

PACS numbers: 07.87.+v, 94.20.-y, 94.80.+g
DOI: 10.3367/UFNr.0180.2010051.0554

Космические исследования Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН

В.Д. Кузнецов

1. Введение

Космические исследования Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН) охватывают все основные направления деятельности института — изучение ионосферы и распространения радиоволн, магнетизма Земли и планет, солнечно-земной физики. За 70 лет своей истории, из которых уже более 50 лет связаны с космическими исследованиями, 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, КОРОНАС-Ф, "Компас-2".

В последние годы заметный прогресс в проводимых институтом исследованиях неразрывно связан с измерениями на космических аппаратах. Космические 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 и всестороннего анализа наблюдательных данных в сопоставлении с теоретическими моделями.

Следует отметить, что в 1957 г. на Первом ИСЗ ИЗМИРАН реализовал первый в мире космический эксперимент, в котором с помощью радиомаяка наблюдались эффекты радиовосхода и радиозахода спутника и были изучены внешние слои ионосферы [1, 2] (рис. 1). Ещё до запуска Первого ИСЗ сотрудником ИЗМИРАН тех лет

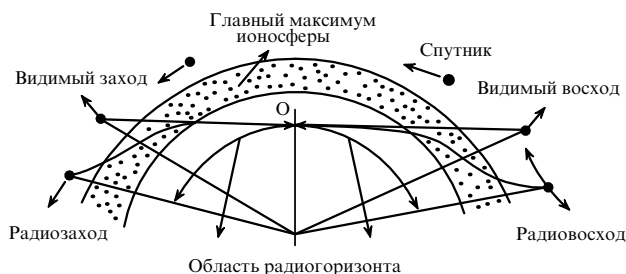


Рис. 1. Наблюдение радиовосхода и радиозахода Первого ИСЗ, которые возникали соответственно раньше и позднее оптических восхода и захода спутника за горизонт вследствие эффекта рефракции радиоволн в ионосфере. (Адаптированный рисунок из [3].)

В.Д. Кузнецов. Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Троицк, Московская обл., РФ
E-mail: kvd@izmiran.ru

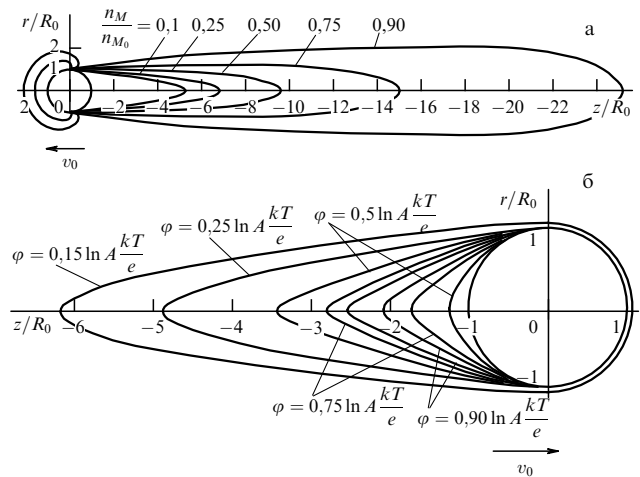


Рис. 2. (а) Кривые постоянной плотности частиц (числами показана величина разрежения плазмы). (б) Линии равнового потенциала в окрестности металлического спутника. (Из работ [4, 5].)

А.В. Гуревичем были выполнены первые теоретические расчёты взаимодействия металлического спутника с разрежённой ионосферной плазмой и получены распределения плотности и электрического потенциала в окрестности спутника [4, 5] (рис. 2), которые были важны для постановки и интерпретации различных спутниковых экспериментов и легли в основу последующих более детальных исследований по этой проблеме [6, 7].

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 по изучению космического пространства за пределами ОКП, относящиеся к исследованиям Солнца и планет Солнечной системы. Ниже даётся краткое обсуждение основных результатов, полученных при реализации космических проектов, состояния ведущихся космических исследований и перспектив дальнейших работ в этом направлении.

