

ИЗМИРАН ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА (ДВАДЦАТЬ ПЯТЬ ЛЕТ СПУСТЯ)*

В. Д. Кузнецов

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

ВВЕДЕНИЕ

В статье В. В. Мигулина «ИЗМИРАН вчера, сегодня, завтра» в сборнике «Электромагнитные и плазменные процессы от Солнца до ядра Земли», изданной в 1989 г. в издательстве «Наука» в связи с пятидесятилетием ИЗМИРАН, кратко описана история возникновения науки по земному магнетизму и становлению исследований в этой области в нашей стране, приведшая к созданию в 1939 г. Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн. За прошедшие последние 25 лет институтом были продолжены исследования по основным научным направлениям — физике Солнца и межпланетного пространства, ионосфере и распространению радиоволн, земному магнетизму и магнетизму планет, а также в смежных областях — по геофизике и астрофизике. Дальнейшее развитие получили обсерваторские наблюдения, экспериментальные исследования в указанных научных направлениях, связанные с использованием наземных и космических средств наблюдений и измерений, работы по созданию моделей магнитного поля Земли, а также теоретические работы.

В сентябре 2004 г. решением Президиума Российской академии наук институту было присвоено имя Николая Васильевича Пушкова — основателя и первого директора ИЗМИРАН. Именно Н. В. Пушковым были заложены и развиты основные научные направления деятельности института и подчеркнута связь происходящих в системе Солнце-Земля явлений — связь состояния геомагнитного поля и ионосферы с солнечной активностью, изучение которой является фундаментальной проблемой солнечно-земной физики и важно на практике для решения широкого круга прикладных задач, таких как радиосвязь, навигация, геоэкология и т. д.

В настоящее время в состав ИЗМИРАН, помимо головной части в Троицке (Москва), входят Санкт-Петербургский филиал с обсерваторией в пос. Воейково Ленинградской обл., Филиал в Калининграде с обсерваторией в пос. Ульяновка, экспедиционный пункт в Карпагорах Архангельской обл., Владикавказский филиал, созданный в 2000 г. совместным решением Президиума РАН и Правительства Северная Осетия — Алания для экспериментальных ионосферных исследований и изучения литосферно-ионосферных связей в сейсмоактивном регионе Кавказа на основе совместных наземных и спутниковых наблюдений.

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

* Данная статья является переработанным и дополненным вариантом статьи автора (*Кузнецов В. Д.* Электромагнитные и плазменные процессы в системе Солнце-Земля: К 70-летию ИЗМИРАН: Обзор // Геомагнетизм и аэрномия. 2009. Т. 49. № 6. С. 1–13).

С момента учреждения институтом журнала «Геомагнетизм и аэрономия» в 1961 г. продолжалась работа сотрудников института в редакции журнала. Большая работа по укреплению журнала за последние годы была проделана его главным редактором О. М. Распоповым, заместителем главного редактора К. Г. Ивановым, сотрудниками Г. М. Михайловой, А. Х. Депеневой, А. Е. Левитиным и другими членами редколлегии журнала. Тематика журнала расширена, в нём публикуются результаты исследований по различным направлениям солнечно-земной физики. Сегодня он стал одним из основных журналов в этой области. В декабре 2013 г. главным редактором журнала назначен директор ИЗМИРАН В. Д. Кузнецов.

Институтом велась работа по координации исследований по изучению явлений в системе Солнце–Земля в рамках Научного совета РАН по физике солнечно-земных связей. В 2004 г. Совет возглавил директор Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук в Иркутске академик Г. А. Жеребцов. Активную роль в работе Совета принимают В. Н. Обридко, М. Г. Деминов, а также В. Д. Кузнецов, который является также членом бюро Международного комитета по солнечно-земной физике (SCOSTEP — Scientific Committee on Solar-Terrestrial Physics).

На протяжении многих лет продолжается международное сотрудничество института по основным направлениям деятельности. Со времён программы ИНТЕРКОСМОС ведётся сотрудничество в области фундаментальных космических исследований с болгарскими и польскими специалистами. За достижения в области исследований Солнца в рамках проекта КОРОНАС-Ф (Комплексные Орбитальные Околоземные Наблюдения Активности Солнца) (2001–2005) сотрудники института В. Д. Кузнецов и Д. В. Лисин в составе авторского коллектива удостоены совместной премии Российской и Польской академии наук по физике за 2010 г. Сотрудничество с польскими учёными в этом направлении продолжается в рамках российского космического проекта ИНТЕРГЕЛИОЗОНД. В рамках этого проекта ведётся также сотрудничество с австрийскими и немецкими специалистами по созданию магнитометра.

Сформировавшийся в течение многих лет коллектив института ведёт фундаментальные исследования по всем основным научным направлениям, выполняет прикладные работы в интересах ряда ведомств, активно участвует в исследовательских работах по грантам и целевым программам.

В период с 1989 по 2004 г. директором института был утверждён доктор физико-математических наук, профессор В. Н. Ораевский, с 2004 г. — доктор физико-математических наук В. Д. Кузнецов.

Следует отметить, что сложившаяся с момента образования института комплексность исследований разнообразных явлений и физических процессов в системе Солнце–Земля по-прежнему остаётся одной из характерных особенностей института. Участие в многочисленных программах и проектах с привлечением широкой кооперации институтов является необходимым для всесторонних исследований в области основных тематических направлений ИЗМИРАН: при изучении таких глобальных систем как Солнце, гелиосфера, магнитосфера Земли, ионосфера и т. д. Разнообразные наблюдения и измерения, методики их проведения, работа с большими массивами разнородных данных — всё это специфика про-

водимых в ИЗМИРАН исследований, подкрепляемая теоретическими работами, разработкой и реализацией целенаправленных экспериментов и программ. Такими комплексными проектами за последние 25 лет были солнечные космические проекты КОРОНАС-И и КОРОНАС-Ф, космический проект АПЭКС (Активные плазменные эксперименты), ионосферный космический проект КОМПАС-2, эксперименты с нагревным стендом СУРА и наблюдательными средствами Международной космической станции, в стадии подготовки находится солнечный космический проект ИНТЕРГЕЛИОЗОНД. Исследования в рамках этих реализованных проектов осуществлялись с участием широкой кооперации институтов при головной роли ИЗМИРАН.

В 2013 г. институт перешёл в ведение Федерального агентства научных организаций, сохраняя свою принадлежность к Российской академии наук в вопросах научной деятельности.

ДОСТИЖЕНИЯ ПОСЛЕДНИХ ЛЕТ

В области магнитных исследований в институте продолжались работы по изучению свойств магнитных полей Земли и планет Солнечной системы, теоретические работы по изучению механизмов генерации магнитных полей в космических условиях и недрах планет, экспериментальные работы по магнитометрии на основе квантовых явлений, разработка и создание магнитометрической аппаратуры.

Дальнейшее развитие получили работы по теории генерации магнитных полей планет и Солнца. Был разработан асимптотический алгоритм MEGA (метод максимально эффективной генерации), который позволил аналитически выявить преобладающие динамические структуры и критические условия генерации магнитного поля в кинематическом приближении средних магнитных полей. Используя наблюдательные данные, этот алгоритм позволил успешно описать физическую природу не только известной экваториальной волны активности магнитного поля Солнца, но и в значительной степени выявить ранее мало исследованную физическую природу полярной волны и активных долгот. Ярким результатом применения алгоритма MEGA стало полностью подтверждённое пролётом спутника Voyager предсказание структуры магнитного поля Нептуна. В последующих работах исследована полностью самосогласованная нелинейная система уравнений планетарного теплопереноса и магнетизма, на основе которой был достигнут заметный прогресс в теории генерации магнитных полей конвективным теплопереносом в глубинных недрах планет. Было получено аналитическое решение классической магнитогидродинамической (МГД) задачи о быстром и почти твёрдотельном вращении моделирующего ядро планеты проводящего сферического слоя жидкости в сильном потенциальном магнитном поле. Асимптотически и численно были определены пороги возбуждения, эволюционные и критические пространственно-временные характеристики конвекции в современных и древних жидких ядрах Земли, Венеры, Марса и подобных Земле спутников планет. На основе современных численных моделей динамо и наблюдательных

данных сделаны оценки динамических режимов, скорости течений, энтропии и магнитных полей в жидких ядрах Юпитера, Сатурна и Земли. Необычные по сравнению с Земным магнитные поля Урана, Нептуна, Меркурия и, возможно, Ганимеда объяснены не исследованным ранее балансом сил Архимеда, инерции и Лоренца в их глубинных недрах.

Заметный прогресс в изучении земного магнетизма связан с обработкой данных спутниковой съёмки компонент геомагнитного поля (низкоорбитальные спутники Magsat, Oersted, CHAMP, SWARM), которая выполнена с высокой точностью и почти полностью покрывает поверхность земного шара. Такие данные качественно изменили возможности сферического гармонического моделирования магнитного потенциала, позволили улучшить модели геомагнитного поля, детально изучить аномальное магнитное поле. Точность данных достигала первых единиц нанотесла, что позволило получить глобальные модели высокой точности, а высокочастотные отклонения данных от глобальных моделей позволили построить аномалии поля с размером ~ 3 км и меньше. Эти региональные аномалии явились надёжной основой для геологоразведочных приземных съёмок. С конца XX столетия до настоящего времени спутниковые съёмки велись непрерывно, что позволило построить модели векового хода. Были выделены классы моделей с разными пространственно-временными характеристиками. Скачкообразные изменения векового хода позволили рассчитать пространственно-временную структуру движения вещества на поверхности жидкого ядра и сопоставить их с вариациями полюса вращения Земли. Сопоставление мировых аномалий поля с 60-летними вариациями показало, что последние возникают на границах между мировыми аномалиями, это указывает на природу 60-летних вариаций в виде прорывов отдельных масс вещества сквозь жидкое ядро Земли. Мировая Бразильская аномалия оказалась своего рода магнитным островом, дрейфующим к западу между стабильными во времени мировыми аномалиями.

Дальнейшее развитие получили работы по использованию спутниковых данных для глобального магнитовариационного зондирования Земли. Была разработана и опробована методика обнаружения по спутниковым данным трёхмерных проводящих структур. Эта методика легла в основу одной из четырёх заявленных целей новой геомагнитной мультиспутниковой миссии SWARM по обнаружению трёхмерных неоднородностей в мантии Земли.

Разработаны новые подходы к совместной геофизической интерпретации аэростатных и спутниковых данных. На базе данных спутника Magsat создана методика выделения магнитных аномалий из спутниковых измерений полного поля. Особенно тщательно проработан вопрос устранения влияния переменных магнитных полей на выделяемые аномалии. В результате построены скалярные и векторные карты аномального магнитного поля для Европейского региона, прилегающих и других территорий. Выявлен и уточнён ряд интенсивных магнитных аномалий, подтверждающих магнитную неоднородность этих регионов, совпадающих с размерами их тектонических образований. На основе гармонического разложения на поверхности сферического сектора создана модель аномального магнитного поля, которая позволяет получать скалярные и векторные карты поля на

разных высотах и выполнять анализ его пространственной структуры для рассматриваемых территорий.

На основе спутниковых магнитовариационных измерений количественно исследована пространственно-временная структура трёхмерного (океанического) индукционного эффекта в полях от полярного электроджета. Проведённое моделирование показало, что в отличие от экваториального электроджета, индукционный эффект от которого пренебрежимо мал, этот эффект в полярных областях весьма существен, поскольку токовые системы расположены преимущественно над проводящим океаном. Индукционный эффект сильнее проявляется в Южной полярной шапке, как следствие большего (по сравнению с Северной полярной шапкой) объёма океанических масс в этом регионе. Данный эффект важен для изучения ионосферных токовых систем, в частности, наблюдаемого различия в амплитудах и геометрии полярных токовых систем в Северной и Южной полярных шапках.

Показано, что на континентах индукционный эффект в сигналах от экваториального электроджета (ЕЕJ) пренебрежимо мал, составляя порядка 1 % от внешнего поля. На высотах спутника CHAMP ($h \approx 400$ км) индукционный эффект от ЕЕJ незначителен как над континентами, так и над океанами. Полученные результаты дают основания считать, что при построении токовой системы ЕЕJ по наземным или спутниковым геомагнитным данным можно вполне пренебречь индукционным эффектом, который ранее считали равным (по аналогии с Sq-сигналом) порядка одной трети от внешнего сигнала. Дано объяснение обнаруженному более 50 лет назад (и до сих пор активно обсуждаемому) аномальному поведению суточной вариации вертикальной компоненты магнитного поля на обсерваториях в Южной Индии, расположенных под экваториальным электроджетом. Такое аномальное поведение есть не что иное, как океанический эффект в солнечно-суточных вариациях, а ЕЕJ-сигнал не играет заметной роли в формировании этого аномального эффекта.

Выполнены пионерские аэростатные эксперименты по измерению вертикальных градиентов геомагнитного поля в стратосфере на основе аэростатного магнитного градиентометра. 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, 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 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.

Таким образом, на основе современных спутниковых и аэростатных геомагнитных измерений удалось достичь удовлетворительного соответствия экспериментальных данных с теоретическими моделями генерации геомагнитного поля, продвинуться в изучении магнитных свойств земной коры, магнитных аномалий и других особенностей распределения геомагнитного поля.

Совместно с Геофизическим центром РАН выполнена работа по изданию атласа геомагнитного поля на базе всех имеющихся данных, начиная с XV в.

В изучении вариаций геомагнитного поля и токовых систем, обусловленных нестационарностью солнечного ветра и активными явлениями на Солнце, разработаны современные модели, удовлетворительно описывающие наблюдаемые закономерности. В высоких широтах северного и южного полушарий выделены геомагнитные вариации, которые контролируются параметрами солнечного ветра. На основе этих вариаций была создана модель внешней части магнитного поля Земли, а также модели электрического поля в высокоширотных ионосферах, трёхмерных систем магнитосферно-ионосферных токов и конвекции ионосферной плазмы. Эти модели ИЗМИРАН (IZMEM model) в настоящее время доступны всем пользователям и получили международное признание.

В рамках разработанной новой модели магнитного поля геомагнитосферы показано, что в периоды магнитных бурь токовая система хвостовой части магнитосферы генерирует магнитное возмущение, сопоставимое по амплитуде с возмущением, создаваемым кольцевым током, расположенным в области внешнего радиационного пояса Земли. Это меняет сложившееся в геофизике представление о магнитосферном кольцевом токе как главенствующем потребителе энергии магнитосферы во время магнитной бури и главном генераторе *Dst*-вариации.

На основе современных моделей токовых систем во время суббурь получена модельная УТ-вариация индексов активности авроральных электроджетов *AE* (*AU*, *AL*), позволяющая проводить коррекцию этих индексов в зависимости от сезона года и числа обсерваторий, данные которых использованы при расчёте стандартных индексов *AE*, *AU*, *AL*. Коррекция также учитывает изменение пространственного положения этих обсерваторий относительно авроральных электроджетов во время магнитных бурь.

В рамках космического проекта ИНТЕРБОЛ (головная организация ИКИ РАН) с использованием магнитометров ИЗМИРАН (магнитометр ФМ-3 на КА «Хвостовой зонд», и совместный с Болгарской академией наук магнитометр ИМАП-3 на КА «Авроральный зонд») в период 1995–2000 гг. проводились измерения магнитного поля в магнитосфере Земли. На основе полученных магнитных данных в комплексе с плазменными измерениями была исследована тонкая структура внешних границ и слоёв магнитосферы, которые включали в себя: отошедшую ударную волну, магнитопаузу, магнитослой и пограничный слой. Исследовались явления ФТЕ (Flux Transfer Event), связанные с процессами импульсного магнитного пересоединения в магнитослое и магнитосфере, а также продольные токи, текущие вдоль силовых линий геомагнитного поля в авроральных областях магнитосферы.

В области полярных геомагнитных исследований всё большую роль играют доступные через сеть Интернет интегрированные базы оперативных данных, пополняемые с магнитных обсерваторий и спутников. В этом направлении в соответствующих исследовательских группах института осуществлён переход на цифровые данные и освоены возможности сети Интернет. Создана и поддерживается открытая база данных по наземным магнитным измерениям (<http://www.cosmos.ru/magbase/>), продолжается

регулярное определение секторной структуры межпланетного магнитного поля (<http://www.izmiran.ru/stp/polar/SSIMF/>), для обработки и анализа данных создан интерактивный MATLAB Web Server (<httpV/matlab.izmiran.ru/magdata/>).

Дальнейшее развитие получили работы в области разработки и создания магнитометрической аппаратуры различного назначения: для геомагнитных наземных и спутниковых измерений, для космических планетных исследований, медицины, магнитобиологии и т.д.

С начала 90-х гг. прошлого века по настоящее время в ИЗМИРАН в кооперации с другими организациями создано более 30 типов различных магнитометрических приборов, включающих в себя протонные и феррозондовые магнитометры, кварцевые магнитовариационные станции, магнитометры переменного поля и другие приборы, предназначенные для проведения научно-исследовательских работ в области геофизики, медицины, магнитобиологии, для проведения электромагнитного мониторинга окружающей среды. Приборы использовались как в условиях магнитных обсерваторий, так и для проведения полевых геофизических работ. Особый класс диагностических магнитометров — индикаторы магнитной бури, создан для работы в условиях помещения и с успехом используется на протяжении многих лет в некоторых клиниках и медицинских учреждениях Москвы и других городов.

Созданные в институте магнитовариационные станции серии «Кварц» обладают высокой стабильностью метрологических параметров, прежде всего стабильностью нуля, что очень важно для магнитных обсерваторий и автономных вариационных станций. Существенно увеличен динамический диапазон измерений прибора (до $5 \cdot 10^3$ нТл), улучшилась его разрешающая способность (до 0,1 нТл), а также расширились его частотные характеристики (до 15 Гц). Изготовленная институтом серия в количестве около 40 цифровых магнитовариационных станций под названием «Кварц-ЗЕМ» нашла широкое применение как в России, так и за рубежом. Так, например, зона полярных сияний целиком перекрыта этими станциями от мыса Уэлен на крайнем востоке до обсерватории «Соданкюля» в Финляндии. В Антарктиде успешно работают семь станций, из них две станции на обсерватории «Мирный», одна — на обсерватории «Новолазаревская», и две станции на обсерватории «Восток», где совместно с американскими коллегами из Мичиганского университета проводятся работы в рамках совместного проекта «Исследование высокоширотных геомагнитных явлений». Участниками этого проекта от России являются Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт (ААНИИ) и ИЗМИРАН. Обсерватория «Восток» в реальном времени передаёт информацию в Мировой центр данных США.

На базе апробированной и хорошо зарекомендовавшей себя в работе цифровой магнитовариационной станции серии «Кварц-3» разрабатывается новый вариант аналогичной станции под названием «Кварц-4», предназначенный для непрерывного измерения и регистрации в цифровом виде длинопериодных вариаций составляющих вектора магнитной индукции поля Земли на сети российских магнитных обсерваторий, а также в условиях необслуживаемых или редко обслуживаемых пунктов наблюдений. Эта

станция измеряет и накапливает в твёрдотельную память в цифровом виде значения вариаций трёх составляющих вектора магнитной индукции поля Земли и значения температуры кварцевых магнитных измерительных преобразователей в реальном времени. Отличительная особенность станции «Кварц-4» состоит в том, что она является высокостабильным, интеллектуальным и компьютеризованным прибором нового поколения с широкими возможностями программной установки и изменения различных параметров схемы, возможностью цифровой обработки и фильтрации данных в процессе проведения измерений, возможностью интеграции в международную систему сбора данных ИНТЕРМАГНЕТ.

Разработана целая серия магнитометрических приборов для морских магнитных измерений, для медицины и магнитобиологии, для электромагнитного мониторинга окружающей среды в условиях повышенных помех и ослабленного геомагнитного поля (гипогеомагнитного поля) — феррозондовый градиентометр «Градимаг», морской буксируемый магнитометр-градиентометр МРМГ-02, переносные и пешеходные магнитометры серии «Магик», интеллектуальные магнитометры серии «Импеданс» и «Гипомаг», вариометры-магнитометры серии IDL и др. Все эти приборы находят применение в различных сферах деятельности и исследованиях для измерений постоянных и переменных магнитных полей, для анализа их спектральных и пространственных характеристик. Лучшие образцы магнитометрических приборов ИЗМИРАН регулярно экспонировались на выставках по научно-приборостроению, проводимых РАН.

По направлению квантовой и криогенной магнитометрии ведётся разработка и создание новых самых чувствительных магнитометрических устройств на основе СКВИД (сверхпроводящий квантовый интерференционный датчик), работающих при температуре кипения жидкого гелия 4,2 К. В 1990-х гг. были созданы СКВИД-магнитометры для геофизических исследований и с их помощью проведены измерения шумановских резонансов полости Земля-ионосфера. На основе СКВИД, охлаждаемых до температур ниже 1 К, были разработаны и созданы сверхмалошумящие усилители с уровнем разрешения по току лучше $1 \text{ пА/Гц}^{1/2}$, которые могут быть использованы в качестве первого каскада усиления сигналов с тонкоплёночных микроболометров в приёмниках субмиллиметрового диапазона, используемых для радиоастрономических применений. Совместно с физическим факультетом МГУ на основе высокотемпературного СКВИД постоянного тока был разработан и создан первый в Европе сканирующий СКВИД-магнитометр, предназначенный для исследований магнитных полей рассеяния малоразмерных и слабомагнитных образцов при температуре кипения жидкого азота 77 К. С помощью сканирующего СКВИД-магнитометра проведены исследования магнитных свойств высокотемпературных сверхпроводящих материалов, ультратонких ферромагнитных плёнок, элементов с гигантским магнитным импедансом, ансамблей суперпарамагнитных наночастиц и др.

С использованием метода оптической накачки в парах щелочных металлов ведётся разработка и создание магнитокардиографа для ранней диагностики заболеваний сердца, создан макет магнитокардиографа и проводятся клинические испытания.

За последние годы своё развитие получило сформировавшееся более 30 лет назад новое научное направление по изучению земной коры и верхней мантии методом глубинного электромагнитного зондирования с использованием промышленных линий электропередач (ЛЭП). Для этих целей Санкт-Петербургским филиалом ИЗМИРАН совместно с Кольским научным центром разработан генераторно-измерительный комплекс на основе промышленных ЛЭП и генератора «Энергия-1», который не имеет прямых аналогов в мировой практике. Помимо решения фундаментальных задач глубинного зондирования земной коры и верхней мантии, этот комплекс может быть использован при разработке систем электромагнитного мониторинга очаговых зон землетрясений, для совершенствования систем низкочастотной связи с подземными объектами в интересах шахтной геофизики и МЧС, а также при глубинных исследованиях, направленных на поиски углеводородного сырья. Разработана методика зондирования, учитывающая влияние токов смещения и ионосферы. По данным зондирования получена новая информация о природе и структуре электропроводности литосферы балтийского (фенноскандинавского) щита на глубинах до 50...70 км, о флюидном режиме, температуре и напряжённо-деформированном состоянии земных недр. Обнаружен новый в геоэлектрике слой дилатантно-диффузионной проводимости (слой ДД) в диапазоне глубин 3...10 км, и получены оценки границ перехода литосферного вещества из хрупкого в псевдопластичное состояние. Обнаруженные ранее эффекты возникновения электромагнитных излучений в ультранизкочастотном (УНЧ) диапазоне при подготовке сильных землетрясений послужили основой для разработки метода УНЧ-магнитной локации источников таких излучений. Метод позволяет определять местоположение и изучать динамику как внешних (ионосферных), так и внутренних (литосферных) источников магнитных возмущений. Для реализации этого метода Санкт-Петербургским филиалом ИЗМИРАН создан уникальный геофизический комплекс «Очаг-1» с высокочувствительными магнитометрами, который успешно прошёл испытания на стыке континентальных и океанических блоков земной коры в сейсмоактивной зоне Японии. Выполнены исследования локальных аномалий геомагнитных возмущений в сейсмоактивных зонах перед сильными землетрясениями ($M \geq 5$), и установлено появление локальных аномалий УНЧ-геомагнитных возмущений за 1,5...2 мес и за 1-2 дня до сильных землетрясений на расстоянии ~ 40...90 км от их эпицентров. Для шести случаев с заблаговременностью 2...3 недели определён район предстоящих сильных толчков.

В настоящее время в ИЗМИРАН ведутся регулярные измерения геомагнитного поля в обсерваториях Москвы (Троицк), в пос. Воейково (под Санкт-Петербургом), пос. Ульяновка (под Калининградом), в Карпагорах (Архангельская обл.), Красном озере под Санкт-Петербургом (Интермагнет), а также в ряде выносных пунктов.

В области исследований ионосферы и распространения радиоволн продолжались работы по изучению ионосферной плазмы, совершенствованию экспериментальной радиофизической аппаратуры и методов диагностики ионосферной плазмы, по проведению комплексных экспериментов,

по развитию теории распространения радиоволн и построению моделей ионосферы и магнитосферно-ионосферных явлений. