

КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМИРАН*

В. Д. Кузнецов

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

Даётся краткий обзор космических исследований, которые ИЗМИРАН осуществлял с начала космической эры — от первого в мире научного космического эксперимента с использованием радиомаяка Первого ИСЗ (1957) до исследований с помощью современных космических обсерваторий («Интеркосмос-19», АПЭКС, «КОРОНАС-Ф» и др.). Тематика космических исследований охватывает все научные направления института — исследования ионосферы, магнитного поля Земли и планет, Солнца и солнечно-земных связей. Приводятся основные научные результаты исследований на космических аппаратах, выполненных в течение многих лет, а также краткое описание перспективных космических проектов ИЗМИРАН.

Ключевые слова: космические проекты, ионосфера, магнитное поле Земли, физика Солнца, солнечно-земные связи

ВВЕДЕНИЕ

В исследованиях по основным направлениям деятельности института — ионосфера и распространение радиоволн, магнетизм Земли и планет, солнечно-земная физика, исследования на космических аппаратах (КА) занимают одно из центральных мест. За 75 лет своей истории ИЗМИРАН принимал участие в более чем 50 космических проектах, и в космических исследованиях прошёл путь от Первого искусственного спутника Земли (ИСЗ) до современных комплексных космических обсерваторий, таких как «Интеркосмос-19», АПЭКС (Активные Плазменные Эксперименты), «КОРОНАС-Ф» (Комплексные Орбитальные Околоземные Наблюдения Активности Солнца), «Компас-2». В стадии подготовки с участием ИЗМИРАН и широкой кооперации научных институтов (Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ РАН), Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Московский инженерно-физический институт) (НИЯУ МИФИ)) находится крупный космический проект ИНТЕРГЕЛИОЗОНД.

Кузнецов Владимир Дмитриевич — директор, доктор физико-математических наук, kvd@izmiran.ru

* Данная статья является переработанным и дополненным вариантом статьи автора (Кузнецов В. Д. Космические исследования ИЗМИРАН // Успехи физ. наук (УФН). 2010. Т. 180. № 5. С. 554—560), написанной к 70-летию ИЗМИРАН.

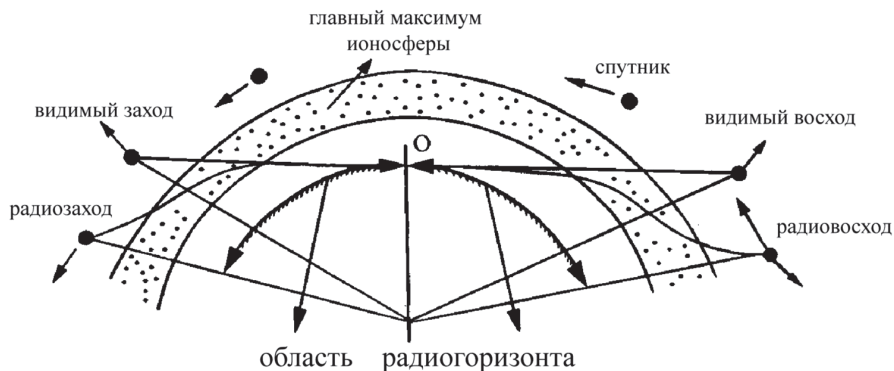


Рис. 1. Наблюдение радиовосхода и радиозахода Первого ИСЗ, которые возникали соответственно раньше и позже оптического восхода и захода спутника за горизонт из-за эффекта рефракции радиоволн в ионосфере (адаптировано из работы [Alpert, 2000])

За последние годы космические исследования играют всё возрастающую роль в проводимых ИЗМИРАН исследованиях и наиболее значимые результаты в изучении околоземного космического пространства связаны именно с измерениями на космических аппаратах. Эти исследования являются важной составной частью комплексного подхода при изучении разнообразных и сложных явлений и физических процессов в системе «Солнце-Земля», таких объектов как Солнце, магнитосфера Земли, ионосфера и т.д., требующих проведения целенаправленных экспериментов, всестороннего анализа наблюдательных данных в сочетании с теоретическими моделями.

Мировая история космических исследований началась в 1957 г. с Первого ИСЗ, когда сигнал радиомаяка этого спутника был использован сотрудником ИЗМИРАН Я.Л. Альпертом для наблюдений эффекта радиовосхода и радиозахода спутника и изучения внешних слоёв ионосферы. Это был первый в мире научный космический эксперимент (КЭ) [Альперт, 1958; Альперт и др., 1958; Alpert, 2000].

История этого эксперимента и вклад Я.Л. Альперта в космические исследования изложены в специальной статье настоящего сборника Кузнецов В.Д., Синельников В.М., Альперт С.Н., Альперт Я. «Спутник-1» и первый спутниковый эксперимент (см. с. 467).

Ещё до запуска Первого ИСЗ сотрудником ИЗМИРАН тех лет А.В. Гуревичем были выполнены первые теоретические расчёты взаимодействия металлического спутника с разряженной ионосферной плазмой и получены распределения плотности и электрического потенциала в окрестности спутника [Гуревич, 1960, 1961] (рис. 1).

Эти расчёты были важны для постановки и интерпретации различных спутниковых экспериментов и легли в основу последующих более детальных исследований по этой проблеме [Альперт и др., 1963, 1964].

В таблице перечислены основные космические проекты с участием ИЗМИРАН. Они подразделены на две основные группы — проекты по изучению околоземного космического пространства (ОКП) — магнитосферы

и ионосферы, и проекты на космических аппаратах за пределами ОКП, относящиеся к исследованиям Солнца и планет Солнечной системы. Ниже даётся краткий обзор основных результатов, полученных при реализации космических проектов, состояния ведущихся космических исследований и перспектив дальнейших работ в этом направлении.

Космические проекты (КА) с участием ИЗМИРАН

Проекты	ОКП, магнитосфера, ионосфера	Солнце и солнечно-земная физика, планеты
Реализованные	Первый ИСЗ, третий ИСЗ, «Космос-1, -12, -26, -49, -321, -381, -1809», «Электрон-2, -4», «Интеркосмос-3, -5, -10, -13, -18, -19, -24 (Активный), -25 (АПЭКС)», «Прогноз-1, -6, -7, -9», «Интасат», АТС-6, «Цикада», «Ореол-3», «Интеркосмос-Болгария-1300», «Интербол», «Компас-2», «Аэростаты». КЭ «Молния-гамма» (РС МКС)	«Луна-1, -2, -10», «Луноход-2», «Венера-1, -2, -4, -9, -10», «Марс-2, -3, -5», «Союз-Аполлон», «Вега-1, -2», «Фобос-2», «КОРОНАС-И», «КОРОНАС-Ф». КЭ «Сокол» (КОРОНАС-ФОТОН)
В стадии реализации (работающие)	КЭ «Импульс» (РС МКС), КЭ «Сейсмопрогноз-СМ» (РС МКС), аэростатные эксперименты	
В стадии подготовки	КЭ «Гидроксил» (РС МКС), Резонанс	«Интергелиозонд». КЭ «Тахомаг» (РС МКС)
В стадии разработки	ИОНОСАТ, «Геомаг», «ГЛОНАСС-на-ука»	«Солнечный парус», «Система»

Примечание: РС МКС — Российский сегмент Международной космической станции; ГЛОНАСС — Глобальная навигационная спутниковая система).

1. КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Изучение структуры внешней ионосферы — сглаженное распределение электронной концентрации по высоте выше главного максимума, установленное впервые с использованием радиомаяка Первого ИСЗ [Альперт, 1958; Альперт и др., 1958], было продолжено на спутнике «Интеркосмос-19» (1979–1982), с борта которого проводилось внешнее зондирование ионосферы разработанным в ИЗМИРАН ионозондом [Карпачев, 2008]. Такое зондирование было выполнено над обширной территорией земного шара и проведено детальное сшивание внутреннего и внешнего профилей электронной концентрации (рис. 2).

«Интеркосмос-19» был одним из наиболее успешных проектов в изучении ионосферы, давший огромный объём данных, на основе которых построено глобальное распределение параметров внешней ионосферы для разных часов местного времени и для разных условий; обнаружены новые элементы глобальной структуры ионосферы — кольцевой ионосферный провал и низкоширотный провал ионизации; исследованы долготные вариации параметров ионосферы, характеристики главного ионосферного провала и его динамика во время магнитной бури, влияние B_z -компоненты

межпланетного магнитного поля на изменения структуры экваториальной аномалии, явление F-рассеяния во внешней ионосфере, распространение радиоволн в области структурных особенностей ионосферы; построена модель внешнего $N(h)$ -профиля и глобальная модель электронной температуры; локализованы ионосферные эффекты сильных землетрясений; установлено, что эффекты мощной внутренней гравитационной волны могут охватывать всю толщу внешней ионосферы вплоть до высоты спутника ~ 1000 км. Последние результаты исследования ионосферы с использованием данных спутника «Интеркосмос-19» можно найти в публикациях [Карпачев и др., 2012, 2013; Карпачев и др., 2014а, б; Клименко и др., 2013; Karapachev et al., 2012, 2013; Klimenko et al., 2012a, b; Shubin et al., 2013].

Спутниковые исследования ионосферы, магнитосферы и околоземной плазмы были продолжены в проектах «Интеркосмос-Болгария-1300» (запуск 1981 г.), «Космос-1809» (запуск 1986 г.), «Активный» (ИСЗ «Интеркосмос-24», запуск 1989 г.), АПЭКС (Активные плазменные эксперименты, ИСЗ «Интеркосмос-25», запуск 1991 г.), «Компас-2» (запуск 2006 г.).

По данным спутников «Космос-1809» и «Интеркосмос-Болгария-1300» [Беляев и др., 2011; Костин и др., 2015; Belyaev et al., 2012] исследованы аномальные структуры в верхней ионосфере в области терминатора и над циклонами, достигшими ураганной силы. Изучена также модификация этих структур при мощном дополнительном нагреве высокочастотном (ВЧ) излучением стенда СУРА [Belyaev et al., 2012]. Установлено, что над тайфунами в верхней ионосфере в большинстве случаев наблюдается резкое возрастание плотности плазмы с квазисолитонными структурами с поперечными масштабами в десятки километров. Эти структуры обычно заполнены электростатическими колебаниями вблизи циклотронной частоты гелия. Такие же структуры обнаруживаются и с экваториальной стороны вблизи аврорального овала [Беляев и др., 2011]. Над несколькими десятками уединённых тропических циклонов (ТЦ) выявлен ряд последовательных стадий их развития.

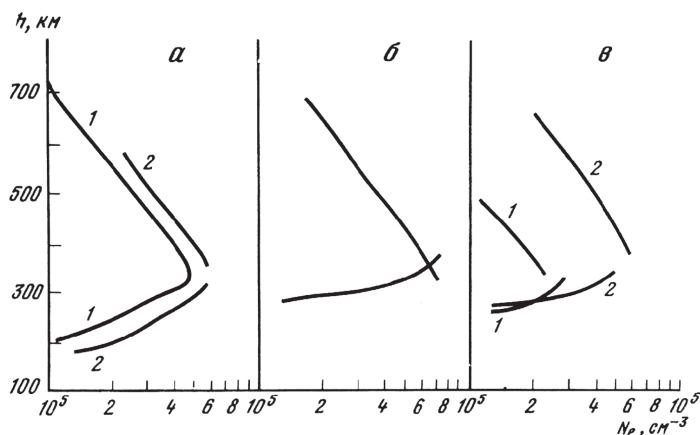


Рис. 2. Различные варианты стыковки профилей распределения электронной концентрации в ионосфере по данным наземных измерений (нижний профиль, малые высоты) и по данным спутника «Интеркосмос-19» (верхний профиль)

Первая стадия — резкое усиление высотной грозовой активности, вызванной как тропическим возмущением, так и тропической депрессией. На этой стадии за сутки до формирования тропического шторма или даже урагана I категории ночью в верхней ионосфере наблюдаются каверны плотности плазмы размером в несколько сотен километров. Вторая стадия (характерная для ТЦ, достигающих интенсивности I–II категории) — смещение широкого максимума плотности плазмы в верхней ионосфере с геомагнитного экватора в область, центр которой проецируется по магнитному полю до высот 200...230 км на широте ТЦ. Третья стадия (характерная для ТЦ III–V категорий) — формирование около зенита ТЦ дополнительного узкого, шириной до 400 км пика N_e с прилегающими возмущениями ΔN_e , электростатическими колебаниями, охватывающими циклотронные частоты H^+ , He^+ и нижегибридную частоту, а также электрическими полями, проецирующимися в магнитосопрежжённую область. Комплексный анализ данных со спутников «Космос-1809» и «Интеркосмос-Болгария-1300» во время развития сильных тропических циклонов позволил выявить дополнительное поступление плазмы над уединёнными ТЦ и её динамику, инъекцию узкой струи нейтралов в верхнюю ионосферу, которая сопровождает переход сильного ТЦ из категории II в более высокие категории. Более подробно результаты этих исследований изложены в [Костин и др., 2015] и отдельной статье настоящего сборника *Беляев Г.Г., Костин В.М.* «Проявление мощных естественных и антропогенных процессов в ионосфере и на Земле» (см. с. 170).

На ИСЗ «Интеркосмос-24» («Активный», 1989–1991 гг.) были обнаружены ОНЧ-эффекты (очень низкой частоты) подземного ядерного взрыва на острове Новая Земля 24 октября 1990 г. (широкополосные данные) [Mikhailov et al., 2000]. В КНЧ-диапазоне (крайне низкие частоты) (узкополосные данные) впервые наблюдались аномально высокие абсолютные значения электрической компоненты поля во время тайфунов главным образом над приэкваториальной областью Тихого Океана. Были также проанализированы спектры свистящих атмосфериков при пролёте над сейсмоактивными регионами в различных геофизических условиях. Этот анализ позволил разделить сейсмические и геомагнитные эффекты в D-области ионосферы.

На ИСЗ «Интеркосмос-25» (АПЭКС, 1991–1999 гг.) были выполнены активные эксперименты по инъекции плазменных пучков в ионосферную и магнитосферную плазму [Oraevsky, Triska, 1993]. В серии наземно-спутниковых измерений получены томографические реконструкции профилей ионосферы в реальном времени, обнаружены наклонные и «косые» ионосферные провалы (понижения электронной концентрации) в средних и высоких широтах полярной области, выполнена диагностика многочисленных естественных ионосферных явлений — главного ионосферного провала, плазменных пузырей, экваториальной аномалии, плазменных излучений на гармониках гирочастоты, выполнены также ионосферные измерения над областью работы нагревных стендов и зарегистрирован эффект нетуннельного прохождения радиоволн через волновой ионосферный барьер. Данные спутника АПЭКС использовались для отработки методов спутниковой радиотомографии с использованием сети наземных радиотомографических

комплексов. Участие в этой работе в 1998 г. было отмечено присуждением В. Н. Ораевскому и Ю. Я. Ружину Государственной премии в области науки и техники в составе авторского коллектива.

В проекте АПЭКС были проведены также измерения амплитудно-частотных характеристик ОНЧ-волн при инжекции плазменных пучков. Возбуждение ОНЧ-волн сопровождалось ускорением высокоэнергичных электронов и ионов вплоть до энергий 500...700 кэВ, потоки которых зарегистрированы на субспутнике «Магион-3». Такая генерация высокоэнергичных заряженных частиц была обнаружена впервые. Регистрировались также потоки электронов с меньшими энергиями, которые свидетельствовали о резонансных механизмах взаимодействия возбуждаемых волн с частицами фоновой плазмы при инжекции электронов. Возбуждение волн ВЧ-диапазона было зарегистрировано в точке инжекции на основном спутнике и на субспутнике «Магион-3». В режиме модулированной инжекции пучков получены результаты, связанные с формированием особых электромагнитных структур в плазме, индуцирующих электромагнитные поля в ОНЧ-диапазоне, подобно ОНЧ-антенне в плазме. Инжекция электронов в немодулированном режиме приводит к ВЧ-накачке в области инжекции и дальнейшей эстафетной перекачке волновой энергии в низкочастотную область спектра, усиливая, таким образом, низкочастотную турбулентность. Анализ полученных данных продолжается.

Методики измерения ионосферных параметров и исследования различных ионосферных явлений, вызванных естественными возмущениями и антропогенными факторами, получили своё развитие и апробацию в экспериментах на малом спутнике «Компас-2» (2006–2007) [Кузнецов и др., 2011a; Ferencz et al., 2009; Michailov et al., 2010]. Совместно с Институтом космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИКИР ДВО РАН) в рамках совместных наземных и спутниковых измерений на МКА (малый космический аппарат) «Компас-2» были выполнены экспериментальные исследования электрических и электромагнитных процессов в приземной атмосфере в сейсмоактивном регионе Камчатки, целью которых было изучение литосферно-атмосферно-ионосферных связей в период подготовки землетрясений. По измерениям вариаций напряжённости квазистатического электрического поля, интенсивности естественных ОНЧ-излучений ($f = 20...20\,000$ Гц) и вариаций геомагнитного поля исследованы эффекты различных источников — метеорологической, геомагнитной и сейсмической природы. В спектрах мощности этих параметров обнаружены колебания в широком диапазоне атмосферных волн: внутренние гравитационные волны ($T = 0,5...3,3$ ч), приливные тепловые волны ($T = 4...24$ ч) и волны планетарных масштабов ($T > 24$ ч), что можно рассматривать как экспериментальное подтверждение одного из возможных механизмов литосферно-ионосферного взаимодействия через внутренние гравитационные волны. Установлено, что колебания с $T = 0,5...1,5$ ч усиливаются в подготовительную фазу землетрясений, а их источник локализован в приземной атмосфере. Волны с такими периодами способны проникать до высот динамо-области ионосферы ($h \approx 120...130$ км). Колебания с $T = 1,5...3,0$ ч усиливаются при высокой геомагнитной актив-

ности. Источник этих колебаний локализован в динамо-области полярной ионосферы или выше. При изучении распространения свистов на высотах 400 км по данным МКА «Компас-2» было установлено, что при определённых условиях низкочастотная ветвь свистов достигает нулевой частоты за конечное время, а не стремится к ненулевой асимптоте.

В кооперации ряда научных организаций НИРФИ (Научно-исследовательский радиофизический институт), ЦНИИмаш (Центральный научно-исследовательский институт машиностроения) при координирующей роли ИЗМИРАН реализуется серия экспериментов по регистрации с борта РС МКС воздействия радионагревного стенда СУРА на ионосферу Земли. В одном из таких экспериментов, выполненных 2 октября 2007 г. с использованием аппаратуры «Релаксация» на борту РС МКС (рис. 3), в направлении области нагрева над стендом СУРА наблюдалось слабое свечение атмосферы в линии O^1S ($\lambda = 557,7$ нм), по времени совпадающее с периодом работы нагревного стенда [Ружин и др., 2009а, б, 2013]. Наблюдаемое свечение не могло быть вызвано непосредственно эффектами нагрева из-за малой мощности нагревного излучения, и возможно было связано с высыпанием частиц из магнитной трубки, стимулированным эффектами модулированного нагрева, когда период модуляции нагревного излучения близок к периоду собственных альфвеновских колебаний трубки. Продолжается обработка и анализ полученных данных, ведётся подготовка новых сеансов проведения эксперимента.

В эксперименте ИМПУЛЬС на РС МКС, реализованном ИЗМИРАН в кооперации с Московским авиационным институтом (национальным исследовательским университетом) (МАИ) в 2009–2010 гг., для изучения эффектов модификации ионосферы использовался импульсный инжектор плазмы (скорость ионов $\sim 30\ldots 40$ км/с, степень ионизации плазмы $\beta = 10\%$, периодичность инъекции $1,8 \pm 0,2$ Гц, длительность импульса ~ 10 мкс). Проведены пробные сеансы инъекции, произведена настройка аппаратуры и выбор оптимальных режимов её работы для продолжения эксперимента («Импульс-2») с новым инжектором. Эффекты инъекции планируется регистрировать также наземными средствами ИЗМИРАН в НЧ-, УНЧ- (ультранизкие частоты), КНЧ-, ОНЧ-диапазонах частот.

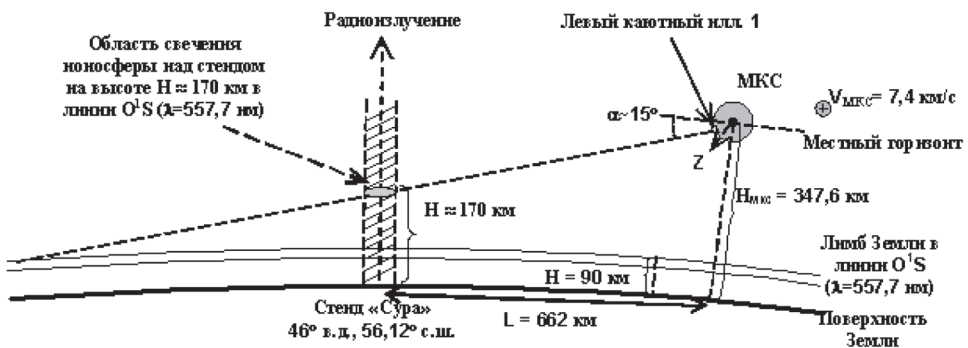


Рис. 3. Схема проведения эксперимента по регистрации с борта РС МКС воздействия радионагревного стенда СУРА на ионосферу Земли

В 2011 г. на Российском сегменте Международной космической станции (РС МКС) совместно с Научно-исследовательским учреждением Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко Белгос-университета (НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ) реализован космический эксперимент МОЛНИЯ-ГАММА по исследованию атмосферных вспышек гамма и оптического излучения в условиях грозовой активности. Полученный объём данных показал сложную картину энергетических спектров излучения в гамма-диапазоне, связанную с высоким фоновым излучением, над которым регистрировались отдельные гамма-всплески, он содержит информацию о спектрах фонового гамма-излучения, его широтно-долготном распределении, об атмосферных коротких гамма-всплесках с длительностью порядка микросекунд и их связи с грозовой спрайтовой активностью. Предварительный анализ данных измерений показал, что регистрируемые события имели широкий спектр характеристик, наблюдалась прямая корреляция числа регистрируемых гамма-квантов и порога их обнаружения со всплесками высыпавшихся частиц в авроральных зонах.

В ИЗМИРАН ведётся разработка перспективных космических проектов по изучению ионосферы и околоземного космического пространства — серии экспериментов на РС МКС, спутникового проекта ИОНОСАТ и проекта по использованию ГЛОНАСС.

В декабре 2013 г. на борт РС МКС была доставлена научная аппаратура КЭ СЕЙСМОПРОГНОЗ-СМ в составе двухчастотного приёмника GPS (Global Positioning System)/ГЛОНАСС и плазменно-волнового радиоспектрометра (0,1...24 МГц, разработка ИЗМИРАН) для исследований физических явлений в ОКП, обусловленных процессами подготовки землетрясений и техногенными воздействиями. Получены первые результаты измерений, показывающие работоспособность научной аппаратуры и регистрацию характерных сигналов и спектров излучения природной плазмы. В стадии наземной подготовки для реализации на РС МКС находятся КЭ ГИДРОКСИЛ для изучений оптических излучений верхней атмосферы и её отклика на аномальные природные и техногенные явления (совместно с НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ). Доставка научной аппаратуры (спектрофотометрического комплекса) на борт РС МКС и проведение измерений планируются в 2015 г.

Спутниковый проект ИОНОСАТ направлен на изучение ионосферы как индикатора солнечно-земных и литосферно-атмосферных взаимодействий, для регистрации ионосферных откликов природных и техногенных катастроф. Предполагалось, что малый космический аппарат «Ионосат» будет составной частью кластера из трёх близко расположенных микро-спутников (рис. 4), предназначенных для изучения мелкомасштабной структуры и неоднородности ионосферы, в рамках украинского проекта ИОНОСАТ с международным участием. С участием кооперации институтов (ИКИ РАН, Научно-исследовательский институт физики (НИИФ) МГУ) разработана научная программа и состав комплекса научной аппаратуры малого космического аппарата на базе платформа «Карат» Научно-производственного объединения (НПО) им. С. А. Лавочкина.

Для украинского малого космического аппарата «Микросат», который является первой фазой создания космической системы «Ионосат»,

ИЗМИРАН изготовлен прибор ПЭС (измеритель полного электронного содержания), который в составе комплекса научной аппаратуры спутника предназначен для изучения динамических процессов в ионосфере в широком диапазоне пространственных и временных масштабов, а также для навигации спутника. Прибор ПЭС будет осуществлять двухчастотный (1559...1610, 1164...1253 МГц) приём сигналов спутников GPS/ГЛОНАСС в геометрии радиозатменных измерений [Андреевский и др., 2013].

Для мониторинга и диагностики плазмосферы и магнитосферы Земли в ИЗМИРАН разработано предложение использовать ГЛОНАСС, суть которого в том, что на борт каждого космического аппарата системы ГЛОНАСС устанавливается приёмно-передающий комплекс, обеспечивающий непрерывные измерения фазовых задержек когерентных сигналов 150/400 МГц между любой парой КА в пределах их прямой видимости (рис. 5). Алгоритм обработки измеряемых данных позволит радиотомографическими методами восстанавливать объёмную структуру внутренней магнитосферы и её динамику, обусловленную воздействием природных и техногенных источников. В схему измерений могут быть задействованы также сигналы спутников системы GPS и других спутниковых систем.

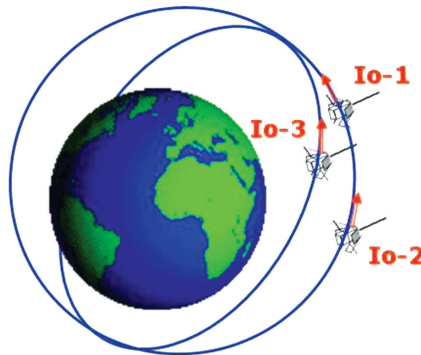


Рис. 4. Баллистическая схема ионосферного кластера «Ионосат»

Подсистема космических аппаратов ГЛОНАСС

Подсистема космических аппаратов GPS

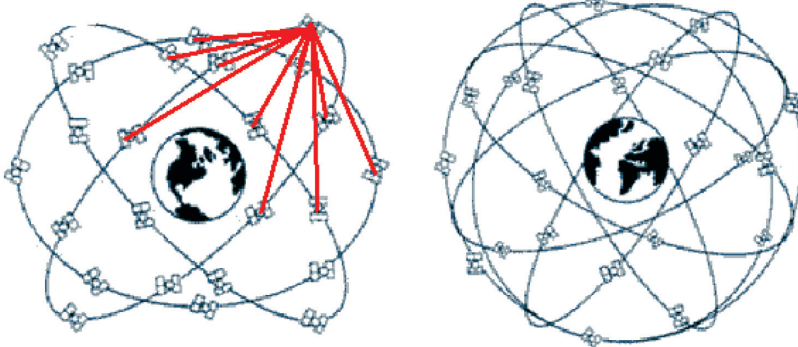


Рис. 5. Схема использования ГЛОНАСС для мониторинга и диагностики плазмосферы и магнитосферы Земли

2. МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

Магнитные поля являются одной из важнейших физических характеристик Земли, межпланетной среды, планет и малых тел Солнечной системы.

На третьем ИСЗ (1958) ИЗМИРАН был выполнен первый в мире эксперимент в космосе по измерению геомагнитного поля с использованием магнитометра СГ-45 (рис. 6) [Долгинов, Пушков, 1968; Долгинов и др., 1958]. Полученные данные позволили провести первые сопоставления измеренного геомагнитного поля с различными вариантами его аналитического представления и выбрать наиболее верное. Была также показана возможность использования геомагнитного поля для определения ориентации космического аппарата. Эти эксперименты были выполнены под руководством ведущего магнитолога Ш. Ш. Долгинова.

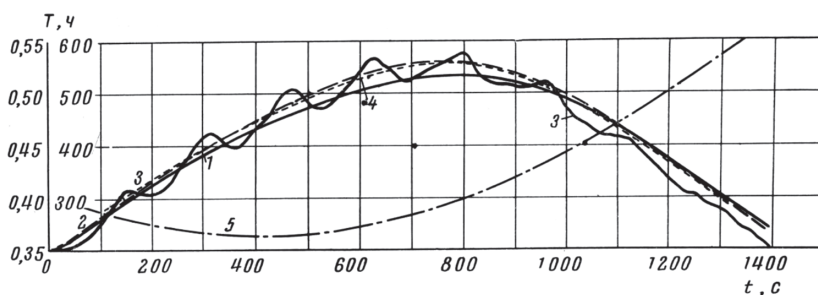
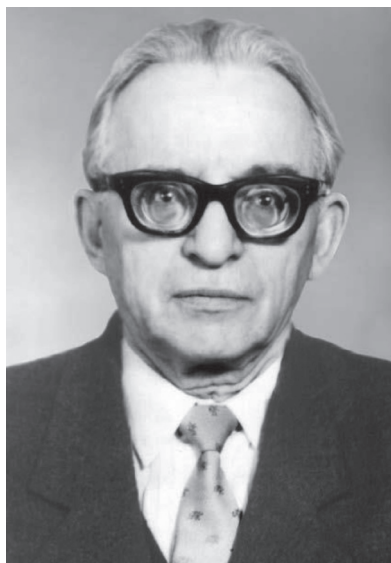


Рис. 6. Магнитограммы измеренных и вычисленных значений геомагнитного поля вдоль траектории третьего ИСЗ: 1, 2 — расчётные; 3 — измеренная; 4 (штриховая) — измеренная, с вычетом девиации



Долгинов Шмая Шлемович (1917–2001)

Впоследствии в серии спутниковых измерений была выполнена мировая магнитная съёмка. На спутниках «Космос-26» (1964) и «Космос-49» (1964) протонным магнитометром ПМ-4 разработки ИЗМИРАН измерениями было покрыто 75 % поверхности Земли и было установлено, что магнитные аномалии, связанные со строением и тектоникой земной коры, простираются до высот низколетящих спутников [Долгинов и др., 1965; 1967a]. Данные этих измерений вошли в Международную аналитическую модель геомагнитного поля эпохи 1965 г. На спутнике «Космос-321» (1970) квантовым цезиевым магнитометром ИЗМИРАН геомагнитное поле было измерено на 94 % поверхности Земли [Долгинов и др., 1967b]. Эти данные позволили изучить магнитные эффекты продольных токов в высокоширотных областях ионосферы, определить магнитные эффекты от экваториальной токовой струи, они вошли в Международную аналитическую модель поля эпохи 1970 г.

Точность аппроксимации геомагнитного поля, и, особенно, аномального магнитного поля аналитической моделью определяется плотностью спутниковой магнитной съёмки. В разрабатываемом ИЗМИРАН проекте ГЕОМАГ предполагается использовать для глобальной съёмки магнитного поля Земли систему из пяти малых спутников на полярных орбитах, измерения вдоль которых смогут обеспечить существенное улучшение картины представления аномального магнитного поля.

Магнитные измерения на спутниках «Электрон-2 и -4» (1964, 1965) позволили впервые исследовать топологию поля в высокоширотной внешней магнитосфере Земли и в зоне захваченной радиации, обнаружить признаки проникновения плазмы солнечного ветра в магнитосферу Земли через касп (cusp), построить первую модель магнитосферы Земли, учитывающую формирование хвоста, изучить высотное-временное распределение электронной концентрации и неоднородные образования внешней ионосферы [Альперт, Синельников, 1965]. На спутнике «Интеркосмос-Болгария-1300» (1981) были выполнены исследования продольных токов в приполярной ионосфере Земли, сильные скачки электрического поля и потоков частиц в полярной ионосфере [Чмырев и др., 1986].

В рамках космических проектов ПРОГНОЗ (1971–1985), ИНТЕРБОЛ (1995–2000) (головная организация ИКИ РАН), с использованием магнитометров ИЗМИРАН были выполнены магнитные измерения во внешней магнитосфере Земли и в межпланетном пространстве [Иванов и др., 1989]. На основе полученных магнитных данных в комплексе с плазменными измерениями в проекте ИНТЕРБОЛ была исследована тонкая структура внешних границ и слоёв магнитосферы, которые включали: отошедшую ударную волну, магнитопаузу, магнитослой и пограничный слой [Стяжкин и др., 1998]. Исследованы также явления FTE (Flux Transfer Event), связанные с процессами импульсного пересоединения магнитных полей магнитослоя и магнитосферы; продольные токи, текущие вдоль силовых линий геомагнитного поля в авроральных областях магнитосферы.

Эксперимент ИЗМИРАН в подготавливаемом проекте РЕЗОНАНС (ИКИ РАН) направлен на проведение магнитных измерений при изучении резонансных плазменных процессов в магнитосфере и эффектов магнитосферного циклотронного мазера, условия для которого могут быть реализованы в отдельных трубках геомагнитного поля [Кузнецов, Зеленый, 2008].

Успешные магнитные измерения в околоземном космическом пространстве позволили проводить аналогичные измерения на межпланетных станциях при изучении планет и малых тел Солнечной системы. Первые магнитные измерения, выполненные ИЗМИРАН на автоматических межпланетных станциях «Луна-2» (1959) и «Луна-10» (1966), позволили установить, что Луна не имеет дипольного магнитного поля значительной интенсивности [Долгинов и др., 1961].

За первые магнитные измерения в космосе директору ИЗМИРАН Н. В. Пушкину и ведущему магнитологу Ш. Ш. Долгинову была присуждена в составе авторского коллектива одна из первых Ленинских премий в области космических исследований (1960).

Магнитные измерения на «Луноходе-2» (1973) позволили установить корреляцию локальных магнитных полей (6...300 нТл) с тектоническими особенностями рельефа (кратерами, разломами и т.д.) [Долгинов и др., 1975].

Магнитные измерения при изучении планет Венера и Марс в серии проектов «Венера-4» (1967), «Венера-9» и «Венера-10» (1975), «Марс-2, -3, -5» (1972–1974) позволили установить, что Венера и Марс не обладают собственным дипольным полем, а их магнитосферы, подобно кометной, являются индуцированными. У Венеры и Марса были обнаружены и исследованы головная ударная волна и плазменно-магнитный шлейф [Долгинов и др., 1968, 1974]. В миссиях «Фобос-2» (1989) и «Вега-1, -2» (1986) изучены особенности взаимодействия солнечного ветра с кометой Галлея и со средой вблизи спутника Марса — Фобоса [Riedler et al., 1986, 1989].



Рис. 7. Вертикальный градиент аномального магнитного поля на высоте $h = 30$ км вдоль трассы полёта аэростата [Цветков и др., 2011a]

Магнитные измерения на аэростатах позволяют получить данные о геомагнитном поле на низких высотах и детально изучать магнитные аномалии на поверхности Земли, корректировать модели геомагнитного поля, подверженного непрерывным изменениям. На основе разработанного в ИЗМИРАН аэростатного магнитного градиентометра [Черников и др., 2009] выполнена серия аэростатных экспериментов по измерению и использованию вертикальных градиентов геомагнитного поля в стратосфере. Этот прибор не имеет аналогов в мировой практике геомагнетизма, и является эксклюзивной разработкой ИЗМИРАН. Созданы методики выделения поля магнитных аномалий по данным аэростатных градиентных магнитных съёмок [Кузнецов и др., 2011б; Цветков и др., 2011а, б], изучен амплитудный спектр магнитных аномалий вдоль траектории аэростатного пролёта от Камчатки до Поволжья (рис. 7), в котором выделены региональные и длинноволновые магнитные аномалии. Различными, в том числе и спектральными методами, изучены параметры источников этих аномалий. Результаты этих исследований позволили повысить пространственную точность изучения глубинного строения земной коры и построения её магнитной модели. Сочетание современных спутниковых и аэростатных геомагнитных измерений позволяет добиться удовлетворительного сопоставления экспериментальных данных с теоретическими моделями генерации геомагнитного поля, продвинуться в изучении магнитных свойств земной коры, магнитных аномалий и других особенностей распределения геомагнитного поля.

3. СОЛНЕЧНАЯ И СОЛНЕЧНО-ЗЕМНАЯ ФИЗИКА

Начиная с 90-х гг. прошлого столетия ИЗМИРАН расширил направление своих космических исследований — при головной роли ИЗМИРАН были реализованы два крупных космических проекта по исследованию Солнца — проект КОРОНАС-И и КОРОНАС-Ф, явившиеся составной частью программы КОРОНАС. По результатам проекта опубликована серия обзорных статей [Кузнецов, 2005, 2006а, б, 2010; Кузнецов, Собельман, 2005; Кузнецов и др., 2005; Ораевский, Собельман, 2002; Ораевский и др., 2002; Kuznetsov, 2004a, b, 2006; 2008; Kuznetsov et al., 2011; 52-64] и издана книга [Кузнецов, 2009а; CORONAS-F..., 2014].

С использованием данных со спутника «КОРОНАС-Ф» проведены исследования корональных выбросов массы (КВМ) и связанных с ними проявлений солнечной активности, имеющих высокую степень геоэффективности [Черток и др., 2005]. Установлено, что в процесс эрупции крупных КВМ оказываются вовлечёнными структуры глобальной солнечной магнитосферы с пространственным масштабом, намного превосходящим размеры активных областей и обычных комплексов активности. Наблюдаемые при этом крупномасштабные области пониженной яркости крайнего ультрафиолета и мягкого рентгеновского излучения (димминги) визуализируют структуры, вовлечённые в процесс КВМ, и, по-видимому, образуются вследствие раскрытия (вытягивания) силовых линий магнитного поля и истечения плазмы из транзитных корональных дыр. Происходящий

при КВМ процесс существенной перестройки магнитного поля, частичного открытия силовых линий и истечения вещества происходит не только в короне, но и затрагивает холодную плазму переходного слоя.

На спутниках «КОРОНАС-И» и «КОРОНАС-Ф» с использованием фотометра ДИФОС выполнены наблюдения флуктуаций яркости Солнца в диапазоне длин волн от УФ до инфракрасного (ИК) участка спектра, и изучены глобальные колебания Солнца. Построены спектры мощности глобальных колебаний для p -мод со степенями $l = 0, 1, 2$ (рис. 8) [Жугжда и др., 2009; Кузнецов, 2006б]. Экспериментально показано частотное расщепление p -мод вследствие вращения Солнца. Обнаружено наличие несинфазных длиннопериодных вариаций амплитуд p -мод глобальных колебаний Солнца, отражающих внутреннюю динамику Солнца, установлен заметный рост амплитуды глобальных колебаний в ультрафиолетовой области спектра. В течение нескольких месяцев 2009 г. наблюдения глобальных колебаний Солнца были продолжены в эксперименте «Сокол» на спутнике «КОРОНАС-Фотон» (запущен 30 января 2009 г.) [Лебедев и др., 2011]. В 2009 г. работы по проекту КОРОНАС-Ф были удостоены премии Правительства в области науки и техники.

В рамках проекта КОРОНАС-Ф в сотрудничестве с польскими коллегами из Центра космических исследований ПАН в эксперименте с рентгеновским спектрометром РЕСИК зарегистрированы и отождествлены многочисленные атомные линии солнечной короны, возникающие во время солнечных вспышек, которые позволили выполнить температурно-плотностную диагностику плазмы и определить содержание ряда редких химических элементов в солнечной короне [Сильвестер Б. и др., 2005; Сильвестер Я. и др., 2005; Kępa et al., 2006; Phillips et al., 2010; Sylwester B. et al., 2006; Sylwester J. et al., 2005, 2008, 2010a, b, 2012].

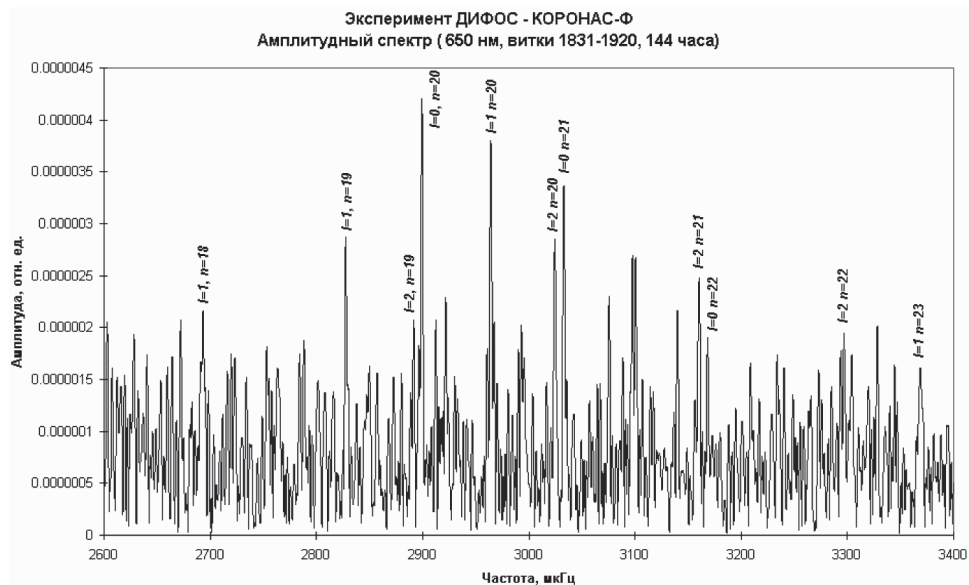


Рис. 8. Амплитудный спектр глобальных колебаний Солнца, полученный по данным эксперимента ДИФОС на спутнике «КОРОНАС-Ф»

В 1995 г. в кооперации с ИКИ РАН и Институтом Макса Планка в Линдау (Германия) ИЗМИРАН начал разработку перспективного солнечного космического проекта ИНТЕРГЕЛИОС для исследований внутренней гелиосферы и Солнца с близкий расстояний и из внеэклиптических положений [Кузнецов, 2012; Ораевский и др., 1996; Axford et al., 1998; Marsch et al., 1997], а в начале 2000-х гг. — проекта «Полярно-эклиптический патруль (ПЭП)» для наблюдений глобальной активности Солнца и изучения солнечных источников космической погоды [Кузнецов, 2009б; Kuznetsov, Oraevsky, 2002]. В результате объединения с научными группами проекта «Солнечный зонд» (ИКИ РАН) проект ИНТЕРГЕЛИОС был переименован в ИНТЕРГЕЛИОЗОНД, а в 2013 г. было принято решение о двух космических аппаратах для ИНТЕРГЕЛИОЗОНДА, что означало переход к реализации проекта ПЭП, который высоко оценивался международным научным сообществом. В проекте ИНТЕРГЕЛИОЗОНД для сближения с Солнцем предполагается использовать многократные гравитационные манёвры у Венеры за счёт соизмеримости периодов обращения космического аппарата и Венеры вокруг Солнца. Гравитационные манёвры позволяют также осуществить наклон плоскости орбиты космического аппарата к плоскости эклиптики. Два космических аппарата предполагается расположить на наклонённых в разные стороны гелиоцентрических орбитах на расстоянии 0,5 а.е. от Солнца, и сдвинуть на орбитах друг относительно друга на четверть периода, так что линия Солнце-Земля и плоскость эклиптики, где происходит большая часть выбросов массы и других активных явлений, непрерывно будет контролироваться из внеэклиптического положения (рис. 9). В рамках проекта ИЗМИРАН ведёт разработку и создание пяти научных приборов — многофункционального оптического телескопа «Тахомаг» (совместно с НИРФИ), многоканального солнечного фотометра «Фотоскоп», магнитометра «Гелиомаг» (совместно с Институтом геофизики и внеземной физики Технического университета (Германией) и институтом космических исследований АН Австрии), радиоспектрометра-детектора (РСД) и анализатора химического состава корональной плазмы (совместно с Центром космических исследований ПАН).

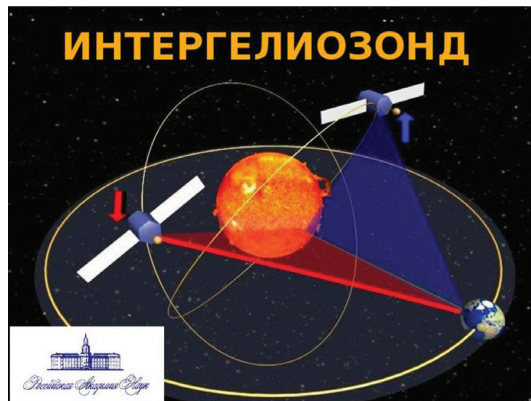


Рис. 9. Баллистическое построение миссии ИНТЕРГЕЛИОЗОНД в составе двух космических аппаратов

В связи с планируемыми полётами на Марс, в период которых возникнет необходимость обеспечения радиационной безопасности космонавтов и соответственно необходимость наблюдений активности на невидимой с Земли стороне Солнца, в ИЗМИРАН разрабатывается проект «Система», в котором вокруг Солнца в плоскости эклиптики под углом 120° помещаются три космических аппарата и один аппарат на наклонной орбите. Такая конфигурация системы космических аппаратов позволит осуществить глобальный контроль солнечной активности, а проект ИНТЕРГЕЛИОЗОНД рассматриваются как первый шаг на пути формирования такой системы.

В перспективе ИЗМИРАН начал разработку солнечного космического проекта СОЛНЕЧНЫЙ ПАРУС, в рамках которого предполагается использование технологии солнечного паруса для достижения гелиоцентрических орбит с высоким наклоном к плоскости эклиптики (не менее 75°). Проект направлен на наблюдения полярных областей Солнца и плоскости эклиптики из внеэклиптических положений для получения ключевой информации о механизме солнечного цикла и глобальной активности Солнца.

В стадии наземной подготовки находится космический эксперимент с вектор-магнитографом «Тахомаг» на российском сегменте МКС. Он имеет целью отработку космического варианта прибора, прообраз которого успешно используется в наземных наблюдениях на солнечном башенном телескопе ИЗМИРАН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье представлен лишь краткий обзор космических исследований ИЗМИРАН, начиная с первого в мире научного космического эксперимента с использованием радиомаяка Первого ИСЗ (1957) и заканчивая теми космическими проектами, которые в настоящее время работают в космосе и разрабатываются на перспективу. Перечень таких проектов приведён в таблице. Разрабатываемые космические проекты направлены на решение целой серии научных задач, которые стоят в области изучения ионосферы и магнитосферы Земли, планет и малых тел Солнечной системы, Солнца и влияния его активности на ОКП. В последующие годы роль и значение космических исследований по тематике ИЗМИРАН будет возрастать в связи с дальнейшим расширением человеческой деятельности в космосе и с усилением зависимости создаваемых космических технологий от космической погоды — состояния околоземного космического пространства — ионосферы и геомагнитного поля.

ЛИТЕРАТУРА

- [Альперт, 1958] *Альперт Я. И.* О методе исследования ионосферы с помощью искусственного спутника Земли // УФН. 1958. Т. 64. С. 3–14.
- [Альперт, Синельников, 1965] *Альперт Я. Л., Синельников В. М.* О результатах исследований ионосферы с помощью ИСЗ «Электрон-1» // Геомагнетизм и аэронавигация. 1965. Т. 5. С. 209–219.

- [Альперт и др., 1958] *Альперт Я. Л., Добрякова Ф. Ф., Чудесенко Э. Ф., Шапиро Б. С.* О некоторых результатах определения электронной концентрации внешней области ионосферы по наблюдениям за радиосигналами первого спутника Земли // УФН. 1958. Т. 65. С. 161–174.
- [Альперт и др., 1963] *Альперт Я. Л., Гуревич А. В., Питаевский Л. П.* Об эффектах, вызываемых искусственным спутником, быстро движущимся в ионосфере или межпланетной среде // УФН. 1963. Т. 79. Вып. 2. С. 23–80.
- [Альперт и др., 1964] *Альперт Я. Л., Гуревич А. В., Питаевский Л. П.* Искусственные спутники в разреженной плазме. М.: Наука, 1964.
- [Андреевский и др., 2013] *Андреевский С. Е., Кузнецов В. Д., Синельников В. М.* Радиозатменные измерения электронной концентрации ионосферы с помощью спутниковых радионавигационных систем GPS/ГЛОНАСС/GALILEO: Космический проект ИОНОСАТ. Киев: Академперіодика, 2013.
- [Беляев и др., 2011] *Беляев Г. Г., Костин В. М., Трушкина Е. П., Овчаренко О. Я., Бойчев Б.* Вариации параметров ионосферы при формировании и развитии тайфунов // Сб. тр. 6-й Научной конф. SES2010. София, Болгария: ИКИ БАН, 2011. С. 83–90.
- [Гуревич, 1960] *Гуревич А. В.* О возмущениях в ионосфере, вызываемых движущимся телом // Труды ИЗМИРАН. 1960. Т. 17. № 27. С. 173.
- [Гуревич, 1961] *Гуревич А. В.* О возмущениях в ионосфере, вызываемых движущимся телом // Искусственные спутники Земли. 1961. Т. 7. С. 101.
- [Долгинов, Пушков, 1968] *Долгинов Ш. Ш., Пушков Н. В.* Исследования магнитных полей Земли и планет // Успехи СССР в исследовании космического пространства: (Первое космическое десятилетие, 1957–1967) / Под ред. А. А. Благонравова и др. М.: Наука, 1968. С. 173–249.
- [Долгинов и др., 1958] *Долгинов Ш. Ш., Жузгов Л. Н., Пушков Н. В.* Предварительные сообщения о геомагнитных измерениях на третьем искусственном спутнике Земли // Искусственные спутники Земли. 1958. Вып. 2. С. 50–53.
- [Долгинов и др., 1961] *Долгинов Ш. Ш., Ерошенко Е. Г., Жузгов Л. Н., Пушков Н. В.* Исследования магнитного поля Луны // Геомагнетизм и аэрономия. 1961. Т. 1. № 1. С. 21–28.
- [Долгинов и др., 1965] *Долгинов Ш. Ш., Наливайко В. И., Тюрмин А. В. и др.* Эксперименты по программе мировой магнитной съёмки // Исследование космического пространства. М.: Наука, 1965. С. 606–615.
- [Долгинов и др., 1967а] *Долгинов Ш. Ш., Наливайко В. И., Орлов В. П. и др.* Каталог измеренных и вычисленных значений модуля напряжённости геомагнитного поля вдоль орбит спутника «Космос-49». М.: ИЗМИРАН, 1967. Ч. 1. 245 с. Ч. 2. 238 с. Ч. 3. 206 с.
- [Долгинов и др., 1967б] *Долгинов Ш. Ш., Козлов А. Н., Наливайко В. И. и др.* Каталог измеренных и вычисленных значений модуля напряжённости геомагнитного поля вдоль орбит спутника «Космос-321». М.: Наука. 1976. 180 с.
- [Долгинов и др., 1968] *Долгинов Ш. Ш., Ерошенко Е. Г., Жузгов Л. Н.* Исследование магнитного поля с межпланетной станции «Венера-4» // Космич. исслед. 1968. Т. 6. Вып. 4. С. 561–575.
- [Долгинов и др., 1974] *Долгинов Ш. Ш., Ерошенко Е. Г., Жузгов Л. Н., Шарова В. А.* Магнитное поле Марса по данным спутника «Марс-5» // Докл. АН СССР. 1974. Т. 218. Вып. 4. С. 795.
- [Долгинов и др., 1975] *Долгинов Ш. Ш., Ерошенко Е. Г., Жузгов Л. Н. и др.* // Космохимия Луны и планет: тр. Советско-американской конф. по космохимии Луны и планет / отв. ред. А. П. Виноградов. М.: Наука, 1975. С. 314.

- [Жугжда и др., 2009] *Жугжда Ю. Д., Кузнецов В. Д., Лебедев Н. И.* Солнечно-земная физика: результаты экспериментов на спутнике «КОРОНАС-Ф» / Под ред. В. Д. Кузнецова. М.: Физматлит, 2009. С. 34.
- [Иванов и др., 1989] *Иванов К. Г., Стяжкин В. А., Харшиладзе А. Ф.* // Геомагнетизм и аэрономия. 1989. Т. 29. № 2. С. 304.
- [Карпачев, 2008] *Карпачев А. Т.* Крупномасштабная структура плазмы верхней ионосферы по данным спутниковых наблюдений // Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Т. 1–3. Ионосферная плазма. Ч. 1 / Под ред. В. Д. Кузнецова, Ю. Я. Ружина. М.: Янус-К, 2008. С. 391–457.
- [Карпачев и др., 2012] *Карпачев А. Т., Жбанков Г. А., Телегин В. А.* Выделение крупномасштабной неоднородности в области главного ионосферного провала по данным внешнего зондирования на ИСЗ «Интеркосмос-19» // Геомагнетизм и аэрономия. 2012. Т. 52. № 2. С. 219–225.
- [Карпачев и др., 2013] *Карпачев А. Т., Жбанков Г. А., Телегин В. А.* Удалённые земные отражения на ионограммах ИСЗ «Интеркосмос-19» // Геомагнетизм и аэрономия. 2013. Т. 53. № 6. С. 809–816.
- [Карпачев и др., 2014а] *Карпачев А. Т., Жбанков Г. А., Телегин В. А.* Слоисто-неоднородная структура низкоширотной ионосферы по данным ИСЗ «Интеркосмос-19» // Геомагнетизм и аэрономия. 2014. Т. 54. № 1. С. 65–70.
- [Карпачев и др., 2014б] *Карпачев А. Т., Жбанков Г. А., Телегин В. А.* Волноводное распространение радиоволн в экваториальной ионосфере по данным ИСЗ «Интеркосмос-19» // Геомагнетизм и аэрономия. 2014. Т. 54. № 2. С. 221–230.
- [Клименко и др., 2013] *Клименко В. В., Карпачев А. Т., Клименко М. В.* Среднеширотные аномалии в суточном ходе электронной концентрации в ионосфере // Химическая физика. 2013. Т. 32. № 9. С. 32–41.
- [Костин и др., 2015] *Костин В. М., Беляев Г. Г., Бойчев Б., Трушкина Е. П., Овчаренко О. Я.* Ионосферные предвестники усиления уединённых тропических циклонов по данным спутников «Интеркосмос-Болгария-1300» и «Космос-1809» // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55. № 2.
- [Кузнецов, 2005] *Кузнецов В. Д.* КОРОНАС-Ф: три года наблюдений активности Солнца, 2001–2004 // Астроном. вестн. 2005. Т. 39. № 6. С. 483–484.
- [Кузнецов, 2006а] *Кузнецов В. Д.* Результаты наблюдений солнечных вспышек и активных явлений на Солнце со спутника «КОРОНАС-Ф» // Изв. РАН. Сер. физ. 2006. Т. 70. № 1. С. 56–61.
- [Кузнецов, 2006б] *Кузнецов В. Д.* Результаты наблюдений Солнца со спутника КОРОНАС-Ф // Изв. РАН. Сер. физ. 2006. Т. 70. № 10. С. 1449–1452.
- [Кузнецов, 2006в] *Кузнецов В. Д.* Геофизика: от наблюдений к моделям // УФН. 2006. Т. 176. № 3. С. 319–325. doi: 10.3367/UFNr.0176.200603g.0319.
- [Кузнецов, 2009а] *Кузнецов В. Д.* Проект КОРОНАС-Ф: исследование солнечной активности и её воздействий на Землю // Солнечно-земная физика: Результаты экспериментов на спутнике КОРОНАС-Ф / Под ред. В. Д. Кузнецова. М.: Физматлит, 2009. С. 10–34, 488.
- [Кузнецов, 2009б] *Кузнецов В. Д.* Космические исследования Солнца // Пятьдесят лет космических исследований: По материалам Международного форума, посвящённого пятидесятилетию запуска Первого искусственного спутника Земли, «Космос: наука и проблемы XXI века». РАН, октябрь 2007. М.: Физматлит, 2009. С. 60–92.
- [Кузнецов, 2010] *Кузнецов В. Д.* Космические исследования Солнца // Успехи физ. наук (УФН). 2010. Т. 180. № 9. С. 988–996.

- [Кузнецов, 2012] *Кузнецов В.Д.* Научные задачи проекта «Интергелиозонд» // Проект «Интергелиозонд»: Тр. рабочего совещания. Таруса, 11–13 мая 2011 / Под ред. В.Д. Кузнецова. М.: ИЗМИРАН, 2012. С. 5–14.
- [Кузнецов, Зеленый, 2008] *Кузнецов В.Д., Зеленый Л.М.* Космические проекты по солнечно-земной физике // Солнечно-земная физика. 2008. Т. 1. № 12. С. 83–92.
- [Кузнецов, Собельман, 2005] *Кузнецов В.Д., Собельман И.И.* Обзор результатов наблюдений Солнца со спутника «КОРОНАС-Ф» // Солнечно-земная физика. 2005. Вып. 8. С. 8.
- [Кузнецов и др., 2005] *Кузнецов В.Д., Житник И.А., Собельман И.И.* КОРОНАС-Ф: вклад в солнечно-земную физику // Вестн. РАН. 2005. Т. 75. № 8. С. 704–714.
- [Кузнецов и др., 2011a] *Кузнецов В.Д., Боднар Л., Гарипов Г.К., Данилкин В.А., Дегтярь В.Г., Докукин В.С., Иванова Т.А., Капустина О.В., Корепанов В.Е., Михайлов Ю.М., Павлов Н.Н., Панасюк М.И., Прутенский И.С., Рубинштейн И.А., Ружин Ю.Я., Синельников В.М., Тулупов В.И., Ференц Ч., Широков А.В., Яшин И.В.* Орбитальный мониторинг ионосферы и аномальных явлений на малом спутнике «Вулкан-Компас-2» // Геомагнетизм и аэрономия. 2011. Т. 51. № 3. С. 333–345.
- [Кузнецов и др., 2011б] *Кузнецов В.Д., Цветков Ю.П., Филиппов С.В., Брехов О.М.* Градиентные магнитные съёмки на высотах 20...40 км и их использование в программе INTERMAGNET // Вестн. ОНЗ РАН. 2011 Т. 3. NZ50001. doi: 10.2205/2011NZ000103.
- [Лебедев и др., 2011] *Лебедев Н.И., Кузнецов В.Д., Жужда Ю.Д., Болдырев С.И.* Наблюдения глобальных колебаний Солнца в эксперименте СОКОЛ на космическом аппарате «КОРОНАС-Фотон» // Астроном. вестн. 2011. Т. 45. № 2. С. 207–212.
- [Ораевский, Собельман, 2002] *Ораевский В.Н., Собельман И.И.* Комплексные исследования активности Солнца на спутнике «КОРОНАС-Ф» // Письма в Астрон. журн. 2002. Т. 28. № 6. С. 457–467.
- [Ораевский и др., 1996] *Ораевский В.Н., Кузнецов В.Д., Марш Э., Аксфорд В.И., Ин В., Томас Н., Швенн Р., Бреус Т.К., Ксанфомалити Л.В., Уткин В.Ф., Успенский Г.Р., Коган А.Ю.* Солнечная и меркурианская обсерватория — Интергелиос: Докл. науч. группы. Научное обоснование и концепция миссии. Февраль 1996. 59 с.
- [Ораевский и др., 2002] *Ораевский В.Н., Собельман И.И., Житник И.А., Кузнецов В.Д.* Комплексные исследования Солнца со спутника «КОРОНАС-Ф»: новые результаты // Успехи физ. наук. 2002. Т. 172. № 8. С. 949–959.
- [Ружин и др., 2009a] *Ружин Ю.Я., Иванов К.Г., Кузнецов В.Д., Петров В.Г.* Контролируемая инжекция радиоимпульсов в ионосферно-магнитосферную систему и появление микросуббури 2 октября 2007 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2009. Т. 49. № 3. С. 342–352.
- [Ружин и др., 2009б] *Ружин Ю.Я., Кузнецов В.Д., Карабаджак Г.Ф. и др.* Космический эксперимент «Сура-МКС» (2 октября 2007 года) // Космонавтика и ракетостроение. 2009. Т. 4. С. 66–70.
- [Ружин и др., 2013] *Ружин Ю.Я., Кузнецов В.Д., Пластинин Ю.А., Карабаджак Г.Ф., Фролов В.Л., Парро М.* Авроральная активность, вызванная мощным радиоизлучением станда «Сура» // Геомагнетизм и аэрономия. 2013. Т. 53. № 1. С. 46–52.
- [Сильвестер Б. и др., 2005] *Сильвестер Б., Сильвестер Я., Кемпа А., Кордылевски З., Филипс К.Дж.Х., Кузнецов В.Д.* Термодинамика избранных вспышек,

- определённая на основе анализа спектров полученных прибором РЕСИК // Астрон. вестн. 2006. Т. 40. № 2. С. 142–149.
- [Сильвестер Я. и др., 2005] *Сильвестер Я., Сильвестер Б., Кордылевски З., Филиппс К. Дж. Х., Кузнецов В. Д., Болдырев С. И.* Наблюдения солнечных рентгеновских спектров спектрометрами РЕСИК и ДИАГЕНЕСС с борта спутника «КОРОНАС-Ф» // Астрон. вестн. 2005. Т. 39. № 6. С. 537–548.
- [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. Вып. 1. С. 108–112.
- [Цветков и др., 2011а] *Цветков Ю. П., Кузнецов В. Д., Головков В. П., Брехов О. М., Пелле В. А., Крапивный А. В., Николаев Н. С.* Выделение аномального магнитного поля Земли из аэростатных магнитных съёмок на высотах 20...40 км // Докл. АН. 2011. Т. 436. № 2. С. 262–266.
- [Цветков и др., 2011б] *Цветков Ю. П., Головков В. П., Кузнецов В. Д., Брехов О. М., Пелле В. А.* Способ выделения составляющих индукции аномального магнитного поля Земли: Патент на изобретение. № 2437125. 20.12.2011. Оpubл. Бюл. № 35.
- [Черников и др., 2009] *Черников С. П., Цветков Ю. П., Брехов О. М., Крапивный А. В., Николаев Н. С.* Компьютерная модель динамики процесса автоматического развёртывания аэростатного магнитного градиентометра // Датчики и системы. 2009. Т. 6. С. 20–23.
- [Чертюк и др., 2005] *Чертюк И. М., Гречнев В. В., Слемзин В. А.* и др. Проявления корональных выбросов массы в крайнем УФ-диапазоне по данным телескопа СПИРИТ на ИСЗ «КОРОНАС-Ф» // Астрон. вестн. 2005. Т. 39. № 6. С. 517.
- [Чмырев и др., 1986] *Чмырев В., Биличенко С., Казанская Ю.* и др. Авроральные частицы, связанные с нелинейными альвеновскими волнами // Геомагнетизм и аэрномия. 1986. Т. 26. № 2. С. 275–281.
- [Alpert, 2000] *Alpert Ya.* Making waves: stories from my life. New Haven; L.: Yale University Press, 2000.
- [Axford et al., 1998] *Axford W. I., Marsch E., Oraevsky V. N., Kuznetsov V. D., Breus T. K., Schween R., Ip W.-H., Ksanfomality L. V., Tomas N., Kogan A., Utkin V. F., Uspen-sky G. R.* Space Mission for Exploration of the Sun, Mercury and Inner Heliosphere (InterHelios) // Advances in Space Research. 1998. V. 21. No. 1/2. P. 275–289.
- [Belyaev et al., 2012] *Belyaev G., Bankov N., Boychev B., Kostin V., Trushkina E., Ovcha-renko O.* Observation of Plasma Oscillation Structures in External Ionosphere over Cyclones // Sun and Geosphere. 2012. No. 7. P. 51–55.
- [CORONAS-F..., 2014] The CORONAS-F Space Mission. Key Results for Solar Terrestrial Physics / Ed. Kuznetsov V.; Astrophysics and Space Science Library. V. 400. Springer, 2014. 520 p.
- [Ferencz et al., 2009] *Ferencz O. E., Bodna'r L., Ferencz C., Hamar D., Lichtenberger J., Steinbach P., Korepanov V., Mikhaylova G., Mikhaylov Y., Kuznetsov V.* Ducted whistlers propagating in higher-order guided mode and recorded on board of Compass-2 satellite by the advanced Signal Analyzer and Sampler SAS2 // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. A03213. doi: 10.1029/2008. JA013542.
- [Karpachev et al., 2012] *Karpachev A. T., Klimenko M. V., Klimenko V. V., Zhibankov G. A., Telegin V. A.* Latitudinal structure of the equatorial F3 layer based on Intercosmos-19 topside sounding data // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2012. V. 77. P. 186–193.
- [Karpachev et al., 2013] *Karpachev A. T., Klimenko M. V., Klimenko V. V., Kuleshova V. P.* Statistical study of the F3 layer characteristics retrieved from Intercosmos 19 satellite data // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2013. V. 103. No. 10. P. 121–128.

- [Kepa et al., 2006] *Kepa A., Sylwester J., Sylwester B., Siarkowski M., Phillips K. J. H., Kuznetsov V. D.* Observations of $1s^2$ – $1s$ np and $1s$ –np lines in RESIK soft X-ray spectra // *Advances in Space Research*. 2006. V. 38. Iss. 7. P. 1538–1542.
- [Klimenko et al., 2012a] *Klimenko M. V., Klimenko V. V., Karpachev A. T.* Formation mechanism of additional layers above regular F_2 layer in the near-equatorial ionosphere during quiet period // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2012. P. 179–185. doi: 10.1016/j.jastp.2012.02.011.
- [Klimenko et al., 2012b] *Klimenko M. V., Zhao B., Karpachev A. T., Klimenko V. V.* Stratification of the low-latitude and near-equatorial F_2 layer, topside ionization ledge, and F_3 layer. What we know about this? : Review // *Intern. J. Geophysics*. 2012. ID 938057. doi: 10.1155/2012/938057.
- [Kuznetsov, 2004a] *Kuznetsov V. D.* The Solar Observatory CORONAS-F: Three Years of Observation of Solar Activity // *COSPAR Information Bulletin*. No. 161. December 2004. P. 90–93.
- [Kuznetsov, 2004b] *Kuznetsov V. D.* Coordination of observations and data analyses for CORONAS-F, SOHO and related projects // *Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity: Proc. IAU Symp.* / Eds. A. V. Stepanov, E. E. Benevolenskaya, A. G. Kosovichev. 2004. No. 223. P. 693–698.
- [Kuznetsov, 2006] *Kuznetsov V. D.* CORONAS-F Mission. Observations of the Sun and manifestations of solar activity // *Newsletter of the European Astronomical Society (EAS)*. Iss. 32. December 2006. P. 9–10.
- [Kuznetsov, 2008] *Kuznetsov V. D.* Observations of the Sun-Earth System within the CORONAS-F mission // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2008. V. 70. Iss. 2–4. P. 234–240.
- [Kuznetsov, Oraevsky, 2002] *Kuznetsov V. D., Oraevsky V. N.* ‘Polar Ecliptic Patrol’ (PEP) for Solar Studies and Monitoring of Space Weather // *J. British Interplanetary Society*. 2002. V. 55. N. 11/12. P. 398–403.
- [Kuznetsov et al., 2011] *Kuznetsov V. D., Sobelman I. I., Zitnik I. A., Kuzin S. V., Kotov Yu. D., Charikov Yu. E., Kuznetsov S. N., Mazets E. P., Nusinov A. A., Pankov A. M., Sylwester J.* Results of solar observations by the CORONAS-F payload // *Adv. Space Res.* 2011. V. 47. Iss. 9. P. 1538–1543.
- [Marsch et al., 1997] *Marsch E., Axford W. I., Ip W.-H., Tomas N., Schwenn R., Oraevsky V. N., Kuznetsov V. D., Breus T., Ksanfomality L. V., Kogan A. Yu.* InterHelios – Sun and Mercury Observer // *Physics and Chemistry of the Earth*. 1997. V. 22. No. 5. P. 469–479.
- [Mikhailov et al., 2000] *Mikhailov Y. M., Mikhailova G. A., Kapustina O. V.* VLF effects in the outer ionosphere from the underground nuclear explosion on Novaya Zemlya island on 24 October, 1990 (INTERCOSMOS 24 satellite data) // *Phys. Chem. Earth*. 2000. V. 25. No. 1. P. 93–96.
- [Mikhailov et al., 2010] *Michailov Yu. M., Kuznetsov V. D., Ferencz C., Bondar L., Korepanov V. E., Michailova G. A., Korsunova L. P., Khagai V. V., Smirnov S. E., Kapustina O. V.* COMPASS 2 Satellite and Ground-Based Experiments // *The Atmosphere and Ionosphere. Physics of Earth and Space Environments* / Eds. V. Bychkov, G. Golubkov, A. Nikitin. 1st ed. Springer, 2010. Ch. 4. P. 147–173.
- [Oraevsky, Triska, 1993] *Oraevsky V. N., Triska P.* Active plasma experiment Project APEX // *Adv. Space Res.* 1993. V. 13. No. 10. P. 103–111.
- [Phillips et al., 2010] *Phillips K. J. H., Sylwester J., Sylwester B., Kuznetsov V. D.* The solar X-ray continuum measured by RESIK // *Astrophys. J.* 2010. V. 711. Iss. 1. P. 179–184.
- [Riedler et al., 1986] *Riedler W., Schwingenschuh K., Yeroshenko Y. G., Styashkin V. A., Russell C. T.* Magnetic field observations in comet Halley’s coma // *Nature*. 1986. V. 321. P. 288–289. doi: 10.1038/321288a0.

- [Riedler et al., 1989] *Riedler W., Möhlman. D., Oraevsky V.N., Scwingenschuh K., Yeroshenko Y., Slavin J. et al.* Magnetic fields near Mars: first results // *Nature*. 1989. V. 341. No. 6243. P. 604–607.
- [Shubin et al., 2013] *Shubin V.N., Karpachev A.T., Tsybulya K.G.* Global model of the F2 layer peak height for low solar activity based on GPS radio-occultation data // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2013. V. 104. P. 106–115.
- [Sylwester B. et al., 2006] *Sylwester B., Sylwester J., Siarkowski M., Phillips K.J.H., Culhane J.L., Lang J., Brown C., Kuznetsov V.D.* Lines in the Range 3.2...6.1 Å Observed in RESIK Spectra // *Advances in Space Research*. 2006. V. 38. P. 1534–1537.
- [Sylwester J. et al., 2005] *Sylwester J., Gaicki I., Kordylewski Z., Kowalinski M., Novak S., Plocieniak S., Siarkowski M., Sylwester B., Trzebinski W., Culhane J.L., Whyndham M., Bentley R.D., Guttridge P.R., Lang J., Phillips K.J.H., Brown C.M., Doschek G.A., Oraevsky V.N., Kuznetsov V.D., Stepanov A.I., Lisin D.V.* RESIK — Bent crystal solar X-ray spectrometer for studies of Coronal Plasma Composition // *Solar Physics*. 2005. V. 226. No. 1. P. 45–72.
- [Sylwester J. et al., 2008] *Sylwester J., Sylwester B., Landi E., Phillips K.J.H., Kuznetsov V.D.* Determination of K, Ar, Cl, S, Si and Al flare abundances from RESIK soft X-ray spectra // *Advances in Space Research*. 2008. V. 42. Iss. 5. P. 838–843.
- [Sylwester J. et al., 2010a] *Sylwester J., Sylwester B., Phillips J.H., Kuznetsov V.D.* Highly Ionized Potassium Lines in Solar X-ray Spectra and the Abundance of Potassium // *Astrophysical J.* 2010. V. 710. P. 804–809.
- [Sylwester J. et al., 2010b] *Sylwester J., Sylwester B., Phillips K.H., Kuznetsov V.D.* A Solar spectroscopic absolute abundance of argon from RESIK // *Astrophysical J.* 2010. V. 720. P. 1721–1726.
- [Sylwester J. et al., 2012] *Sylwester J., Sylwester B., Phillips K.J.H., Kuznetsov V.D.* The Solar Flare Sulphur Abundance from RESIK Observations // *Astrophysical J.* 2012. V. 751. No. 2. P. 103.

SPACE RESEARCH AT IZMIRAN

V.D. Kuznetsov

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

The space studies carried out at IZMIRAN since the very beginning of the space era have been reviewed briefly from the world first radio beacon experiment on board the first artificial Earth satellite (1957) to present-day experiments on board the modern space observatories (Intercosmos 19, APEX, CORONAS-F, etc.). Space studies encompass more or less the whole range of research areas dealt with at IZMIRAN, such as the physics of the ionosphere, magnetic fields of the Earth and planets, solar physics, and solar-terrestrial coupling. The main experimental results of a number of space missions are given along with a description of several future space projects planned at IZMIRAN.

Keywords: space missions, ionosphere, Earth magnetic field, solar physics, solar-terrestrial relations.

Kuznetsov Vladimir Dmitrievich — director, doctor of physical and mathematical sciences, kvd@izmiran.ru