2. Космические исследования ионосферы

Изучение структуры внешней ионосферы, в которой сглаженное распределение электронной концентрации по высоте выше главного максимума впервые было установлено с использованием радиомаяка Первого ИСЗ [1, 2], было продолжено на спутнике "Интеркосмос-19" (1979–1982 гг.), с борта которого проводилось внешнее зондирование ионосферы разработанным ИЗМИРАН ионозондом [8]. Было выполнено зондирование над обширной территорией земного шара и проведено детальное шивание внутреннего и внешнего профилей электронной концентрации (рис. 3). "Интеркосмос-19", явившийся одним из наиболее успешных проектов в изучении ионосферы, дал огромный объём данных, на основе которых построено глобальное распределение параметров внешней ионосферы для разных моментов местного времени и разных условий; обнаружены новые элементы глобальной структуры ионосферы — кольцевой ионосферный провал и низкоширотный провал ионизации; исследованы долготные вариации параметров ионосферы, характеристики главного ионо-

Таблица. Космические проекты 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)", "Интеркосмос-24" (Активный), "Интеркосмос-25" (АПЭКС), "Прогноз-1 (-6, -7, -9)", "Интасат", АТС-6, "Цикада", "Ореол-3", "Интеркосмос-Болгария-1300", "Интербол", "Компас-2", аэростаты	"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
В стадии реализации (работающие)	КЭ* "Импульс" (РС МКС**), аэростатные эксперименты	КОРОНАС-Фотон (эксперимент "Сокол")
В стадии подготовки (опытно-конструкторские работы)	КЭ "Молния-гамма" (РС МКС), КЭ "Сейсмопрогноз-СМ" (РС МКС), КЭ "Гидроксил" (РС МКС), "Резонанс"	"Интергелиозонд", "Луна-Глоб", "Луна-Ресурс"
В стадии разработки (научно-исследовательские работы)	"Ионосат", "Геомат", ГЛОНАСС-Наука	ПЭП, "Система"

* КЭ — космический эксперимент.
** РС МКС — Российский сегмент Международной космической станции.

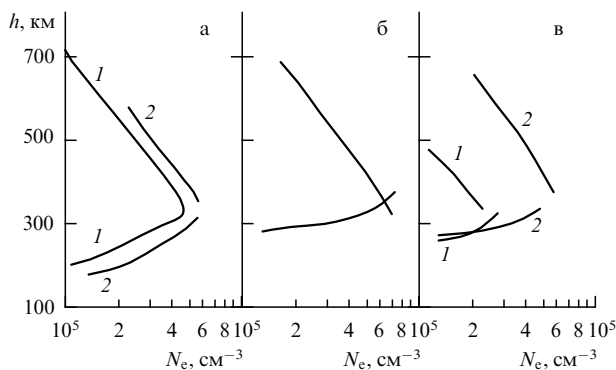


Рис. 3. Различные варианты стыковки профилей распределения электронной концентрации в ионосфере по данным наземных измерений (нижний профиль, малые высоты) и по данным спутника "Интеркосмос-19" (верхний профиль). Пары кривых 1 и 2 соответствуют разным наблюдениям.

сферного провала и его динамика во время магнитной бури, влияние B_z -компоненты межпланетного магнитного поля на изменение структуры экваториальной аномалии, явление F-рассеяния во внешней ионосфере, распространение радиоволн в области структурных особенностей ионосферы; построена модель внешнего $N_e(h)$ -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).

Спутниковые исследования ионосферы, магнитосферы и околоземной плазмы были продолжены в проектах "Активный" (ИСЗ "Интеркосмос-24", запуск 1989 г.), АПЭКС (Активные плазменные эксперименты) (ИСЗ "Интеркосмос-25", запуск 1991 г.), "Компас-2" (запуск 2006 г.).

На ИСЗ "Интеркосмос-24" ("Активный", 1989–1991 гг.) были обнаружены очень низкочастотные (ОНЧ) эффекты подземного ядерного взрыва на острове Новая

Земля 24 октября 1990 г. (широкополосные данные) [9]. В крайне низкочастотном диапазоне (КНЧ) (узкополосные данные) впервые наблюдались anomalно высокие абсолютные значения электрической компоненты поля во время тайфунов, главным образом над приэкваториальной областью Тихого океана. Проведенный анализ спектров свистящих атмосфериков при пролёте над сейсмоактивными регионами в различных геофизических условиях позволил разделить сейсмические и геомагнитные эффекты в D-области ионосферы.

На ИСЗ "Интеркосмос-25" (АПЭКС, 1991–1999 гг.) были выполнены активные эксперименты по инжекции плазменных пучков в ионосферную и магнитосферную плазму [10]. 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, проведены ионосферные измерения над областью работы нагревных стенов и зарегистрирован эффект нетуннельного прохождения радиоволн через волновой ионосферный барьер. Данные спутника АПЭКС применялись для отработки методов спутниковой радиотомографии с использованием сети наземных радиотомографических комплексов. Участие в этой работе отмечено присуждением в 1998 г. В.Н. Ораевскому и Ю.Я. Ружину в составе авторского коллектива Государственной премии в области науки и техники.

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 субспутником "Магион-3". Такая генерация высокоэнергичных заряженных частиц была обнаружена впервые. Регистрировались также потоки электронов с меньшими энергиями, которые свиде-

тельствовали о резонансных механизмах взаимодействия возбуждаемых волн с частицами фоновой плазмы при инжекции электронов. Возбуждение волн высокочастотного (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 развитие и апробацию в экспериментах на малом спутнике "Компас-2" (2006–2007 гг.). Совместно с Институтом космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения РАН в рамках совместных наземных и спутниковых измерений на малом космическом аппарате (МКА) "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 подготовительной фазы землетрясений. По измерениям вариаций напряжённости квазистатического электрического поля, интенсивности естественных ОНЧ-излучений ($f = 20 - 20000$ 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 (период $T = 0,5 - 3,3$ 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 посредством внутренних гравитационных волн. Установлено, что колебания с $T = 0,5 - 1,5$ ч усиливаются во время подготовительной фазы 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 активности. 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.

Кооперацией ряда научных организаций (Научно-исследовательский радиофизический институт, Центральный научно-исследовательский институт машиностроения) при координирующей роли ИЗМИРАН реализуется серия экспериментов по регистрации с борта Российского сегмента Международной космической станции (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. 4), 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 [11, 12]. Наблюдаемое свечение не могло быть вызвано непосредственно эффектами нагрева из-за малой мощности нагревного излучения, и, возможно, оно связано с высвобождением частиц из магнитной трубки, стимулированным эффектами модулированного нагрева, когда период модуляции нагревного излучения близок к периоду собственных альвеновских колебаний трубки. Продолжается обработка и анализ полученных данных, а также подготовка новых сеансов проведения эксперимента.

В эксперименте "Импульс" на РС МКС, реализуемом ИЗМИРАН в кооперации с Московским авиационным институтом (МАИ) в 2009–2010 гг., для изучения эффектов модификации ионосферы используется импульсный инжектор плазмы (скорость ионов около $30 - 40$ км s^{-1} , степень ионизации плазмы $\beta = 10\%$, периодичность инжекции $1,8 \pm 0,2$ Гц, длительность импульса порядка 10 мкс). Проведены пробные сеансы инжекции, осуществляются настройка аппаратуры и выбор оптимальных режимов её работы; предполагается регистрация эффектов инжекции бортовой аппаратурой и наземными средствами ИЗМИРАН в низкочастотном (НЧ), ультранизкочастотном (УНЧ), КНЧ- и ОНЧ-диапазонах частот.

В ИЗМИРАН ведётся разработка перспективных космических проектов по изучению ионосферы — серии экспериментов на РС МКС, спутникового проекта "Ионосат" и проекта по использованию Глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС).

В стадии подготовки для реализации на РС МКС находятся три космических эксперимента (КЭ): "Молния-гамма" — по исследованию атмосферных вспышек

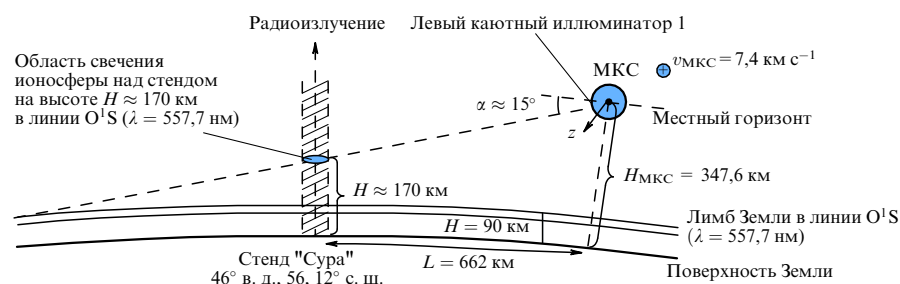


Рис. 4. Схема проведения эксперимента по регистрации с борта РС МКС воздействия радионагревного стенда "Сура" на ионосферу Земли.

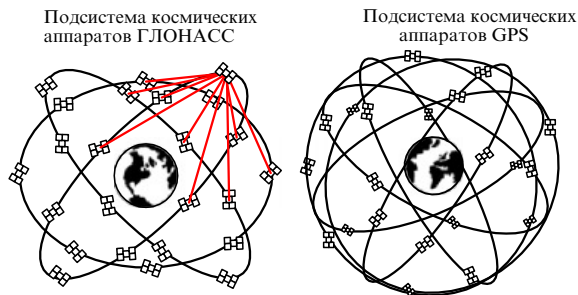


Рис. 5. Схема использования ГЛОНАСС для мониторинга и диагностики плазмосферы и магнитосферы Земли.

гамма и оптического излучения в условиях грозовой активности (2010 г.), "Сейсмопрогноз-СМ" — по исследованию физических явлений в ОКП, обусловленных процессами подготовки землетрясений и техногенными воздействиями (2011 г.), и "Гидроксил" — по изучению оптических излучений верхней атмосферы и её отклика на аномальные природные и техногенные явления (2012 г.).

Спутниковый проект "Ионосат" направлен на изучение ионосферы как индикатора солнечно-земных и литосферно-атмосферных взаимодействий. Этот спутник будет составной частью кластера из трёх близко расположенных спутников, предназначенных для изучения мелкомасштабной структуры и неоднородности ионосферы.

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

3. 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 г.) ИЗМИРАН провёл первый в мире эксперимент в космосе по измерению геомагнитного поля с использованием магнитометра СГ-45 (рис. 6) [13, 14]. Полученные данные позволили впервые сопоставить измеренное геомагнитное поле с различными вариантами его аналитического представления и выбрать из них наиболее верный. Показана также возможность использования геомагнитного поля для определения ориентации космического аппарата.

Впоследствии в серии спутниковых измерений была выполнена мировая магнитная съёмка. На спутниках "Космос-26" (1964 г.) и "Космос-49" (1964 г.) протонным магнитометром ПМ-4, разработанным в ИЗМИРАН, измерениями было покрыто 75 % поверхности Земли и

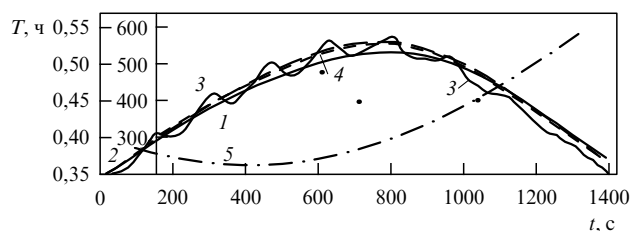


Рис. 6. Магнитограммы измеренных и вычисленных значений геомагнитного поля вдоль траектории третьего ИСЗ: 1, 2 — расчётные, 3 — измеренная, 4 (штриховая) — измеренная, с вычетом девиации. Кривая 5 — высота спутника (в километрах).

было установлено, что магнитные аномалии, связанные со строением и тектоникой земной коры, простираются до высот низколетящих спутников [15, 16]. Данные этих измерений вошли в Международную аналитическую модель геомагнитного поля эпохи 1965 г. На спутнике "Космос-321" (1970 г.) квантовым цезиевым магнитометром ИЗМИРАН геомагнитное поле было измерено на 94 % поверхности Земли [17]. Эти данные позволили изучить магнитные эффекты продольных токов в высокоширотных областях ионосферы, определить магнитные эффекты, обусловленные экваториальной токовой струёй, и 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 "Электрон-4" (1964 г., 1965 г.) 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, построить первую модель магнитосферы Земли, учитывающую формирование хвоста, изучить высотное-временное распределение электронной концентрации и неоднородные образования внешней ионосферы [18]. На спутнике "Интеркосмос-Болгария-1300" (1981 г.) были выполнены исследования продольных токов в приполярной ионосфере Земли, сильных скачков электрического поля и потоков частиц в полярной ионосфере [19].

В рамках космических проектов "Прогноз" (1971–1985 г.), "Интербол" (1995–2000 г.) (головная организация Институт космических исследований (ИКИ) РАН), с использованием магнитометров ИЗМИРАН были проведены магнитные измерения во внешней магнитосфере Земли и в межпланетном пространстве [20]. На основе полученных магнитных данных в комплексе с плазменными измерениями в проекте "Интербол" была исследована тонкая структура внешних границ и слоёв магнитосферы, которые включали в себя: отошедшую ударную волну, магнитопаузу, магнитослой и пограничный слой [21]. 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 [22].

Успешные магнитные измерения в околоземном космическом пространстве позволили проводить аналогичные измерения на межпланетных станциях при изучении планет и малых тел Солнечной системы. На основе анализа первых магнитных измерений, которые выполнил ИЗМИРАН с помощью автоматических межпланетных станций "Луна-2" (1959 г.) и "Луна-10" (1966 г.), было установлено, что Луна не имеет дипольного магнитного поля значительной интенсивности [23].

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

Магнитные измерения на "Луноходе-2" (1973 г.) позволили установить корреляцию локальных магнитных полей (6–300 нТл) с тектоническими особенностями рельефа (кратерами, разломами и т.д.) [24].

В образцах лунного грунта, доставленного на Землю, обнаружена достаточно сильная остаточная намагниченность, которую горные породы приобрели в полях от нескольких тысяч до 100 000 нТл. Изучение природы этой намагниченности, прежде неизвестной, представляет собой одну из фундаментальных и ещё не решённых проблем в исследовании Луны. Участие ИЗМИРАН с магнитными измерениями в готовящихся проектах "Луна-Глоб" (орбитальный лунный спутник) и "Луна-Ресурс" (посадочный модуль) направлено на решение этой важной проблемы в происхождении Луны.

Магнитные измерения при изучении планет Венера и Марс в серии проектов "Венера-4" (1967 г.), "Венера-9" и "Венера-10" (1975 г.), "Марс-2 (-3, -5)" (1972–1974 гг.) позволили установить, что Венера и Марс не обладают собственным дипольным полем, а их магнитосферы, подобно кометной, являются индуцированными. У Венеры и Марса обнаружены и исследованы головная ударная волна и плазменно-магнитный шлейф [25, 26]. В проектах "Фобос-2" (1989 г.) и "Вега-1 (-2)" (1986 г.) изучены особенности взаимодействия солнечного ветра с кометой Галлея и со средой вблизи Фобоса [27, 28].

Магнитные измерения на аэростатах позволяют получить данные о геомагнитном поле на низких высотах и детально изучать магнитные аномалии на поверхности Земли, скорректировать модели геомагнитного поля, подверженного непрерывным изменениям. В 2007–2009 г. в ИЗМИРАН выполнены пионерские аэростатные эксперименты по измерению и использованию вертикальных градиентов геомагнитного поля в стратосфере с помощью разработанного в ИЗМИРАН аэростатного магнитного градиентометра [29]. Этот прибор, который является эксклюзивной разработкой ИЗМИРАН, не имеет аналогов в мировой практике исследований геомагнетизма. Созданы методики выделения поля магнит-

ных аномалий по данным аэростатных градиентных магнитных съёмок, изучен амплитудный спектр магнитных аномалий вдоль траектории аэростатного пролёта от Камчатки до Поволжья, в котором выделены региональные и длинноволновые магнитные аномалии. Различными, в том числе 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 даёт возможность добиться удовлетворительного согласования экспериментальных данных с теоретическими моделями генерации геомагнитного поля, продвинуться в изучении магнитных свойств земной коры, магнитных аномалий и других особенностей распределения геомагнитного поля.

4. Солнечная и солнечно-земная физика

За последнее время, начиная с 90-х годов прошлого столетия, ИЗМИРАН расширил направление своих космических исследований: при головной роли ИЗМИРАН были реализованы два крупных космических проекта по исследованию Солнца — КОРОНАС-И и КОРОНАС-Ф, являющиеся составной частью программы КОРОНАС (Комплексные орбитальные околоземные наблюдения активности Солнца) [30, 31].

С использованием данных со спутника КОРОНАС-Ф проведены исследования корональных выбросов массы (КВМ) и связанных с ними проявлений солнечной активности, имеющих высокую степень геоэффективности [32]. 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 ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения (димминги) визуализируют структуры, вовлечённые в процесс КВМ, которые, 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 (Дифференциальный фотометр осцилляций Солнца) выполнены наблюдения флуктуаций яркости Солнца в диапазоне длин волн от ультрафиолетовой области спектра до инфракрасной и изучены глобальные колебания Солнца. Построены спектры мощности глобальных колебаний для р-мод со степенями $l = 0, 1, 2$ (рис. 7) [33, 34]. Экспериментально показано частотное расщепление р-мод вследствие вращения Солнца. Обнаружено наличие несинфазных длиннопериодных вариаций амплитуд р-мод глобальных колебаний Солнца, отражающих внутреннюю динамику Солнца, установлено заметное возрастание амплитуды глобальных колебаний в ультрафиолетовой области спектра. Наблюдения глобальных колебаний Солнца продолжены в эксперименте СОКОЛ (Солнечные коле-

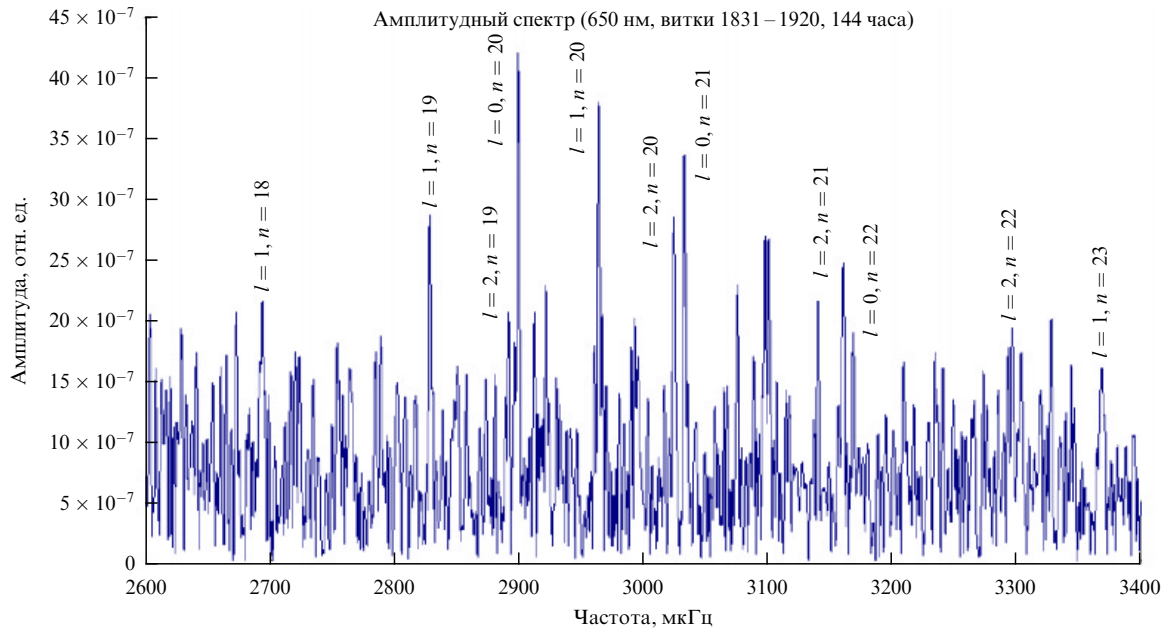


Рис. 7. Амплитудный спектр глобальных колебаний Солнца, полученный по данным эксперимента "ДИФОС" на спутнике КОРОНАС-Ф.

бания) на спутнике КОРОНАС-Фотон (запущен 30 января 2009 г.). Работы по проекту КОРОНАС-Ф удостоены Премии Правительства в области науки и техники за 2008 г.

В течение последних лет ИЗМИРАН ведёт разработку перспективных солнечных космических проектов: проекта "Интергелиозонд" для исследований Солнца с близких расстояний и проекта "Полярно-эклиптический патруль" (ПЭП) для наблюдений глобальной активности Солнца и изучения солнечных источников космической погоды [22, 35]. В проекте "Интергелиозонд" для сближения с Солнцем предполагается использовать многократные гравитационные маневры у Венеры за счёт соизмеримости периодов обращения космического аппарата и Венеры вокруг Солнца. Гравитационные маневры позволяют также осуществить наклон плоскости орбиты космического аппарата к плоскости эклиптики. В проекте ПЭП два космических аппарата предполагается расположить на наклонённых в разные стороны гелиоцентрических орбитах на расстоянии 0,5 а.е. от Солнца и сдвинуть их на орбитах относительно друг друга на четверть периода, так что линия Солнце – Земля и плоскость эклиптики, в которой происходит большая часть выбросов массы и других активных явлений, будет непрерывно контролироваться из внеэклиптического положения (рис. 8).

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 находится на наклонной орбите. Такая конфигурация системы космических аппаратов даст возможность осуществить глобальный контроль солнечной активности, а проекты "Интергелиозонд" и ПЭП рассматриваются как первый шаг на пути формирования такой системы.

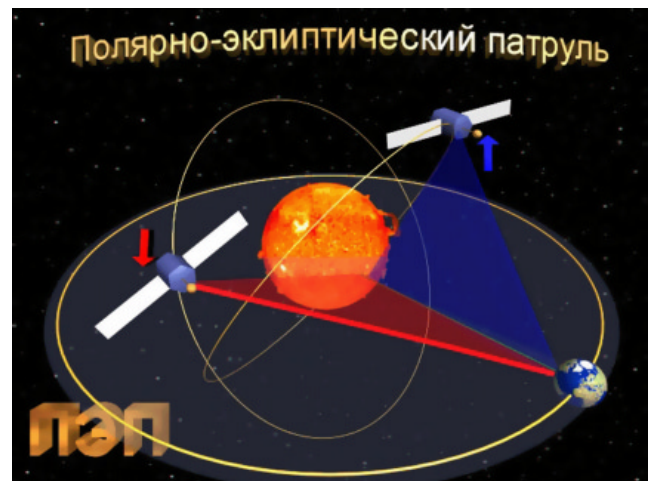


Рис. 8. Баллистическая схема проекта "Полярно-эклиптический патруль" для наблюдений глобальной активности Солнца и изучения солнечных источников космической погоды.

5. Заключение

В настоящем докладе представлен лишь краткий обзор космических исследований ИЗМИРАН, начиная с первого в мире научного космического эксперимента с использованием радиомаяка Первого ИСЗ (1957 г.) и заканчивая теми космическими проектами, которые сейчас работают к космосу и разрабатываются на перспективу. Перечень таких проектов приведён в таблице. Разрабатываемые космические проекты направлены на решение целой серии научных задач, которые ставят современные исследования 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 усилением зависимости

создаваемых космических технологий от космической погоды — состояния околоземного космического пространства — ионосферы и геомагнитного поля.

Список литературы

1. Альперт Я Л *УФН* **64** 3 (1958)
2. Альперт Я Л и др. *УФН* **65** 161 (1958)
3. Alpert Ya *Making Waves: Stories from My Life* (New Haven: Yale Univ. Press, 2000)
4. Гуревич А В, в сб. *Труды ИЗМИРАН* **17** (27) 173 (1960)
5. Гуревич А В *Искусственные спутники Земли* (7) 101 (1961)
6. Альперт Я Л, Гуревич А В, Питаевский Л П *УФН* **79** 23 (1963) [Al'pert Ya L, Gurevich A V, Pitaevskii L P *Sov. Phys. Usp.* **6** 13 (1963)]
7. Альперт Я Л, Гуревич А В, Питаевский Л П *Искусственные спутники в разреженной плазме* (М.: Наука, 1964) [Al'pert Ya L, Gurevich A V, Pitaevskii L P *Space Physics with Artificial Satellites* (New York: Consultants Bureau, 1965)]
8. Карпачев А Т, в кн. *Энциклопедия низкотемпературной плазмы* Т. 1–3 *Ионосферная плазма* Ч. 1 (Под ред. В Д Кузнецова, Ю Я Ружина) (М.: Янус-К, 2008) с. 381
9. Mikhailov Yu M, Mikhailova G A, Kapustina O V *Phys. Chem. Earth C* **25** 93 (2000)
10. Oraevsky V N, Triska P *Adv. Space Res.* **13** (10) 103 (1993)
11. Ружин Ю Я, Иванов К Г, Кузнецов В Д, Петров В Г *Геомагнетизм и аэронавигация* **49** 342 (2009) [Ruzhin Yu Ya, Ivanov K G, Kuznetsov V D, Petrov V G *Geomagn. Aeron.* **49** 324 (2009)]
12. Ружин Ю Я и др. *Космонавтика и ракетостроение* (4) 66 (2009)
13. Долгинов Ш Ш, Жузгов Л Н, Пушков Н В *Искусственные спутники Земли* (2) 50 (1958)
14. Долгинов Ш Ш, Пушков Н В, в сб. *Успехи СССР в исследовании космического пространства* (Под ред. А А Благоднарова и др.) (М.: Наука, 1968) с. 173
15. Долгинов Ш Ш и др. *Итоги науки и техники. Сер. Исследование космического пространства* (М.: Наука, 1965) с. 606
16. Долгинов Ш Ш и др. *Каталог измеренных и вычисленных значений модуля напряженности геомагнитного поля вдоль орбит спутника "Космос-49"* Ч. 1–3 (М.: ИЗМИРАН, 1967)
17. Долгинов Ш Ш и др. *Каталог измеренных и вычисленных значений модуля напряженности геомагнитного поля вдоль орбит спутника "Космос-321"* (М.: Наука, 1976)
18. Альперт Я Л, Синельников В М *Геомагнетизм и аэронавигация* **5** 209 (1965)
19. Чмырев В М и др. *Геомагнетизм и аэронавигация* **26** 2 275 (1986)
20. Иванов К Г, Стяжкин В А, Харшиладзе А Ф *Геомагнетизм и аэронавигация* **29** 304 (1989) [Ivanov K G, Styazhkin V A, Kharshiladze A F *Geomagn. Aeron.* **29** 265 (1989)]
21. Стяжкин В А и др. *Космические исследования* **36** (1) 108 (1998) [Styazhkin V A et al. *Cosmic Res.* **36** 103 (1998)]
22. Кузнецов В Д, Зеленый Л М, в сб. *Солнечно-земная физика* Вып. 12 *Труды Междунар. симпозиума "Международный гелиофизический год — 2007: новый взгляд на солнечно-земную физику, Звенигород, 5–11 ноября 2007 г.* Т. 1 (Новосибирск: Ин-т солнечно-земной физики РАН, 2008) с. 83
23. Долгинов Ш Ш и др. *Геомагнетизм и аэронавигация* **1** (1) 21 (1961)
24. Долгинов Ш Ш и др., в сб. *Космохимия Луны и планет: Труды советско-американской конф. по космохимии Луны и планет* (Отв. ред. А П Виноградов) (М.: Наука, 1975) с. 314
25. Долгинов Ш Ш, Ерошенко Е Г, Жузгов Л Н *Космические исследования* **6** 561 (1968) [Dolginov Sh Sh, Eroshenko E G, Zhuzgov L N *Cosmic Res.* **6** 469 (1968)]
26. Долгинов Ш Ш и др. *ДАН СССР* **218** 795 (1974) [Dolginov Sh Sh et al. *Sov. Phys. Dokl.* **19** 618 (1974)]
27. Riedler W et al. *Nature* **341** 604 (1989)
28. Riedler W et al. *Nature* **321** 288 (1986)
29. Черников С П и др. *Датчики и системы* (6) 20 (2009)
30. Кузнецов В Д, Житник И А, Собельман И И *Вестн. РАН* **75** 704 (2005) [Kuznetsov V D, Zhitnik I A, Sobel'man I I *Herald Russ. Acad. Sci.* **75** 370 (2005)]
31. Кузнецов В Д, в сб. *Солнечно-земная физика: результаты экспериментов на спутнике КОРОНАС-Ф* (Под ред. В Д Кузнецова) (М.: Физматлит, 2009) с. 10
32. Черток И М и др. *Астрон. вестн.* **39** 517 (2005) [Chertok I M et al. *Solar Syst. Res.* **39** 462 (2005)]
33. Кузнецов В Д *УФН* **176** 319 (2006) [Kuznetsov V D *Phys. Usp.* **49** 305 (2006)]
34. Жугжда Ю Д, Кузнецов В Д, Лебедев Н И, в сб. *Солнечно-земная физика: результаты экспериментов на спутнике "КОРОНАС-Ф"* (Под ред. В Д Кузнецова) (М.: Физматлит, 2009) с. 34
35. Кузнецов В Д, в кн. *Пятьдесят лет космических исследований: по материалам Междунар. форума "Космос: наука и проблемы XXI века", октябрь 2007 года, Москва* (Под ред. А В Захарова) (М.: Физматлит, 2009) с. 60