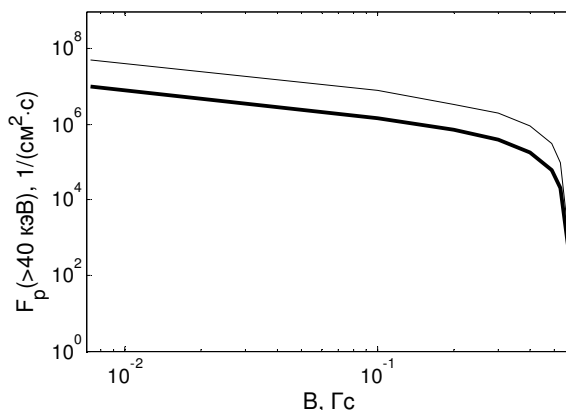


Рис. 4. Высотный ход потоков протонов ЕРПЗ с $E > 40$ кэВ на $L = 3.5$ для эпохи максимума (толстая линия) и минимума (тонкая линия) солнечной активности.

Создана также модель пространственного распределения интегральных потоков ионов гелия с энергиями > 1, 2, 4 и 7 МэВ в диапазоне значений параметра L от 1.1 до 6.6 и в широком интервале значений B/B_0 . В её основу положены данные измерений на отечественных КА серий «Космос», «Молния», «Прогноз», «Интеркосмос», «Горизонт», зарубежных КА серий «Injun», «OGO», «Explorer» и др. Структура модели аналогична эмпирической модели потоков протонов ЕРПЗ.

На рис. 5 приводится экваториальный профиль и высотный ход на $L = 2$ потоков ионов He в ЕРПЗ.

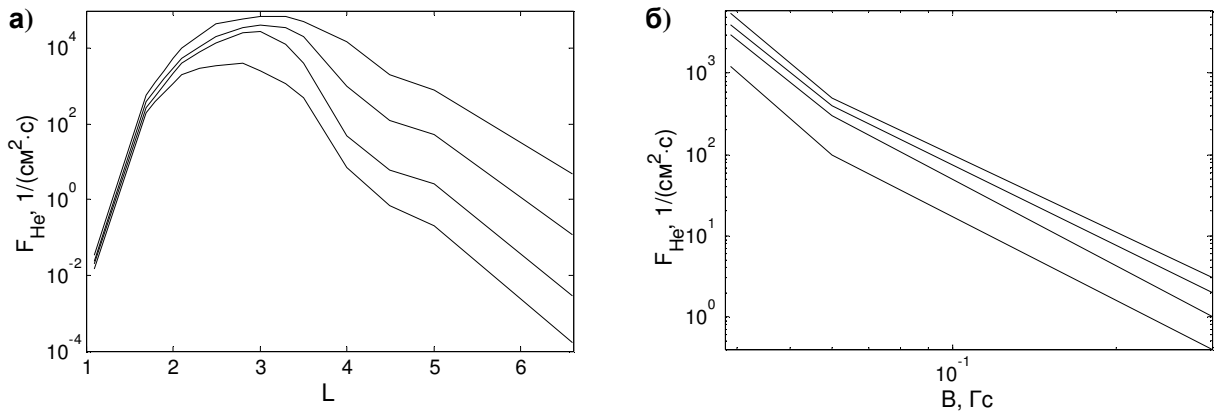


Рис. 5. а) экваториальное распределение, б) высотный ход на $L = 2$ потоков ионов He с $E > 1, 2, 4, 7$ МэВ.

1.2. Искусственные радиационные пояса Земли (ИРПЗ)

Разработана модель искусственного пояса электронов, который формируется в результате высотного ядерного взрыва. Модель положена в основу разработки стандарта ГОСТ 25645.133-86, который нормирует методы определения характеристик полей излучений ИРПЗ в зависимости от координат и мощности высотных ядерных взрывов.

Ниже, в качестве иллюстрации, на рис 6 приведено сравнение измеренных и расчётных потоков электронов искусственного пояса, образовавшегося в результате ядерного испытания «Старфиш» 9 июля 1962 г. на высоте 400 км.

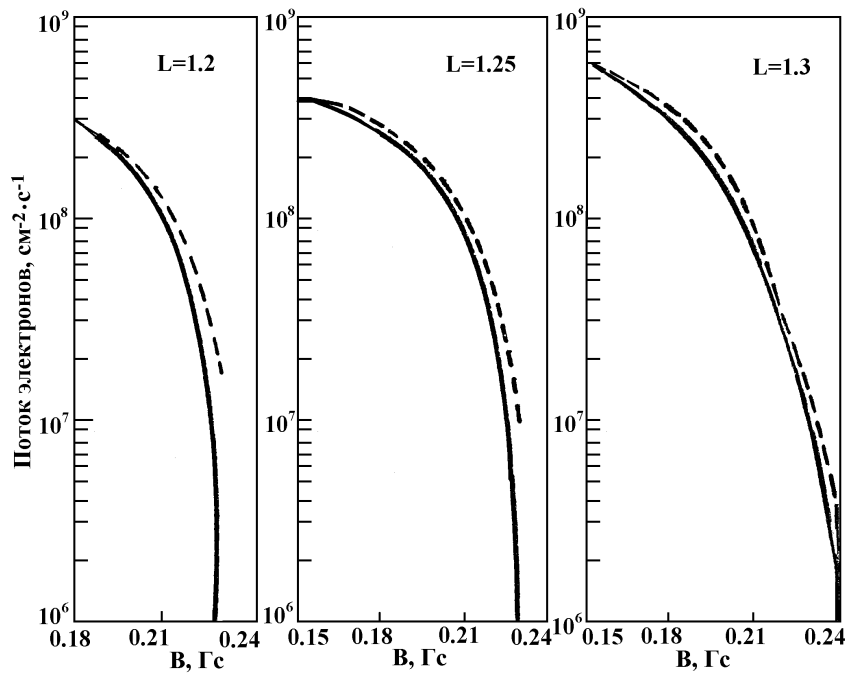


Рис. 6. Экспериментальные (пунктир) и расчётные (сплошная линия) высотные хода потоков электронов с $E > 0.02$ МэВ в эксперименте «Старфиш» для фиксированных значений L .

На рис. 7 приведены зависимости значений потоков электронов с $E > 20$ кэВ от высоты орбиты с наклоном 60° для различных координат ядерных взрывов.

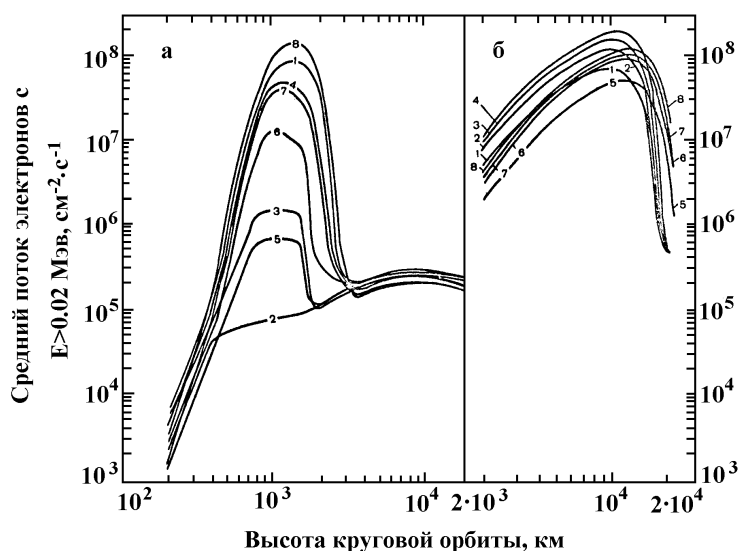


Рис. 7. Зависимость средних значений потоков электронов ИРПЗ с энергией > 20 кэВ от высоты круговой орбиты с наклонением 60° для различных координат ядерных взрывов мощностью а) 1 и б) 2 Мт.

1.3. Солнечные и галактические космические лучи (СКЛ и ГКЛ)

В 70-х гг. автором впервые предложена модель потоков протонов СКЛ, основанная на статистическом анализе совместно промежутка времени между СПС и значений флюенсов в них. Модель позволяла рассчитать вероятность p того, что за время наблюдения t суммарный интегральный флюенс протонов F с данной энергией не превысит заданную величину $F(E, p, t)$. Для моделирования величины p использовался метод Монте-Карло. При этом распределение количества вспышек N предполагается удовлетворяющим экспоненциальному закону, а флюенсов F за время протонной вспышки — логарифмически нормальному закону.

В последние годы создана новая модель, основанная на статистическом анализе флюенсов протонов, накопленных за достаточно длительные периоды времени. В качестве исходных данных использовались значения потоков протонов с энергиями $>1, 2, 4, 10, 30$ и 60 МэВ с 1973 по 2002 гг. по результатам измерений на орбите Земли на космических аппаратах серии IMP. По ним были рассчитаны суммарные флюенсы протонов СКЛ и ГКЛ за периоды времени, от полугода до 10 лет, с различными сдвигами по времени. Анализ выявил две важных закономерности. Первая: распределение флюенсов протонов с $E > 10$ МэВ по величине описывается логнормальным законом. Вторая: распределение значений флюенсов, которые не будут превышены с одинаковой вероятностью p , по энергии хорошо аппроксимируются степенной зависимостью. Параметры этих зависимостей в свою очередь имеют гладкую зависимость от времени наблюдения. Эти результаты позволили построить достаточно простую и компактную модель суммарных флюенсов протонов СКЛ и ГКЛ на орбите Земли за пределами магнитосферы (рис. 8). Чтобы с её помощью для заданного времени наблюдения t найти величины флюенсов протонов различных энергий $F(>E, p, t)$, которые не будут превышены с заданной вероятностью p , сначала из зависимостей рис. 8-а,б находится величина флюенса протонов $F(>E_0, p, t)$ с $E_0 > 10$ МэВ, затем из зависимостей рис. 8-в,г — показатель спектра $\chi(p, t)$ и далее из степенной зависимости $F(>E) = F(>E_0) \cdot (E/E_0)^\chi$ — величины флюенсов остальных энергий. В модели также приводится зависимость годовых флюенсов от фазы цикла солнечной активности.

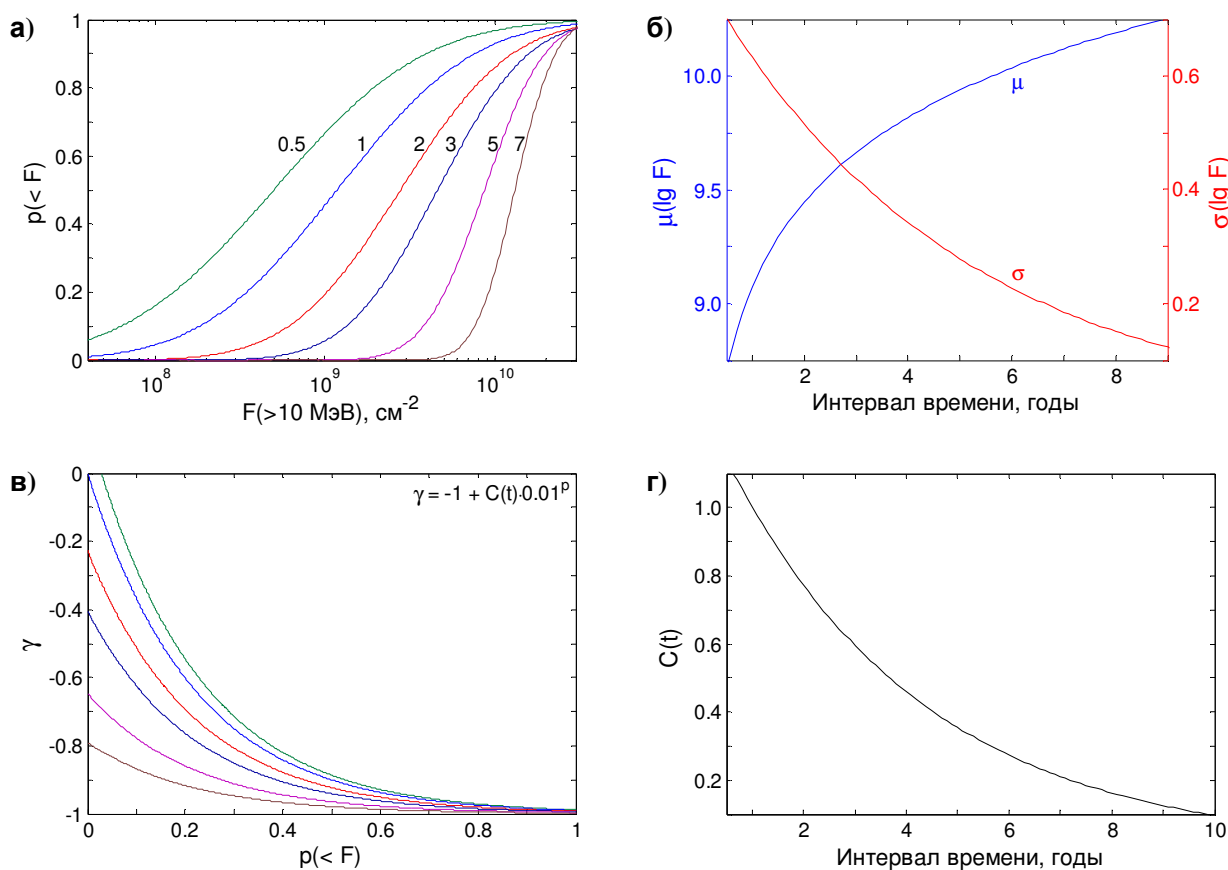


Рис. 8. а) вероятностные кривые для интегральных флюенсов протонов с $E > 10$ МэВ для интервалов времени наблюдения t от 0.5 до 7 лет; б) зависимость их параметров от времени; в) зависимости показателя γ энергетического спектра значений флюенсов протонов, которые не будут превышены с одинаковой вероятностью p , от величины p для тех же интервалов времени; г) зависимость их параметра C от времени.

2. Анализ данных экспериментов по измерению потоков заряженных частиц космических лучей.

3.1. Гелиодолготное распределение источников СКЛ

Автором проводился анализ гелиодолготного распределения областей инжекции СКЛ на Солнце. Первоначально в работе, опубликованной в 1973 г., для этого были рассмотрены 111 вспышек, которые произошли в период с 1957 по 1963 гг. Учитывались особенности распространения СКЛ в межпланетном пространстве, а также мощность СПС. Результаты позволили разработать планшет для среднесрочного прогнозирования радиационно-опасных солнечных вспышек, использовавшийся в работе групп оперативного управления полетом пилотируемых и межпланетных КА.

В последние годы рассмотренная методика была скорректирована: вместо количества СПС использовались сведения о флюенсах протонов в каждом событии; в качестве исходных данных использовались сведения о флюенсах протонов в СПС с 1956 по 2003 г. На рис. 9 показано распределение флюенсов протонов СКЛ с $E > 30$ МэВ в 19–23 циклах солнечной активности по долготе Керрингтона. Очевидна неравномерность распределения. Имеются области «активных» долгот, различающиеся в разных циклах. Существует протяжённая ($80\text{--}170^\circ$) область «пассивных» долгот, неизменная в течение всех 5 солнечных циклов.

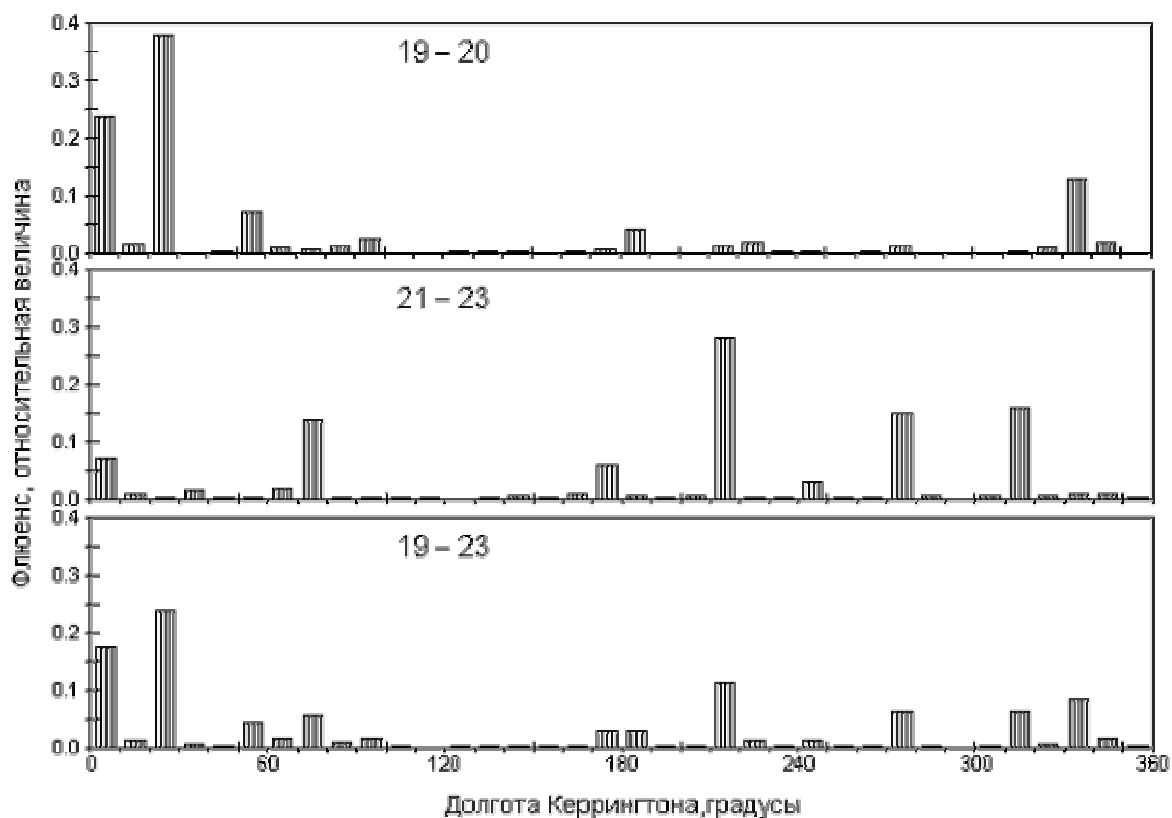


Рис. 9. Распределение флюенсов протонов СПС с $E > 30$ МэВ по долготе Керрингтона в 19–23 солнечных циклах. «Активные» долготы различаются в разных циклах. Существует протяжённая по времени (все 5 циклов) и долготе (80–170°) область «пассивных» долгот.

3.2. Дефицит СКЛ в период смены знака магнитного поля Солнца

Исследованы потоки протонов СКЛ в периоды смены инверсии магнитного поля Солнца. Результаты проиллюстрированы ниже в таблице 1.

Таблица 1. Флюенсы протонов СПС с $E > 10$ и > 30 МэВ, число СПС и показатель энергетического спектра γ за равные временные интервалы до, во время и после смены знака магнитного поля Солнца в 21, 22 и 23 циклах.

Циклы		До	Во время		После		
21	Время	01.10.78 – 30.11.79		01.12.79 – 31.01.81		01.02.81 – 31.03.82	
	Число СПС, γ	8	-1.4	2	-1.8	11	-1.4
	$F(>10, >30)$	$1.1 \cdot 10^9$	$2.2 \cdot 10^8$	$1.4 \cdot 10^8$	$1.2 \cdot 10^7$	$1.8 \cdot 10^9$	$3.3 \cdot 10^8$
22	Время	01.04.89 – 28.02.90		01.03.90 – 31.01.91		01.02.91 – 31.12.91	
	Число СПС, γ	19	-0.9	12	-1.3	16	-1.1
	$F(>10, >30)$	$1.9 \cdot 10^{10}$	$6.1 \cdot 10^9$	$1.1 \cdot 10^9$	$1.8 \cdot 10^8$	$5.4 \cdot 10^9$	$1.3 \cdot 10^9$
23	Время	01.04.99 – 31.10.99		01.11.99 – 31.05.00		01.06.00 – 31.12.00	
	Число СПС, γ	4	-1.6	2	-2.2	11	-0.9
	$F(>10, >30)$	$8.8 \cdot 10^7$	$7.7 \cdot 10^6$	$2.0 \cdot 10^7$	$4.7 \cdot 10^5$	$1.5 \cdot 10^{10}$	$4.8 \cdot 10^9$
Всего	Число СПС	31		16		38	
	$F(>10, >30)$	$2.0 \cdot 10^{10}$	$6.3 \cdot 10^9$	$1.3 \cdot 10^9$	$1.9 \cdot 10^8$	$2.2 \cdot 10^{10}$	$6.4 \cdot 10^9$

Из данных таблицы видно, что флюенсы протонов в период смены знака магнитного поля ниже, число событий меньше, а их спектры мягче, чем за равные интервалы времени до и после этого.

3.3. Формализованный метод отделения потоков в СПС от фона (ГКЛ)

Разными авторами используются различные определения СПС. Как правило, ими задаются некоторые пороговые уровни потока или флюенса протонов, привязанные к конкретному ряду экспериментальных данных.

Нами предложен объективный формализованный метод отделения потоков протонов в СПС от фона, т. е. галактических космических лучей. Метод заключается в следующем.

Двигаемся по ряду среднечасовых потоков протонов с окном шириной в 3 месяца (с шагом в 1 месяц). На рис. 10-а, в качестве примера, показан временной ход потоков протонов с $E > 10$ МэВ для такого интервала с 1 октября по 31 ноября 1977 г. по данным измерений КА IMP-8 (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>).

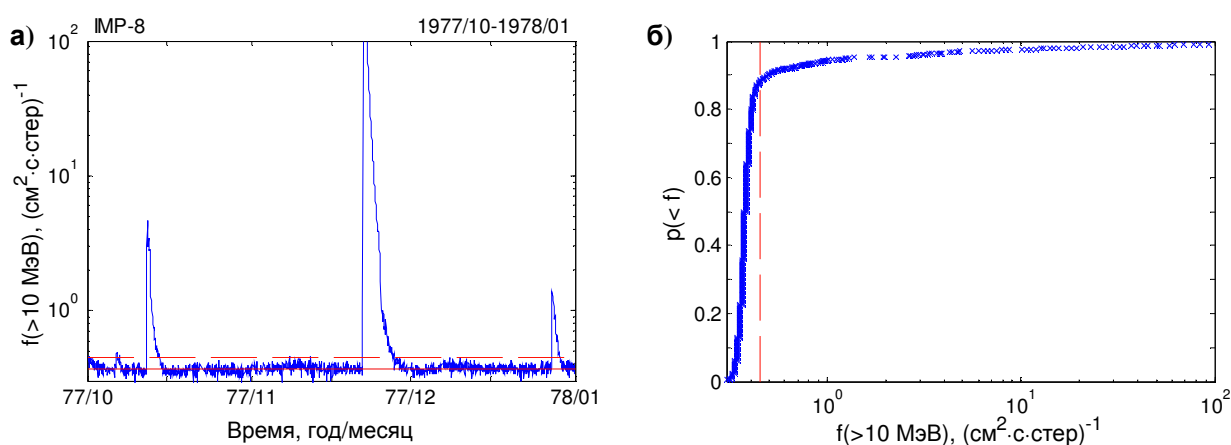


Рис. 10. а) Временной ход среднечасовых интегральных потоков протонов с энергией > 10 МэВ по данным IMP-8 с 1 октября по 31 декабря 1977 г., б) их распределение по величине; пунктирной и сплошной линиями показаны соответственно максимальное и среднее значения потоков протонов ГКЛ.

Для каждого интервала строим распределение потоков по величине (рис. 10-б). На графике видно, что распределение имеет выраженный излом, который указывает на наличие двух источников потоков протонов. Соответствующее излому значение потока (пунктирная линия) примем за максимум «фона». Средняя величина фона (сплошная линия на рис. 10-а) равна среднему значению потоков, лежащих ниже максимума.

Определим начало СПС как превышение максимума фона в 3-х последовательных точках рассматриваемого ряда данных, а окончание СПС — как уменьшение потоков до среднего уровня фона. При вычислении флюенса протонов в СПС фон вычитается.

В приведённом на рис. 10 интервале этим методом выделяются 3 события. Из них, например, в базе данных JPL-85 присутствуют два, а в базе данных NOAA — только одно, центральное.

Предложенный метод не зависит от величин потоков в конкретном эксперименте. Также он слабо чувствителен к ошибке определения максимума фона в пределах 2-го знака. Кривые фона, рассчитанные данным методом, отражают, в том числе, понижения интенсивности протонов после больших СПС, вызванные форбуш-эффектом.

Данный метод не работает для энергий протонов < 4 МэВ. На рис. 11. приведены зависимости, аналогичные рис. 10, для $E > 1$ МэВ. Как видно из рис. 11-б, практически излом в распределении потоков протонов по величине отсутствует.

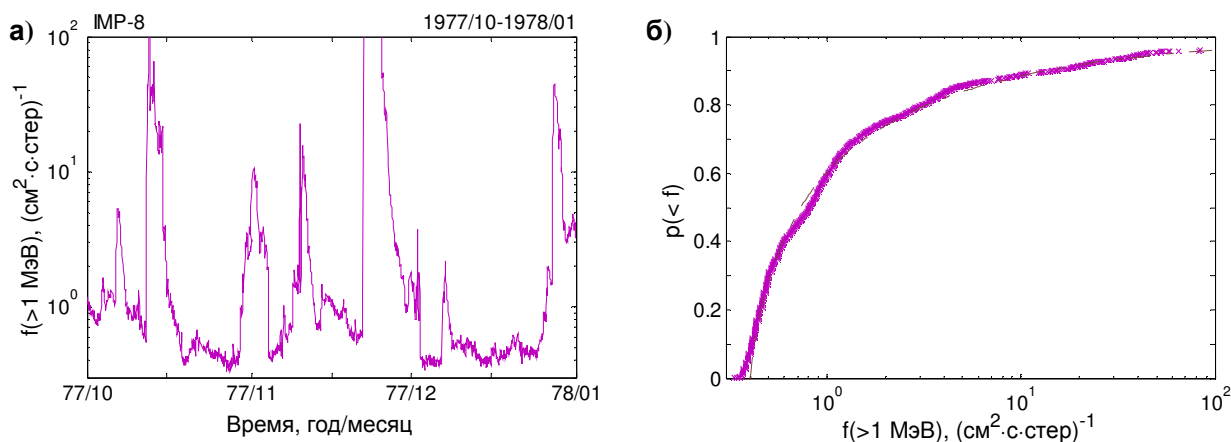


Рис. 11. а) Временной ход среднечасовых интегральных потоков протонов с энергией > 1 МэВ по данным IMP-8 с 1 октября по 31 декабря 1977 г., б) их распределение по величине.

Это свидетельствует, в частности, о необходимости более тщательного изучения источников протонов космических лучей с энергиями < 4 МэВ.

3.4. Разнородность и погрешности данных по измерениям потоков протонов

По результатам анализа различных спутниковых измерений потоков энергичных протонов космических лучей, сделан вывод о том, эти данные являются в достаточной степени разнородными и имеют различные погрешности.

В качестве иллюстрации, на 1-ом графике рис. 12 приведён временной ход потоков протонов с энергиями > 10 и > 60 МэВ по данным IMP-8 с 1986 по 1995 г., а на 2-ом и 3-ем графиках — соответственно временные ходы только потоков протонов ГКЛ тех же энергий, и показателя спектра 10-летних суммарных флюенсов протонов (последний, напротив, определяется в главном образом величиной потоков протонов СКЛ). Видно, что примерно в середине 1989 г. эти ряды испытывают качественное изменение. По некоторым сведениям, в середине 1989 г. в приборе CPME на IMP-8 произошло отключение антисовпадательного контура, имевшегося на всех каналах, кроме 11-го (см. 4-ый и 5-ый графики на том же рисунке).

На 6-ом графике, для сравнения, приведён временной ход потоков протонов с энергиями > 10 и > 60 МэВ по данным GOES-6 за тот же интервал времени. Видно, что в данных GOES-6 скачок интенсивности фоновых потоков в середине 1989 г. отсутствует, правда таковой имеется в середине 1992 г. Величины фоновых потоков на GOES-6 ниже в несколько раз, по сравнению с IMP-8. Для построения рис. 4 использовался «скорректированный ряд данных», также в Интернете доступны исходные данные для КА серии GOES; некоторые исследователи рекомендуют использовать их, как более адекватные. Кроме того, существуют различия между значениями потоков по данным измерений различных КА серии GOES.

Также в данных IMP-8 и GOES имеются аномальные одиночные возрастания среднечасовых интенсивностей протонов более чем на 1–2 порядка величины, которые отсутствуют в данных других КА в это же время. Скорее всего, их можно отнести к артефактам работы приборов, и такие данные должны отбрасываться при анализе.

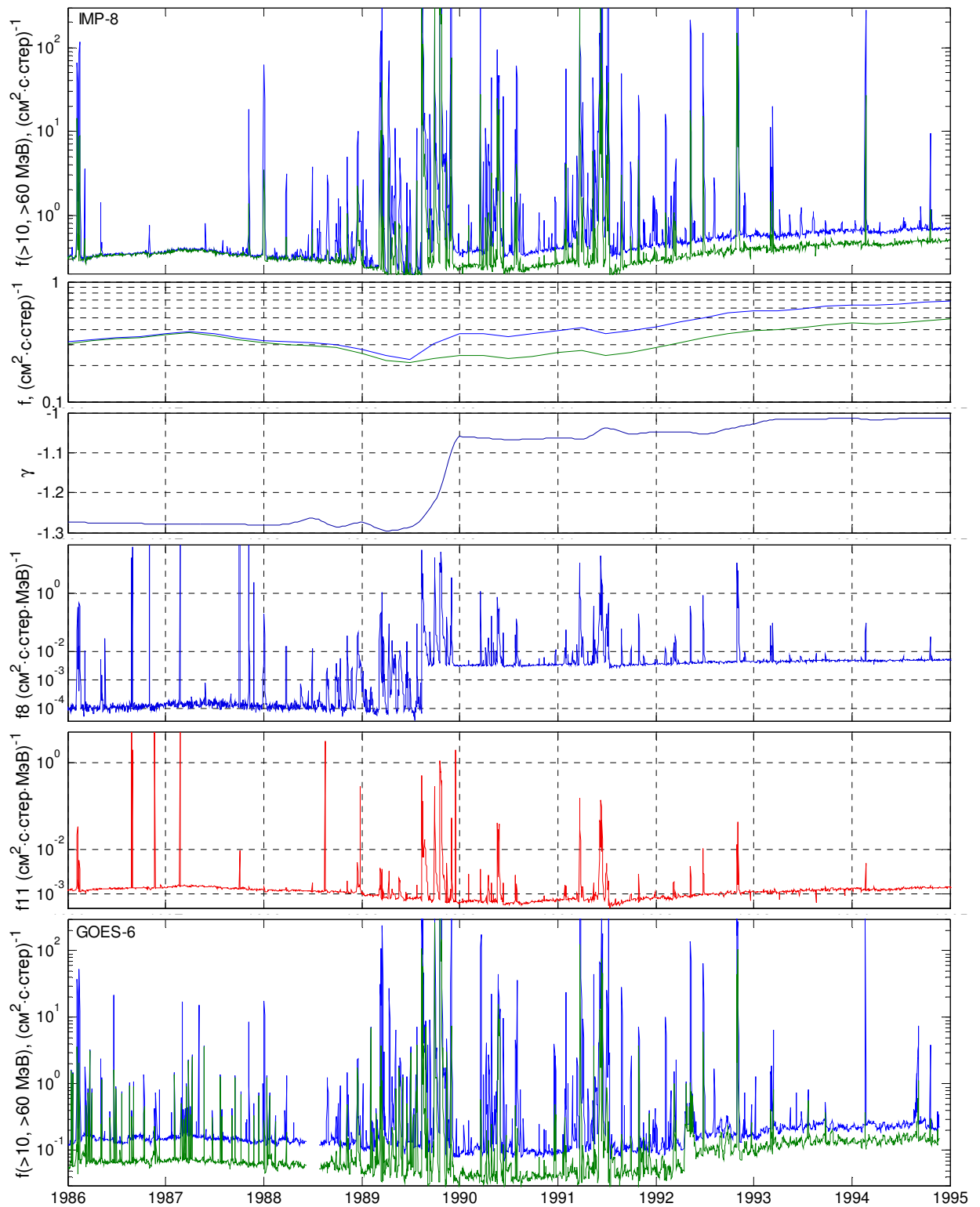


Рис. 12. 1-й график — интегральные потоки протонов с $E > 10$ и > 60 МэВ по данным IMP-8 с 1986 по 1995 г.; 2-й — отдельно потоки протонов ГКЛ тех же энергий; 3-й график — временной ход показателя спектра 10-летних суммарных флюенсов протонов, время по горизонтальной оси соответствует окончанию 10-летнего периода; 4-й и 5-й — дифференциальные потоки протонов с энергиями 25–48 и 145–440 МэВ (8-й и 11-й каналы) на IMP-8; 6-й — потоки протонов с $E > 10$ и > 60 МэВ по данным GOES-6.

Кроме погрешностей используемых приборов, различия в измерениях связаны с различными пространственными и временными условиями измерений, которые определяют пич-угловое распределение, энергетические спектры и интенсивность потоков протонов. На рис. 13 приведён временной ход потоков протонов во время СПС, измеренных на различных спутниках. Ниже показано пространственное положение IMP-8 для тех же интервалов времени.

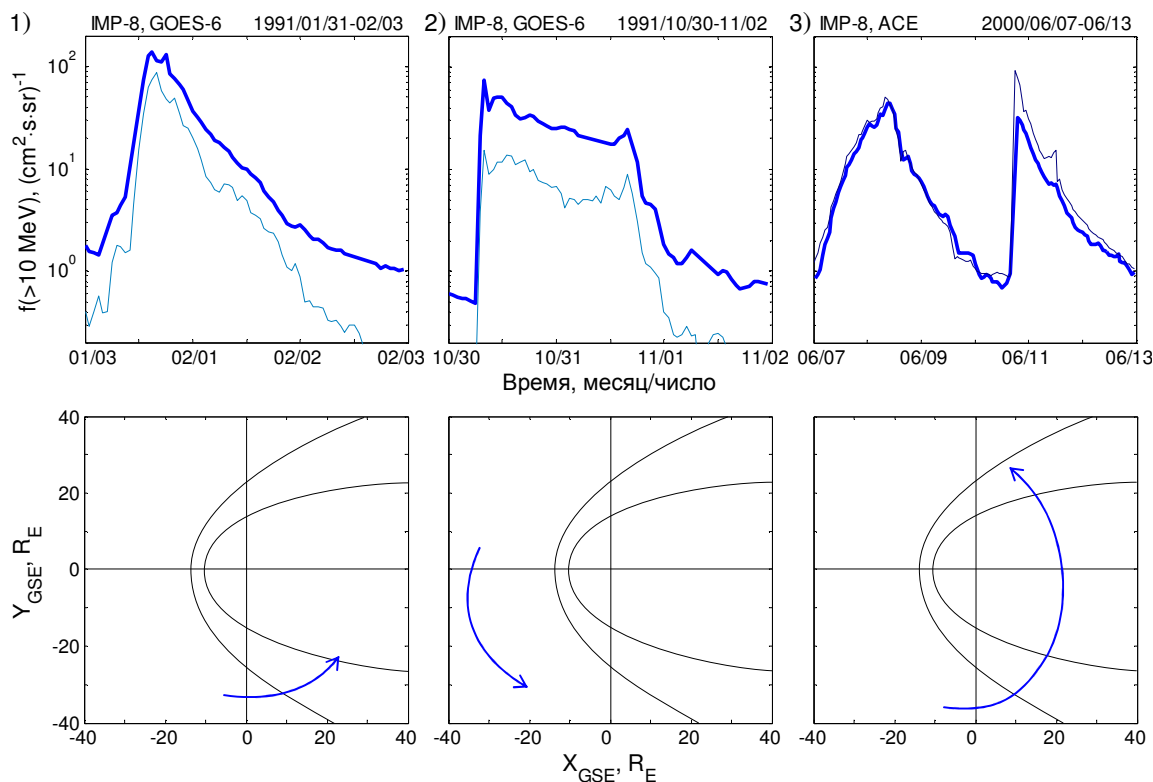


Рис. 13. На верхних графиках: интегральные потоки протонов с $E > 10$ МэВ в СПС 1) 31 января 1991 г., 2) 30 октября 1991 г. по данным IMP-8 (жирная кривая) и GOES-6 (тонкая кривая); 3) двух СПС 7–13 июня 2000 г. по данным IMP-8 (жирная кривая) и ACE (тонкая кривая). Ниже даны координаты IMP-8 для тех же интервалов времени; на графиках также показаны примерные границы магнитослоя и магнитосферы.

Из графиков видно, что разница между потоками по данным измерений IMP-8, имеющего орбиту высотой ≈ 35 радиусов Земли, и геостационарного КА GOES-6 уменьшается, а в сравнении с данными КА ACE, находящегося в точке либрации L1 Земля-Солнце — напротив, увеличивается, когда IMP-8 находится внутри магнитослоя или в хвосте магнитосферы, по сравнению с моментами времени, когда он находится в области солнечного ветра. Однако для того, чтобы с высокой достоверностью приписать разницу в потоках пространственному положению КА, либо характеру распространения потоков протонов в конкретном событии, необходим более тщательный анализ.

3. Радиационные условия миссии к Юпитеру и его спутнику Европе

В настоящее время рассматривается проект отправки в 2015–2020 гг. международной многоспутниковой исследовательской космической миссии к Юпитеру и его спутнику Европе, в котором в т. ч. планируется участие России.

В этой связи автором вместе с коллегами проводится анализ ожидаемых радиационных условий на различных участках полёта. Наибольшая радиационная опасность в ходе миссии будет исходить от мощных радиационных поясов Юпитера. На рис. 14 показаны экваториальные профили доз радиации за сферической защитой разной толщины в околопланетном пространстве Юпитера.

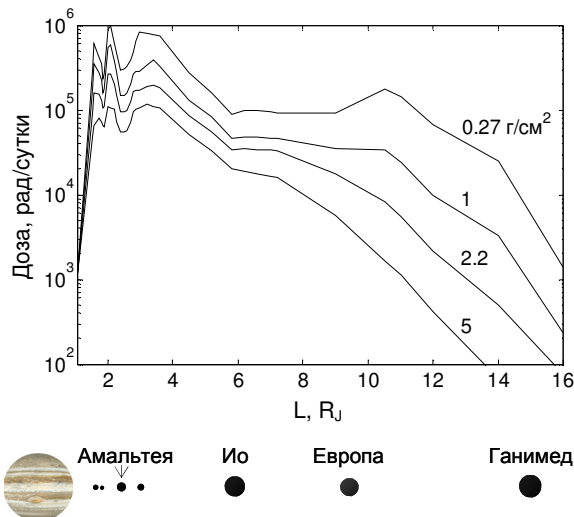


Рис. 14. Экваториальные профили доз радиации за защитами толщиной 0.27, 1, 2.2 и 5 г/см² Al в околопланетном пространстве Юпитера. Внизу показано расположение спутников Юпитера.

На рис. 15 приведена зависимость дозы радиации от толщины защиты для орбиты Европы.

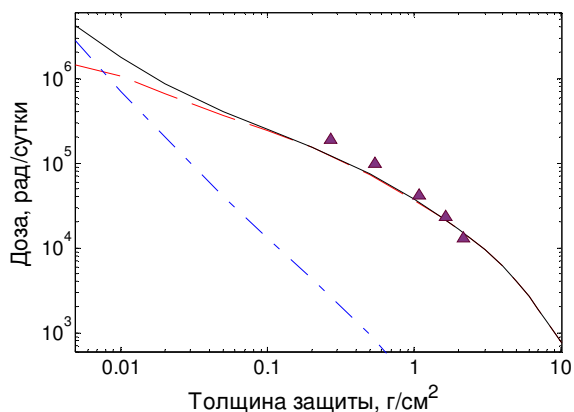


Рис. 15. Дозы радиации за различными защитами от электронов (пунктирная линия), протонов (пунктирно-точечная линия) и суммарная (сплошная линия) на орбите Европы; также треугольниками показан расчёт (Renard и др., 2004).

За 2 месяца работы на орбите Европы и на её поверхности доза за защитой 2–5 г/см² составит несколько сотен килорад. Таким образом, радиационная опасность для электронного оборудования во время миссии к Юпитеру и Европе весьма значительна.

Основные публикации

1. Модель космоса, Том 3, Под ред. С. Н. Вернова, М., МГУ, 1966, 1968, 1970, 1973, 1978, 1983.
2. С. Н. Вернов, Е. В. Горчаков, И. В. Гецелев и др., Исследование энергичных электронов и протонов при полёте спутника «Космос-137», Труды Всесоюзной конференции по физике космических лучей, Ташкент, 1968, М., ФИАН СССР, 1969, ч. 2, вып. 1, с. 23–26.
3. Е. В. Горчаков, И. В. Гецелев, П. П. Игнатъев, М. В. Терновская, Некоторые результаты исследования энергичных электронов и протонов, полученные при полёте спутника «Космос-219», Труды Всесоюзной конференции по физике космических лучей, Ташкент, 1968, М., ФИАН СССР, 1969, ч. 2, вып. 1, с. 32–35.
4. С. Н. Вернов, Е. В. Горчаков, И. В. Гецелев и др., Результаты измерений быстрых заряженных частиц на спутнике «Космос-137», Космические исследования, 1969, т. 7, № 2, с. 273–278.
5. Е. В. Горчаков, И. В. Гецелев, П. П. Игнатъев и др., Радиационные пояса Земли по измерениям на спутнике «Космос-53», Труды Всесоюзной конференции по физике космических лучей, Ташкент, 1968, М., ФИАН СССР, 1969, с. 42–45.
6. Е. В. Горчаков, И. В. Гецелев, П. П. Игнатъев, М. В. Терновская, Некоторые результаты исследования энергичных электронов и протонов, полученные при полёте спутника «Космос-219», Труды Всесоюзной конференции по физике космических лучей, Ташкент, 1968, М., ФИАН СССР, 1969, ч. 2, вып. 1, с. 32–35.
7. Е. И. Воробьев, И. В. Гецелев и др., Обеспечение радиационной безопасности полёта экипажей КА «Союз-9», Космическая биология и медицина, 1971, т. 5, № 4, с. 11–18.
8. Е. В. Горчаков, М. В. Терновская, И. В. Гецелев, Возникновение и распад узкого пояса энергичных электронов в магнитосфере Земли, Геомагнетизм и аэрномия, 1972, т. 12, № 6, с. 1124–1125.
9. И. В. Гецелев, В. А. Эльтеков и др., Сравнительный анализ погрешностей различных методов расчета L,В-координат, Космические лучи, М., Наука, 1972, № 13 с. 213–214.
10. И. В. Гецелев, Е. В. Горчаков, В. А. Эльтеков, Вековые вариации L,В-координат, Космические лучи, М., Наука, 1972, № 13, с. 102–104.
11. С. Н. Вернов, П. В. Вакулов, И. В. Гецелев и др., Результаты измерения интенсивности космических лучей на автоматической станции «Венера-7», Космические исследования, 1972, т. 10, № 4, с. 561–563.
12. И. В. Гецелев, В. И. Ткаченко, Сравнительная оценка вероятностей облучения космических аппаратов солнечными протонами в различные периоды, Проблемы безопасности полётов, 1973, № 10, с. 58–61.
13. И. В. Гецелев, В. И. Ткаченко, Оценка вероятности наблюдения потоков солнечных космических лучей на орбите Земли, Геомагнетизм и аэрномия, 1973, т. 13, № 2, с. 208–211.
14. Е. В. Горчаков, И. В. Гецелев, В. И. Северинов, Движение частиц альbedo в геомагнитном поле, Геомагнетизм и аэрномия, 1973, т. 13, № 5, с. 920–922.
15. Е. В. Горчаков, И. В. Гецелев, В. И. Северинов, Накопление частиц альbedo в геомагнитном поле на средних широтах, Геомагнетизм и аэрномия, 1974, т. 14, № 1, с. 148–149.

16. С. Н. Вернов, Б. А. Тверской, И. В. Гецелев и др., Измерение космических лучей при помощи АМС «Марс-2», Изв. АН СССР, сер. физ., 1974, т. 38, № 9, с. 1859–1862.
17. С. Н. Вернов, Б. А. Тверской, И. В. Гецелев и др., Потоки заряженных частиц в окрестности Марса, Космические исследования, 1974, т. 12, № 2, с. 252–263.
18. В. А. Буров, И. В. Гецелев и др., Об изменениях интегральных потоков СКЛ на орбите космического аппарата в магнитосфере Земли при магнитных бурях, М., Труды ИПГ, 1975, вып. 28, с. 14–22.
19. Е. В. Горчаков, И. В. Гецелев, В. И. Северинов, Накопление частиц альbedo в геомагнитном поле, Геомагнетизм и аэрономия, 1976, т. 16, № 4, с. 706.
20. С. Н. Вернов, Б. А. Тверской, В. И. Волга, Е. Я. Володин, И. В. Гецелев и др., Измерения космических лучей на АМС «Венера-9» и «Венера-10», Космические исследования, 1976, т. 14, № 6, с. 857–868.
21. Е. Я. Володин, И. В. Гецелев, Е. В. Горчаков и др., Измерение космических лучей на АМС «Марс-4, 5, 6, 7», Космические исследования, 1977, т. 15, № 2, с. 316–321.
22. И. В. Гецелев, Ю. И. Губарь, Г. А. Тимофеев и др., Радиационные условия полёта космических кораблей в околопланетной области Юпитера, МГУ, 1984, деп. ВИНТИ № 4636-84, 18 с.
23. И. В. Гецелев, Ю. И. Губарь, А. В. Гетлинг и др., Модель радиационной обстановки искусственных спутников Юпитера, МГУ, 1985, деп. ВИНТИ № 8970В, 22 с.
24. И. В. Гецелев, Г. А. Тимофеев, Ю. И. Губарь, В. А. Кузнецов, А. Р. Мозжухина, Потоки заряженных частиц на траекториях ИСЗ, Космические исследования, 1987, т. 25, вып. 3, с. 473–475.
25. К. А. Васильев, И. В. Гецелев, Искусственный радиационный пояс Земли, Материалы I Всесоюзной научно-технической конференции «Радиационная стойкость бортовой аппаратуры и элементов космических аппаратов», Томск, 25–27 июня, 1991, с. 18.
26. И. В. Гецелев, А. А. Гусев, Л. А. Дарчиева и др., Модель пространственно-энергетического распределения потоков захваченных частиц (протонов и электронов) в радиационных поясах Земли, М., Препринт НИИЯФ МГУ-91/-37/241, 1991.
27. I. V. Getselev, P. P. Ignatiev et al., A Model of Radiation Conditions During Spacecraft Flights in the Interplanetary Space and in Earth's Magnetosphere, Adv. Space Res., 1992, v. 12, № 2–3, p.(2)441–(2)444.
28. А. И. Акишин, И. В. Гецелев, Е. В. Горчаков, Ю. И. Логачёв, Физические условия в космическом пространстве и их воздействие на космические аппараты, В сб. «50 лет Научно-исследовательскому институту ядерной физики им. Д. В. Скобельцына», М., МГУ, 1996, с. 59–73.
29. I. V. Getselev and E. A. Ulanov, Angle Distributions of Particles in the Natural Radiation Belts, Radiation Measurements, 1996, v. 26, № 3, p. 457–459.
30. И. В. Гецелев, М. В. Подзолко, Гелиодолготное распределение источников СКЛ, Международная конференция «Современные проблемы солнечной цикличности», ГАО, Санкт-Петербург, 1997, с. 310–312.
31. И. В. Гецелев, А. И. Зубарев, О. Л. Пудовкин, Радиационная обстановка на борту космических аппаратов, Монография, Центральный издательско-полиграфический комбинат ракетных войск стратегического назначения, М., К-160, 2001, 316 с.

32. И. В. Гецелев, В. П. Охлопков, Е. А. Чучков, Активные долготы областей инжекции солнечных космических лучей, Известия РАН, серия физическая, 2003, т. 67, № 4, с. 486–488.
33. И. В. Гецелев, В. П. Охлопков, Е. А. Чучков, Протоны солнечных космических лучей на орбите Земли и их связь с источниками, Вестник МГУ, сер. 3, физика и астрономия, 2003, № 5, с. 54–58.
34. И. В. Гецелев, В. П. Охлопков, Е. А. Чучков, Протоны солнечных космических лучей в периоды инверсии полярного магнитного поля Солнца, Вестник МГУ, сер. 3: «Физика и астрономия», 2004, № 3, с. 25–29.
35. I. V. Getselev, S. I. Ryumin, N. Sobolevsky, M. Ufimtsev, M. V. Podzolko, R. S. Rashkovan, Absorbed Dose of Secondary Neutrons From Galactic Cosmic Rays Inside the International Space Station, Advances in Space Research, 2004, v. 6, p. 1429–1432.
36. М. В. Подзолко, И. В. Гецелев, Потоки протонов солнечных и галактических космических лучей по данным измерений IMP-8, Труды IX Пулковской международной конференции «Солнечная активность как фактор космической погоды», 4–9 июля 2005, Санкт-Петербург, с. 99–103.
37. И. В. Гецелев, Э. Н. Сосновец, А. С. Ковтюх, А. В. Дмитриев, М. В. Подзолко, Н. А. Власова, С. Я. Рейзман, Эмпирическая модель радиационного пояса ядер гелия, Космические исследования, 2005, т. 43, № 4, с. 243–247.
38. И. В. Гецелев, М. В. Подзолко, И. С. Веселовский, Оптимизация базы данных по потокам межпланетных энергичных протонов и её применение для моделирования радиационных условий, Астрономический Вестник, 2009, т. 43, № 2, с. 145–151.
39. М. В. Подзолко, И. В. Гецелев, Ю. И. Губарь, И. С. Веселовский, Радиационные условия миссии к Юпитеру и Европе, Астрономический Вестник, 2009, т. 43, № 2, с. 125–129.