

УДК 523.45

РАДИАЦИОННЫЕ УСЛОВИЯ МИССИИ К ЮПИТЕРУ И ЕВРОПЕ

© 2009 г. М. В. Подзолко*, И. В. Гецелев*, Ю. И. Губарь*, И. С. Веселовский**, **

*Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ, Москва

**Институт космических исследований РАН, Москва

Поступила в редакцию 22.04.2008 г.

Работа посвящена оценке радиационных условий в околопланетном пространстве Юпитера и плазменного окружения в межпланетном пространстве при выполнении космической миссии Юпитер–Европа. Проведены модельные расчеты, результаты которых могут быть использованы при планировании миссии.

PACS: 96.50.Vg

МИССИЯ ЮПИТЕР–ЕВРОПА

В настоящее время рассматривается несколько проектов отправки в 2015–2020 гг. исследовательских космических аппаратов (КА) к Юпитеру и его спутнику Европе, проводятся соответствующие рабочие совещания. В связи с этим в данной статье оцениваются ожидаемые радиационные условия на межпланетной трассе и околопланетных участках полета. Прогноз основан на экспериментальных данных предыдущих исследований и их экстраполяции с использованием разработанных ранее эмпирических и теоретических моделей.

Наибольшая радиационная опасность в ходе осуществления миссии Юпитер–Европа будет исходить от радиационных поясов Юпитера. Он обладает очень сильным магнитным полем. Дипольный момент Юпитера в 10^4 раз больше, чем дипольный момент Земли. Заряженные частицы захватываются этим магнитным полем и образуют мощные радиационные пояса. В частности, большую опасность для электронных компонентов КА за защитой будут представлять интенсивные потоки электронов и протонов высоких энергий.

МОДЕЛИ РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСОВ ЮПИТЕРА

По-видимому, первая модель радиационных поясов Юпитера, построенная по данным спутниковых измерений, была представлена в работе (Divine, 1974). Модель основана на данных КА Pioneer-10, пролетевшего в декабре 1973 г. вблизи Юпитера на минимальном расстоянии 2.8 радиусов Юпитера (R_J), по потокам электронов с энергиями от 0.06 до >35 МэВ и протонов с энергиями от 0.6 до >80 МэВ и параметрам дипольного приближения магнитного поля Юпитера. Годом позже появилась обновленная версия модели (Fillius и др., 1975), в которую были включены данные КА Pioneer-11, пролетевшего вблизи Юпитера в декабре 1974 г. по траектории с большим наклоном и,

как следствие, выполнившего измерения в более далеких от экваториальной плоскости Юпитера областях, по сравнению с Pioneer-10.

В 1983–1985 гг. были разработаны модели радиационных поясов Юпитера (Divine, Garrett, 1983; Гецелев и др., 1984; 1985), которые в дальнейшем использовались в большинстве случаев для оценки радиационных условий полета КА. В их основу положены измерения, выполненные на КА Pioneer-10, -11 и Voyager-1, -2, а также модель магнитного поля Юпитера O4 (Acuna, Ness, 1976), построенная по результатам измерений на КА Pioneer-11 и включающая сферические гармоники до 3-го порядка (15 гауссовых коэффициентов). Сравнение моделей, пример которого приводится в следующих разделах, показало, что обе модели дают сопоставимые результаты. В качестве иллюстрации радиационной опасности полетов КА в околопланетной области Юпитера на рис. 1 представлены экваториальные профили интегральных потоков электронов и протонов различных энергий, а на рис. 2 – экваториальные профили доз радиации за различной защитой. Из данных этих рисунков видно, что потоки электронов с $E > 2$ МэВ достигают значений $\approx 2 \times 10^8$ см $^{-2}$ с $^{-1}$; потоки протонов с $E > 10$ МэВ – значений $\approx 5 \times 10^7$ см $^{-2}$ с $^{-1}$; доза радиации за защитой 1 г/см 2 – значения $\approx 6 \times 10^5$ рад/сутки.

В 2005 г. была опубликована модель (Garrett и др., 2005), где, в частности, на основании данных измерений КА Cassini в околопланетном пространстве Юпитера в 2000 г. а также синхротронных измерений были скорректированы значения потоков электронов с энергиями 1–100 МэВ во внутреннем радиационном поясе Юпитера ($L < 4$). Поскольку во время миссии Юпитер–Европа КА не будут пролетать через эту область, для данной работы это обновление несущественно.

ДОЗЫ РАДИАЦИИ НА ОРБИТЕ ЕВРОПЫ

На рис. 3 приведены интегральные спектры электронов и протонов для орбиты Европы (ради-

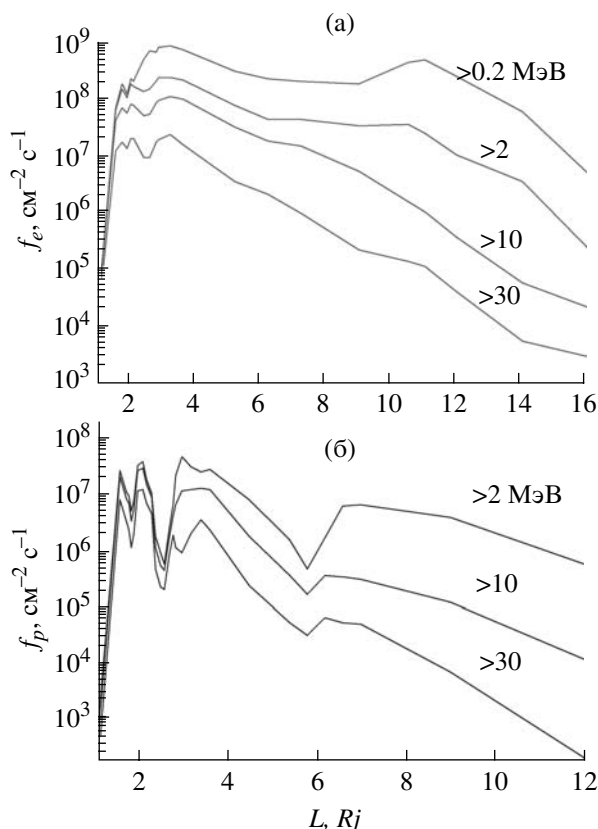


Рис. 1. Экваториальные профили интегральных потоков: (а) – электронов с энергиями >0.2 , >2 , >10 и >30 МэВ; (б) – протонов с $E > 2$, >10 и >30 МэВ в околопланетном пространстве Юпитера.

альное расстояние равно $9.5 R_J$), а на рис. 4 – рассчитанные по этим спектрам дозы радиации за различной защитой.

Треугольниками на рис. 4 показаны данные аналогичных расчетов (Renard и др., 2004). Имеется хорошее совпадение с нашим расчетом.

Как видно из рис. 4, уже за защитами 0.1 г/см^2 и выше вклад в дозу радиации дают практически только электроны высоких энергий. Это связано с тем, что орбита Европы лежит вблизи границы радиационного пояса высокоэнергичных протонов, что видно из рис. 1 и отражается на спектре протонов, рис. 3.

В работе (Paranicas и др., 2007) дан средний спектр электронов вблизи Европы с учетом ее экранирующего воздействия. Потоки электронов с учетом влияния Европы оказываются примерно в 3 раза ниже; эта разница уменьшается для энергий свыше нескольких десятков МэВ.

В табл. 1 для той же орбиты для некоторых значений толщины защиты даны значения суммарных доз радиации, рассчитанные по данным рис. 4 за 2 месяца – предполагаемое время миссии на орбите Европы.

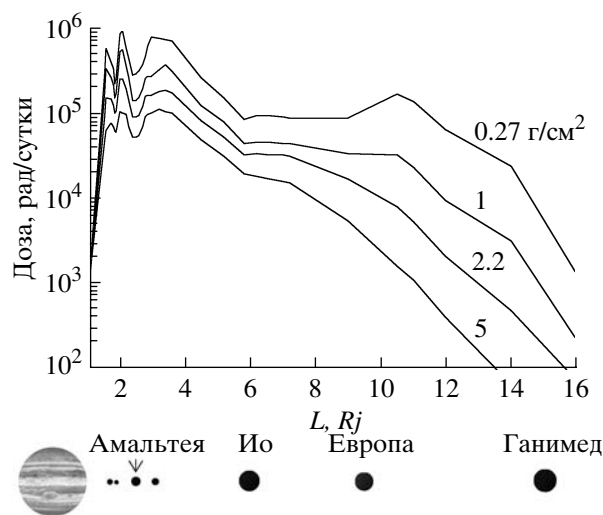


Рис. 2. Экваториальные профили доз радиации за защитами толщиной 0.27 , 1 , 2.2 и 5 г/см^2 Al в околопланетном пространстве Юпитера. Внизу показано расположение спутников Юпитера.

