

## МАГНИТНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ В ИЗМИРАН

*В. Г. Петров, В. А. Стяжкин*

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН)

Проведён обзор основных экспериментов по измерению магнитного поля в космическом пространстве выполненных после 1990 г. и подготавливаемых в настоящее время. Кратко приведены основные полученные результаты.

*Ключевые слова:* магнитное поле, измерения, магнитосфера.

Период 1960–1980 гг. был временем активного развития исследований магнитных полей Земли и планет с помощью искусственных спутников.

В последующие десятилетия интенсивность таких исследований уменьшилась, но, тем не менее, было подготовлено и частично проведено несколько очень интересных экспериментов.

### 1. МАГНИТНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ В ПРОЕКТЕ МАРС-94/96

Подготовка проекта МАРС-94 началась в 1989 г. Исследование Марса предполагалось проводить комплексом средств. В этот комплекс входили: орбитальный аппарат, аэростат, пенетраторы, малые станции и марсоход. Для выполнения научных задач проекта был создан международный консорциум по магнитным измерениям в проекте МАРС-94/96 (СССР, ГДР, Австрии, Франции и Болгарии).

Программа магнитных измерений была направлена на получение новых, дополнительных экспериментальных данных и решению проблем строения планеты Марс, и, в рамках сравнительной планетологии, к решению проблем механизма генерации магнитных полей планет.

Новые экспериментальные данные должны были дать представление о двух главных характеристиках магнитного поля Марса — об энергетическом спектре магнитного поля Марса на малых высотах и о характере изменений магнитного поля на поверхности планеты во времени. Также предполагалось исследование межпланетного магнитного поля по трассе перелёта к Марсу. Важной задачей представляется получение информации о глобальной структуре межпланетного магнитного поля (в частности наличие секторной структуры).

Для проведения наблюдений на орбитальном аппарате был подготовлен комплекс МАРЕМФ (Mars Electron and Magnetic Field, MAREMF) из двух магнитометров: MAG-IS и MAG-OS. Магнитометр MAG-IS разработан совместно с Институтом Макса Планка Германии, а магнитометр MAG-OS — с Институтом космических исследований Австрии.

---

**Петров** Валерий Григорьевич — заместитель директора, кандидат физико-математических наук, vpetrov@izmiran.ru

**Стяжкин** Валерий Александрович — заведующий лабораторией, кандидат физико-математических наук, sva@izmiran.ru

Магнитометр ИМАП-7 для установки на пенетратор был разработан в Болгарии при участии Лаборатории магнитных космических исследований ИЗМИРАН.

Он состоял из двух блоков: блока датчиков, содержащего три феррозонда, и электронного блока. К большому сожалению, пуск космического аппарата (КА) «Марс-96» был неудачным, и реализовать этот проект не удалось. Однако сама схема эксперимента, его научная программа и опыт, полученный при подготовке этого проекта, несомненно, будет использован в будущем при возобновлении активных исследований Марса.

## 2. МАГНИТНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ В ПРОЕКТЕ ИНТЕРБОЛ

С 1995 по 2000 г. ИЗМИРАН участвовал в международном проекте ИНТЕРБОЛ (головной организацией проекта был Институт космических исследований Российской академии наук, [www.iki.rssi.ru/interball/ru/results.html](http://www.iki.rssi.ru/interball/ru/results.html)). Этот проект был посвящён комплексному исследованию процессов передачи энергии солнечного ветра магнитосфере Земли в её критических областях. Проект был выполнен с помощью двух спутников — «Интербол-1» (хвостовой зонд) и «Интербол-2» (авроральный зонд) с субспутниками, размещёнными на разных орбитах в хвостовой и авроральной областях магнитосферы Земли [Nozdrachev et al., 1995; Zhuzgov et al., 1995].

На хвостовом зонде измерения магнитного поля проводились с помощью магнитометра ФМ-3И, который был разработан и изготовлен в Центре физического приборостроения Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (ЦФП ИОФРАН) по техническому заданию ИЗМИРАН. Прибор измерял магнитное поле в диапазоне  $\pm 200$  нТл с разрешением 0,1 нТл, в частотном диапазоне 0...8 Гц, при скорости опроса 16 Гц. После первичной обработки все измерения магнитного поля на хвостовом зонде были объединены в один массив, обработаны по единой программе и размещены на веб-сайте ИЗМИРАН и сайте NSSDC (National Space Science Data Center) для общего использования через сеть Интернет. Хвостовой зонд работал с августа 1995 г. до середины октября 2000 г.

На авроральном зонде магнитные измерения выполнялись магнитометром ИМАП-3. Этот прибор был разработан и изготовлен совместно российскими и болгарскими специалистами. Блок датчиков был изготовлен в ЦФП ИОФРАН по заказу ИЗМИРАН, а блок электроники в Лаборатории специализированных датчиковых систем Болгарской академии наук. Магнитометр измерял три компоненты магнитного поля в диапазоне  $\pm 7000$  нТл с разрешением 1 нТл и в диапазоне  $\pm 70\,000$  нТл с разрешением 10 нТл, в частотном диапазоне 0...2,5 Гц, со скоростью опроса один вектор в три секунды. Весь набор измерений размещён на CD-дисках и находится в лаборатории магнитных космических исследований (МКИ) ИЗМИРАН. Авроральный зонд проработал с августа 1996 по октябрь 1999 г. [Ноздрачев и др., 1998].

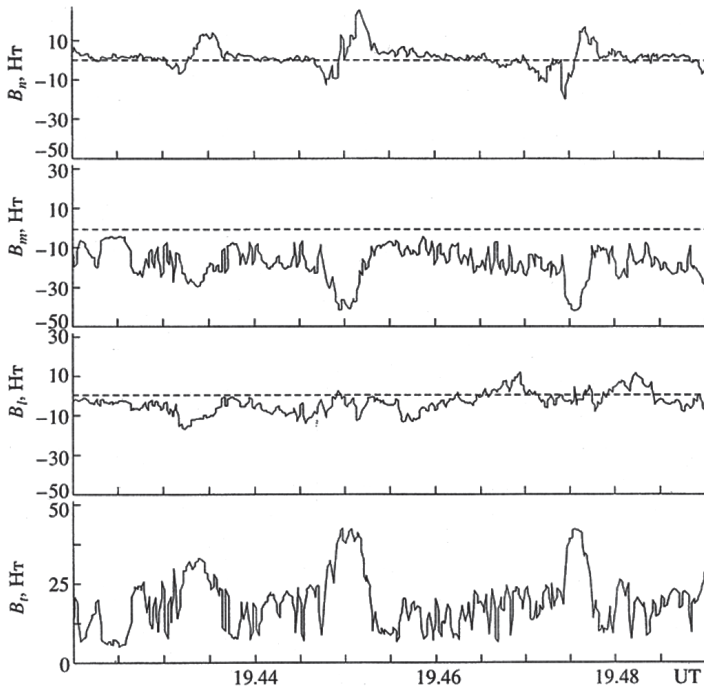


Рис. 1. Вариации магнитного поля в магнитослое, измеренные КА «Интербол-1» 18.10.1995 г.

На основе магнитных данных в комплексе с плазменными измерениями была исследована тонкая структура внешних границ и слоёв магнитосферы: отошедшая ударная волна, магнитопауза, магнитослой, пограничный слой. Исследовались так называемые FTE (flux transfer event), связанные с процессами импульсного пересоединения магнитных полей магнитослоя и магнитосферы. Исследовались продольные токи в авроральных областях магнитосферы [Lutsenko et al., 2002].

Сравнительный анализ флуктуаций магнитного поля в магнитослое и в солнечном ветре, измеренных КА Wind, показал, что крупномасштабная корреляция между вариациями магнитного поля в солнечном ветре и магнитослое выше, чем мелкомасштабная, и, что корреляция для поперечных компонент больше, чем для радиальной и модуля [Стяжкин и др., 1999].

Проведён комплексный анализ необычной последовательности разрывов на магнитопаузе по магнитным и плазменным данным на КА и магнитным данным наземных станций. Такой анализ позволил объяснить эту последовательность разрывов процессами пересоединения секторной границы межпланетного магнитного поля (ММП) с магнитным полем на магнитопаузе.

По измерениям магнитного поля, выполненным во внешней магнитосфере на КА «Интербол-1» за период с 1995 по 1999 г. идентифицировано более 800 FTE и исследовано их пространственное распределение в магнитосфере. На рис. 1 приведён пример FTE, зарегистрированных магнитометром на КА «Интербол-1» в магнитослое.

Было найдено, что средняя амплитуда FTE составляет 10...20 нТл и уменьшается с увеличением расстояния от подсолнечной точки. Были исследованы условия генерации FTE, наблюдаемых на экваториальных и высоких широтах и в каспе. Получилось, что FTE на экваториальной магнитопаузе показывают сильную тенденцию в их появлении для антипараллельных магнитных полей Земли и магнитослоя, в то время как на высокоширотной магнитопаузе они наблюдаются как для параллельных так и антипараллельных полей. Эти результаты находят своё объяснение в рамках предположения о наличии двух источников генерации высокоширотных FTE: 1) локальное пересоединение в высоких широтах, когда магнитные поля Земли и магнитослоя антипараллельны, и 2) пересоединение на экваториальной магнитопаузе, когда локальные магнитные поля Земли и магнитослоя параллельны. В последнем случае FTE будут перенесены потоком плазмы в магнитослой с экватора в область высокоширотной магнитопаузы. Статистическое исследование направления движения FTE подтверждает это предположение.

На основе большого экспериментального материала (около 1000 событий) было проведено тестирование теоретических предсказаний двух основных моделей пересоединения: «компонентной» и антипараллельной.

Было получено, что продолжительность FTE не зависит от точки наблюдения. Амплитуда FTE уменьшается при увеличении радиуса наблюдения от подсолнечной точки, и это происходит в основном из-за большого количества FTE с малыми амплитудами, отмечаемыми на флангах. Распределение «прямых» и «обратных» FTE и наклон линии пересоединения для утреннего или вечернего направления межпланетного магнитного поля находится в согласии с теоретическими предсказаниями «компонентной» модели пересоединения вблизи подсолнечной точки. Все FTE события, наблюдаемые в дневной области магнитослоя, показывают сильную тенденцию появляться во время южного направления магнитного поля в магнитослой, что свидетельствует о нахождении их источника в экваториальной плоскости во время компонентного или антипараллельного пересоединения магнитных полей. FTE, наблюдаемые на флангах магнитопаузы, отмечаются как при южном, так и при северном направлении межпланетного магнитного поля, и, следовательно, их источник находится на экваториальных широтах во время компонентного или антипараллельного пересоединения полей или в высоких широтах во время антипараллельного пересоединения. Магнитосферные FTE показывают прямую полярность в высоких широтах в южном полушарии и обратную полярность в высоких широтах в северном полушарии, что находится в согласии с распространением FTE в антисолнечном направлении вдоль хвостовой части магнитопаузы. Распределение FTE, наблюдаемых в магнитослой, в зависимости от направления азимутальной компоненты ММП, находится в согласии с теоретическими предсказаниями «компонентной» модели. Отчётливая антикорреляция между полярностью возмущений  $V_m$ -компонент FTE, наблюдаемых в магнитосфере и магнитослой, находит своё объяснение в рамках модели пересоединения вдоль наклонной линии, проходящей через подсолнечную точку [Korotova et al., 2008; Sibeck et al., 2005].

Проведён анализ вариаций магнитного поля при пересечении продольных токов во время суббури в ноябре 1996 г. Показано, что измерения на спутнике хорошо согласуются с магнитными измерениями на поверхности Земли и моделью продольных токов Ииджимы и Потемры [Nozdrachev et al., 1999].

На рис. 2 приведён результат уникального эксперимента, когда во время работы норвежского нагревного стенда EISCAT проводились одновременные наблюдения электронов, электрического и магнитного полей на авроральном зонде. Во время проведения эксперимента спутник «Интербол-2» находился вблизи полуночного меридиана на высоте ~8000 км, т. е. много выше ионосферы.

Сразу после включения наземного генератора радиоволн (приблизительно в 21:30 UT) спутник «Интербол-2» зарегистрировал вариации магнитного поля и всплески потока электронов с энергиями 0,1...6 кэВ в первоначально практически пустых магнитных силовых трубках. Одновременно наблюдалась конусообразная электромагнитная эмиссия, которой обычно сопровождается восходящий поток электронов. Такие наблюдения свидетельствуют о появлении продольного электрического тока, втекающего в ионосферу и связывающего область нагрева в ионосфере с некоторой областью в магнитосферном хвосте. Данный эксперимент позволил впервые непосредственно наблюдать искусственное индуцирование продольного электрического тока, аналогичного появляющемуся во время магнитных суббурь [Зеленый и др., 1988].

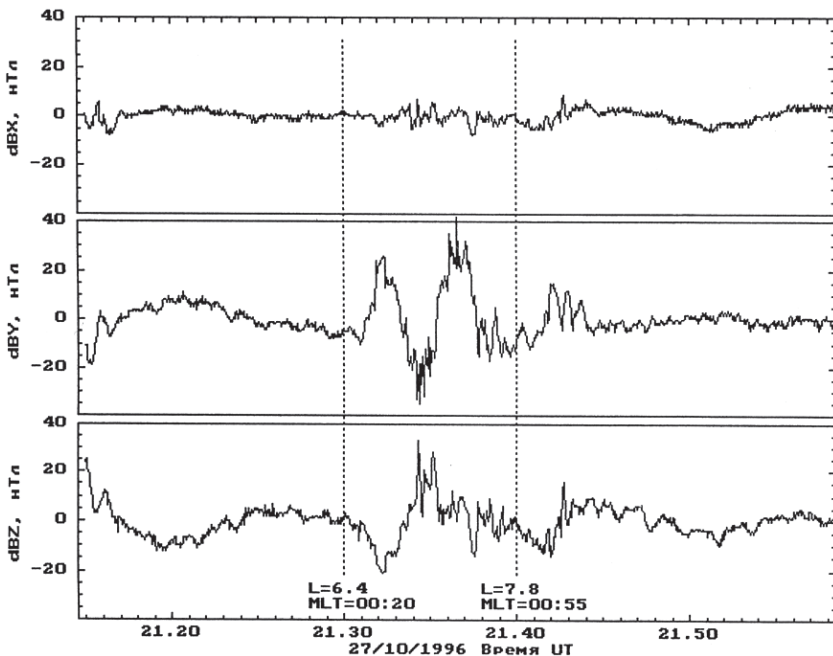


Рис. 2. Вариации разностей между измеренными и рассчитанными по модели компонент магнитного поля, полученными на «Интерболе-2» во время работы нагревного стенда

### 3. ПОДГОТОВКА МАГНИТНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА В ПРОЕКТЕ РЕЗОНАНС

С 2005 г. ИЗМИРАН участвует в подготовке магнитного эксперимента в проекте РЕЗОНАНС, направленного на дальнейшее исследование магнитосферы Земли.

Магнитные измерения будут проводиться одновременно на четырёх космических аппаратах, разнесённых определённым образом на орбитах вокруг Земли. Магнитометр разрабатывается совместно ИЗМИРАН и ЦФП ИОФРАН [Стяжкин и др., 2012].

Исходя из основных научных задач проекта РЕЗОНАНС, направленных на исследование физических процессов взаимодействия между магнитосферой и ионосферой, научными задачами магнитного эксперимента совместно с плазменным, электромагнитным и экспериментом по исследованию частиц различных энергий являются:

- исследования важнейших процессов обмена частицами и энергией между слоями ионосферы и магнитосферы в окрестности одной специально выбранной магнитной силовой линии;
- исследования эффектов геомагнитных бурь и динамики внешней плазмосферы;
- исследования движения энергичных частиц из областей аврорального ускорения и областей магнитного пересоединения;
- исследование динамики магнитосферных мазеров.

Для решения этих задач разрабатывается трёхкомпонентный феррозондовый магнитометр ФМ-7Р на полное земное магнитное поле. Его разработка основана на опыте магнитных экспериментов предыдущих космических проектов, в том числе и магнитометров ФМ-3И и ИМАП-3 для проекта ИНТЕРБОЛ.

Феррозондовый магнитометр ФМ-7Р для проекта РЕЗОНАНС предназначен для измерений магнитного поля в частотном диапазоне 0...16 Гц. Он состоит из двух частей — блока датчиков (БД) и блока электроники (БЭ).

Общий вид магнитометра ФМ-7Р приведён на рис. 3.



Рис. 3. Технологический образец прибора ФМ-7Р

*Основные параметры прибора ФМ-7Р*

Диапазон измерений магнитной индукции . . . . .	$\pm 60$ мкТл
Основная погрешность измерений, . . . . .	0,03 %
Погрешность дискретизации . . . . .	0,1 нТл
Скорость измерений. . . . .	32 вект/с
Потребляемая мощность, не более . . . . .	4 Вт
Размеры / масса	
• блок датчиков . . . . .	65×65×100 мм / 500 г
• блок электроники . . . . .	75×155×225 мм / 2500 г

#### 4. ПОДГОТОВКА МАГНИТНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА В ПРОЕКТЕ ИНТЕРГЕЛИОЗОНД

Магнитометр «Гелиомаг» разрабатывается ИЗМИРАН в кооперации с Институтом геофизики и внеземной физики Технического университета в Брауншвейге, Германия (IGEP TBU), Институтом космических исследований Австрии (IWF) и Центром физического приборостроения ИОФРАН. Измерения магнитного поля в комплексе с измерениями плазмы, энергичных частиц и волн в проекте ИНТЕРГЕЛИОЗОНД на близких расстояниях от Солнца проводятся с целью исследования:

- гелиосферного магнитного поля и его возмущений;
- природы и динамики наиболее мощных проявлений солнечной активности — солнечных вспышек и выбросов (ударные волны, магнитные облака) и их влияния на гелиосферу и космическую погоду;
- механизма нагрева солнечной короны и ускорения солнечного ветра;
- магнитных полей в приполярных областях.

При прямых измерениях чувствительный элемент-датчик измеряет суммарное окружающее его магнитное поле, т.е. измеряемое поле межпланетной среды и магнитное поле космического аппарата. Для того чтобы минимизировать влияние магнитного поля КА и собственной электроники на датчик, чувствительный элемент-датчик необходимо удалить на максимально возможное расстояние от корпуса КА с помощью выносной штанги. Поэтому конструктивно в магнитометре чувствительный элемент-датчик должен быть отделён от собственной электроники.

Для прецизионных измерений, чтобы наиболее точно оценить влияние магнитного поля КА на выносной штанге, как правило, устанавливаются два датчика. Один — на конце выносной штанги, другой — на расстоянии ~1 м от первого.

Таким образом, магнитометр должен состоять из двух идентичных датчиков и электронного блока.

Для этого проекта наиболее приемлемыми становятся трёхкомпонентные феррозондовые магнитометры. Их достоинства: возможность получить высокоточные измерения при малых весах, размерах и энергопотреблении. Следует отметить и их достаточно высокую надёжность. Начиная с первого магнитного эксперимента, выполненного на третьем ИСЗ в 1958 г., и по

настоящее время, феррозондовые магнитометры используются во всех космических экспериментах, где нужны векторные измерения.

*Основные технические характеристики  
магнитометра «Гелиомаг»*

Диапазон измерения . . . . .	$\pm 1000$ нТл
Разрешение . . . . .	2 рТл
Уровень шума . . . . .	10 рТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$
Чувствительность . . . . .	0,1 нТл
Стабильность . . . . .	$<1$ нТл/год; $<3$ нТл/100 °С
Энергопотребление . . . . .	5 Вт
Скорость опроса . . . . .	128 изм/с
Масса прибора (полная) без кабеля . . . . .	~2090 г

Оба датчика устанавливаются на выносной штанге в тени общего теплового экрана, на максимально возможном удалении от корпуса космического аппарата, датчик Д1 на конце штанги, датчик Д2 на расстоянии ~1 м от Д1.

В отличие от уже ставших традиционными магнитометров для исследования планет и их окрестностей, при разработке приборов для КА «Интергелиозонд» очень важно учитывать достаточно тяжёлые условия эксплуатации КА в ближайшей окрестности Солнца. Конструктивно магнитометр «Гелиомаг» разрабатывается с учётом того, что КА «Интергелиозонд» на расстоянии ~60 солнечных радиусов будет подвергаться интенсивному облучению и нагреву от Солнца до ~ +400°С. Наибольшему воздействию будут подвергаться датчики, размещённые на выносной штанге.

Для того чтобы минимизировать теплообмен между датчиком и его окружением, нужно минимизировать три канала теплопередачи: — от датчика к экрану; — от датчика на штангу через посадочное место; через электрические провода, идущие от датчика по штанге к электронному блоку. Для обеспечения теплового режима электронного блока он размещается на термостабилизированной платформе под общим экраном.

К настоящему времени уже изготовлен натурно-габаритно-весовой макет магнитометра «Гелиомаг», состоящий из блока электроники, двух датчиков и двух термозащитных экранов.

Работа по подготовке магнитного эксперимента в проекте ИНТЕРГЕЛИОЗОНД продолжается.

## ЛИТЕРАТУРА

- [Зеленый и др., 1988] Зеленый Л. М., Петрукович А. А., Луценко В. Н., Могилевский М. М., Григоренко Е. Е. Основные научные результаты проекта ИНТЕРБОЛ. М.: ИКИ РАН, 1998. URL: [www.iki.rssi.ru/interball/ru/results.html](http://www.iki.rssi.ru/interball/ru/results.html).
- [Ноздрачев и др., 1998] Ноздрачев М. Н., Скальский А. А., Стяжкин В. А., Петров В. Г. Некоторые результаты измерений магнитного поля на спутнике Интербол-1 феррозондовым прибором ФМ-3И // Космич. исслед. 1998. Т. 36. № 3. С. 268–272.



- [Стяжкин и др., 1998] *Стяжкин В. А., Петров В. Г., Эйсмонт Н. А., Бочев А.* Магнитные измерения в проекте ИНТЕРБОЛ-Авроральный зонд // Космич. исслед. 1998. Т. 36. № 1. С. 108–112.
- [Стяжкин и др., 1999] *Стяжкин В. А., Застенкер Г. Н., Петров В. Г., Ноздрачев М. Н., Лазарус А. J., Леппинг Р.* Большие и быстрые изменения параметров в магнитослое: 2. Вариации магнитного поля и сравнение их с вариациями потока ионов // Космич. исслед. 1999. Т. 37. № 6. С. 616–624.
- [Стяжкин и др., 2012] *Стяжкин В. А., Аустер Г. У., Магнец В.* Магнитный эксперимент ГЕЛИОМАГ в проекте ИНТЕРГЕЛИОЗОНД // Проект ИНТЕРГЕЛИОЗОНД: Тр. рабочего совещание по проекту Интергелиозонд, 2011. 11–13 мая, Таруса. 2012. С. 169–177.
- [Korotova et al., 2008] *Korotova G. I., Sibeck D. G., Rosenberg T., Petrov V., Styazhkin V.* Interball observations of multiple flux transfer events // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2008. V. 70. P. 391–398.
- [Lutsenko et al., 2002] *Lutsenko V. N., Grechko T. V., Kobelev A. V., Styazhkin V. A., Kudela K.* Wavy energetic ion dispersion events and PC-5 type magnetic field pulsations in the auroral zones // Adv. Space. Res. 2002. V. 30. P. 1783–1786.
- [Nozdrachev et al., 1995] *Nozdrachev M. N., Styazhkin V. A., Zarutsky A. A., Klimov S. I., Savin S. P., Skalsky A. A., Petrukovich A. A., Lissakov Yu. V., Arshinkov I. S., Abadgiev N., Bochev A.* Magnetic field measurements onboard the INTERBALL/ TAIL spacecraft: FM-3I instrument // INTERBALL. Mission and Payload. RKA- IKI-CNES, 1995. 228–229 p.
- [Nozdrachev et al., 1999] *Nozdrachev M. N., Styazhkin V. A., Zarutsky A. A., Klimov S. I., Savin S. P., Skalsky A. A., Petrov V., Styazhkin V., Eismont N.* Observations of field-aligned currents from Interball-2 // Czechoslovak J. Physics. 1999. V. 49. No. 4. P. 641–648.
- [Petrukovich et al., 2002] *Petrukovich A. A., Rybjeva N. E., Petrov V. G., Lissakov Yu. V., Arshinkov I. S., Abadgiev N., Popielawska B., Sandal I., Styazhkin V. A., Stenuit H., Zakharov A. V.* Magnetopause poleward of the cusp: Comparison of plasma and magnetic signature of the boundary for southward and northward directed interplanetary magnetic field // Adv. Space Res. 2002. V. 30. No. 12. P. 2799–2808.
- [Sibeck et al., 2005] *Sibeck D. G., Korotova G. I., Petrov V., Styazhkin V., Rosenberg T. J.* Flux transfer events on the high-latitude magnetopause: Interball-1 observations // Annales Geophysicae. 2005. V. 23. P. 1–11.
- [Zhuzgov et al., 1995] *Zhuzgov L. N., Styazhkin V. A.* et al. Magnetic field experiment in the INTERBALL project (experiment IMAP) // INTERBALL. Mission and Payload. RKA- IKI-CNES, 1995. 222 p.

## IZMIRAN MAGNETIC EXPERIMENTS IN SPACE

*V. G. Petrov, V. A. Styazhkin*

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of Russian Academy of Sciences (IZMIRAN)

The article describes magnetic field measurements conducted in space by IZMIRAN after 1990 and some obtained results. Planned in nearby future experiments also are described.

*Keywords:* magnetic field, magnetic measurements, magnetosphere.

---

**Petrov** Valeriy Grigorievich — deputy director, PhD, vpetrov@izmiran.ru  
**Styazhkin** Valeriy Alexandrovich — head of laboratory, PhD, sva@izmiran.ru