Из табл. 1 видно, что радиационная опасность для электронного оборудования во время миссии Юпитер–Европа весьма существенна.

ПРИМЕР РАСЧЕТА ДОЗ РАДИАЦИИ ЗА ВРЕМЯ ПРОЛЕТА ВБЛИЗИ ЮПИТЕРА

В табл. 2 даны дозы радиации за различными защитами, рассчитанные по модели (Гецелев и др., 1985) за время пролета КА Solar Probe вблизи Юпитера (Gubar и др., 1995) по гиперболической траектории со следующими параметрами:

перигеум	$9.12 R_J$
эксцентриситет	1.907
большая полуось	718286 км
аргумент перигеума	23.953°
наклонение	159.099°
долгота восходящего узла	160.317° .

В последнем столбце таблицы даны результаты расчетов для той же траектории, выполненные в Jet Propulsion Laboratory (JPL), NASA (Spitale, 1995) по модели (Divine, Garrett, 1983). Итоговые результаты получились весьма близкими. По этой причине авторами из NASA сделан вывод о достаточной надежности модели (Гецелев и др., 1985).

ДАнные СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В табл. 3 приведены сведения о спутниковых экспериментах по измерению магнитного поля и потоков заряженных частиц в околопланетном пространстве Юпитера и дозах радиации, получен-

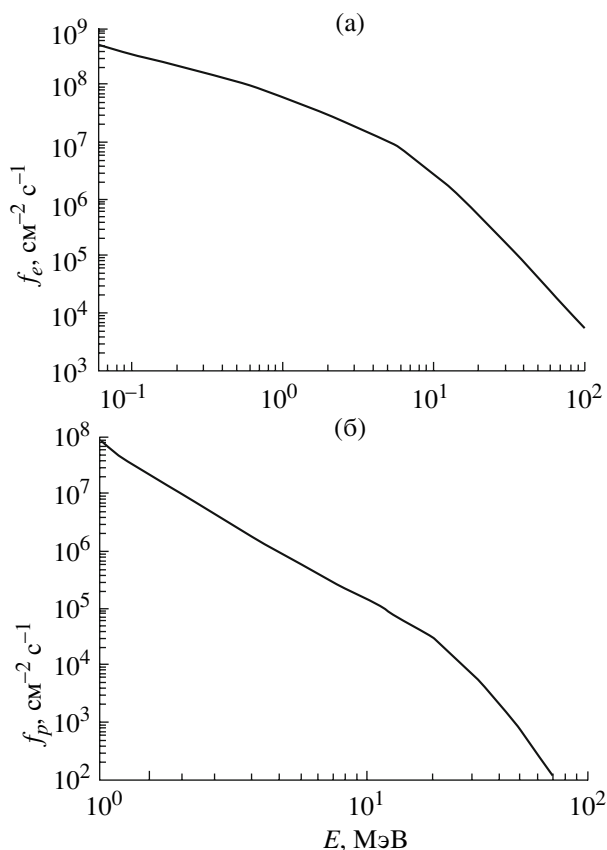


Рис. 3. Интегральный спектр: (а) – электронов и (б) – протонов на орбите Европы ($9.5 R_J$).

ных космическими аппаратами во время полета в радиационных поясах Юпитера.

Наиболее длительной из всех является миссия КА Galileo, 1995–2003 гг., орбита которого в околопланетном пространстве Юпитера состояла из 35 высокоэллиптических витков, вблизи перигея которых аппарат исследовал галилеевы луны Юпитера. Выполненный в расчете на дозу в 1.5×10^5 рад за защитой 2.2 г/см^2 , КА получил дозу $> 6.5 \times 10^5$ рад. Аппарат оставался “замечательно работоспособным” и передавал научные данные вплоть до конца миссии (запланированное падение на Юпитер), несмотря на то, что получил радиационные повреждения части электронных устройств

Таблица 1. Дозы радиации за 2 месяца на орбите Европы за различными защитами

Толщина защиты, г/см^2	Доза радиации, рад	Толщина защиты, г/см^2	Доза радиации, рад
0.00	8.5×10^8	1.0	2.2×10^6
0.01	1.0×10^8	2.2	8.8×10^5
0.10	1.5×10^7	5.0	2.4×10^5
0.27	7.4×10^6	10.0	4.5×10^4

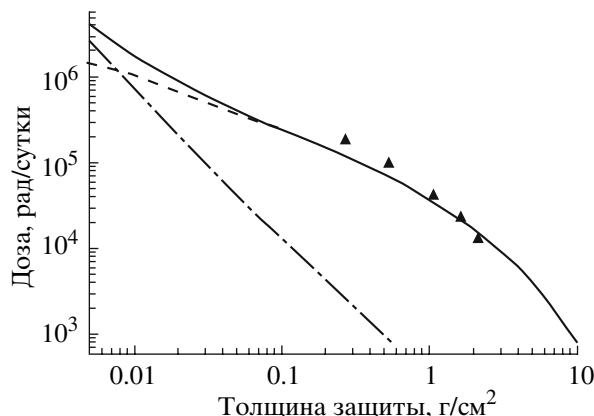


Рис. 4. Дозы радиации за различными защитами от электронов (пунктирная линия), протонов (пунктирно-точечная линия) и суммарная (сплошная линия), рассчитанные для потоков на рис. 3; также треугольниками показан расчет (Renard и др., 2004).

(Bindschadler и др., 2003). Типичное значение перигея на разных витках $r_p \approx 6\text{--}11 R_J$. Суммарное время нахождения КА на радиальных расстояниях такого порядка составило приблизительно 2 месяца, таким образом величина дозы в 6.5×10^5 рад за защитой 2.2 г/см^2 примерно согласуется с расчетами, см. табл. 1.

ПОТОКИ МЕЖПЛАНЕТНЫХ ПРОТОНОВ ВО ВРЕМЯ МИССИИ

Предполагается, что полет КА до Юпитера продлится примерно 5 лет и в основном будет проходить в период низкой солнечной активности. На рис. 5 дана оценка 5-летнего спектра протонов космических лучей в диапазоне энергий 1–100 МэВ для указанных выше условий, сделанная при помощи разработанной нами модели (Подзолко, Гецевлев, 2005).

Верхнюю и нижнюю кривые на графике можно считать соответственно “пессимистичной” и “оптимистичной” оценками сверху спектра протонов. Ожидаемая доза радиации на межпланетном участке траектории не должна превышать 10% от той, которая будет получена в околопланетном пространстве Юпитера (для Galileo доза на участке полета до Юпитера составила 5×10^4 рад за защитой 2.2 г/см^2).

МЕЖПЛАНЕТНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР

В настоящее время большинство измерений параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля осуществляется на орбите Земли. Основными параметрами являются плотность протонов солнечного ветра n и его скорость V , температура T , величина магнитного поля $|\mathbf{B}|$ и его компоненты.

Таблица 2. Дозы радиации за время пролета КА Solar Probe вблизи Юпитера

Частицы	Толщина защиты, г/см ²	Доза, рад	
		Наш расчет	JPL, NASA
Электроны	0.01	9.1×10^5	7.6×10^5
Протоны	0.01	1.7×10^5	4.1×10^5
Сумма	0.01	1.1×10^6	1.2×10^6
Электроны	1.0	1.5×10^4	1.6×10^4
Протоны	1.0	2.3×10^1	1.3×10^2
Сумма	1.0	1.5×10^4	1.6×10^4

Пересчет с орбиты Земли в точку на гелиоцентрическом расстоянии R для плотности и радиальной компоненты межпланетного магнитного поля осуществляется согласно закону R^{-2} , а для остальных параметров – как R^{-1} . Скорость и температуру можно считать постоянными при оценочных расчетах с точностью до десятка процентов на всем пути от $R = 1$ а. е. (орбита Земли) до орбиты Юпитера (5.2 а. е.).

Средние параметры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля в данной точке гелиосферы зависят от фазы солнечного цикла в пределах первых десятков процентов (Veselovsky и др., 1998a). Достаточно точные прогнозы в настоящее время невозможны. Так или иначе, но во время миссии будут присутствовать высокоскоростные потоки из корональных дыр, как это было во всех

предыдущих солнечных циклах. С этими потоками в солнечном ветре сильно коррелируют интенсивности релятивистских электронов, оказывающих влияние на радиационную обстановку в открытом космосе.

Корональные выбросы и межпланетные ударные волны распространяются в гелиосфере с некоторым ослаблением и замедлением при радиальном удалении от Солнца. Это замедление происходит тем быстрее, чем сильнее исходное возмущение. Тем не менее для оценочных расчетов на расстояния до орбиты Юпитера с точностью до первых десятков процентов можно пользоваться графиком на рис. 6, построенным в предположении о постоянстве скорости распространения возмущения.

Практически, на орбите Земли время прихода ударной волны может быть как менее суток, так и более недели, для орбиты Юпитера – примерно от недели до месяца. Эти сведения полезно иметь в виду для быстрых качественных оценок гелиосферной ситуации на трассе полета. Для количественных расчетов при надобности следует использовать МГД-моделирование в отдельных конкретных случаях (Veselovsky и др., 1998б).

ЗАДАЧА КОНТРОЛЯ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ ВО ВРЕМЯ МИССИИ

Для контроля радиационной обстановки на борту КА в ходе миссии необходимо осуществлять измерения, результаты которых могут служить исходными данными для оценки доз радиации за раз-

Таблица 3. Спутниковые эксперименты в околопланетном пространстве Юпитера

КА	Время	Орбита	Измерения	Дозы
Pioneer-10	Дек. 1973	Пролет в 130 тыс. км от Юпитера ($2.8 R_J$)	Магнитное поле, электроны 0.06...>35 МэВ, протоны 0.6...>80 МэВ	5.0×10^5 рад электроны, 1.0×10^6 рад протоны на поверхности; 4.4×10^5 рад за 3 мм Al 1.3×10^5 рад электроны, 3.0×10^5 рад протоны на поверхности; 1.2×10^5 рад за 3 мм Al $\approx 5 \times 10^5$ рад
Pioneer-11	Дек. 1974	Пролет в 43 тыс. км ($1.6 R_J$), высокое наклонение $i = 51.8^\circ$		
Voyager-1	Март 1979	Пролет в 207 тыс. км ($4 R_J$)	Магнитное поле, низкоэнергичные частицы, электроны 3–110 МэВ, ионы 1–500 МэВ/нукл	
Voyager-2	Июль 1979	Пролет в 570 тыс. км ($9 R_J$)		
Ulysses	Февр. 1992	Пролет в 378 тыс. км ($6.3 R_J$), $i = 80.2^\circ$	Магнитное поле, энергичные частицы	Расчет: 6×10^4 рад (за защитой?)
Galileo	1995–2003	35 высокоэллиптических участков орбиты, в среднем перицентр $r_p \approx 6–11 R_J$	Магнитное поле, электроны 0.01...>11 МэВ, ионы 0.01–200 МэВ/нукл	Расчитан на 150 крад за 2.2 г/см ² , получил >650 крад, работал до конца, несмотря на повреждения ряда электронных систем
Cassini	Ноябрь 2000	Пролет в 10 млн. км ($140 R_J$)	Магнитное поле одновременно с Galileo, электроны высоких энергий (радиоспектрометр)	

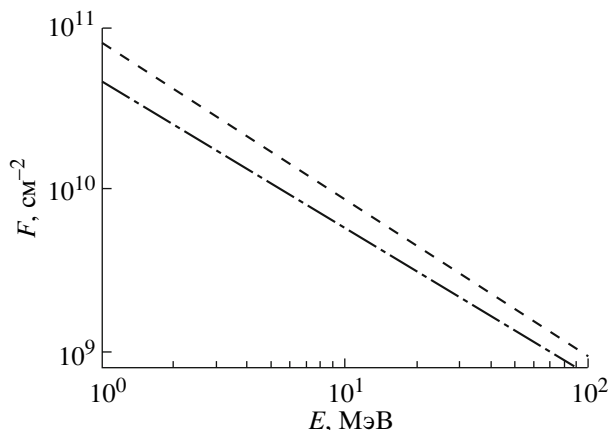


Рис. 5. Оценка 5-летнего спектра межпланетных протонов во время миссии.

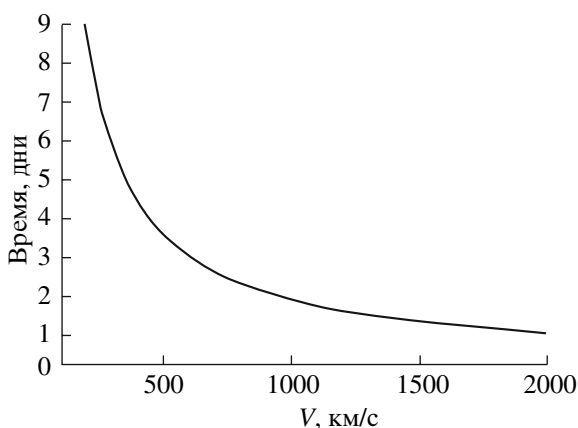


Рис. 6. Зависимость времени пробега корональной массы и межпланетной ударной волны от Солнца до орбиты Земли от скорости их движения.

личной защитой. Мы полагаем, что для этой задачи в качестве измеряемого параметра целесообразно использовать линейную передачу энергии (ЛПЭ). Спектр ЛПЭ является входной информацией для расчета доз радиации, а также эффектов от ее воздействия, например, частоты одиночных сбоев и др. Кроме того, соответствующий измерительный прибор, т.е. спектрометр ЛПЭ, является достаточно простым и компактным (масса ≤ 500 г), что важно в силу жестких ограничений по общей массе КА для миссии Юпитер–Европа.

Данные таких измерений могут также быть использованы для решения научной задачи: построения модели распределения спектров ЛПЭ и доз радиации в околопланетном пространстве Юпитера. Возможна в принципе и постановка “обратной” задачи: определение или верификация спектра заряженных частиц в данной точке пространства по измеренному в ней спектру ЛПЭ.

ВЫВОДЫ

Космическая исследовательская миссия к Юпитеру и его спутнику Европе сопряжена со значительной радиационной опасностью. Выполнены расчеты и оценки радиационных условий в околопланетной области Юпитера и на межпланетной трассе полета, которые могут быть использованы при планировании миссии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гецелев И.В., Губарь Ю.И., Тимофеев Г.А. и др. Радиационные условия полета космических кораблей в околопланетной области Юпитера // Деп. ВИНТИ. 1984. № 4636-84. 18 с.
- Гецелев И.В., Губарь Ю.И., Гетлинг А.В. и др. Модель радиационной обстановки искусственных спутников Юпитера // Деп. ВИНТИ. 1985. № 8970В. 22 с.
- Подзолко М.В., Гецелев И.В. Потоки протонов солнечных и галактических космических лучей по данным измерений IMP-8 // Тр. IX Пулковской междунар. конф. “Солнечная активность как фактор космической погоды”, СПб, 2005. С. 99–103.
- Acuna M.H., Ness N.F. The main magnetic field of Jupiter // J. Geophys. Res. 1976. V. 81. P. 2917–2922.
- Bindschadler D.L., Theilig E.E., Schimmels K.A., Vandermeij N. Project Galileo: Final Mission Status // JPL, NASA, 54th Int. Astronautical Congress, Bremen, Germany. 2003. 13 p.
- Divine N. Jupiter radiation belt models // Technical Memorandum 33–715. JPL. NASA. 1974. 13 p.
- Divine N., Garrett H.B. Charged particle distributions in Jupiter’s magnetosphere // J. Geophys. Res. 1983. V. 88. № 9. P. 6889–6903.
- Fillius R.W., McIlwain C.E., Mogro-Campero A. Radiation belts of Jupiter: A second look // Science. 1975. V. 188. P. 465–467.
- Garrett H.B., Levin S.M., Bolton S.J. A revised model of Jupiter’s inner electron belts: Updating the divine radiation model // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. L04104. 5 p.
- Gubar Yu.I., Mozzhukhina A.R., Veselovsky I.S. The expected radiation doses for the flight of S/C “Solar Probe” through the Jovian magnetosphere // Proc. 1st US-Russian Sci. Workshop on FIRE Environment, SRI. Moscow. 1995. P. 213–215.
- Paranicas C., Mauk B.H., Khurana K., et al. Europa’s near-surface radiation environment // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. L15103. 5 p.
- Renard P., Koeck C., Kemble S., et al. System concepts and enabling technologies for an ESA low-cost mission to Jupiter/Europa // Proc. 4th Symp. “Small Satellites Systems and Services”. 2004. CD-ROM. P. 9.1.
- Spitale G. JPL Interoffice Memorandum 5052-95-287/1995.
- Veselovsky I.S., Dmitriev A.V., Panassenko O.A., Suworova A.V. Plasma and magnetic field parameters in the heliosphere at the Earth’s orbit // Препр. НИИЯФ МГУ 98–18/519. 1998a. 17 с.
- Veselovsky I.S., Dmitriev A.V., Panassenko O.A., Suworova A.V. Statistical and spectral properties of the heliospheric plasma and magnetic field at the Earth’s orbit // Препр. НИИЯФ МГУ 98–25/526. 1998b. 42 с.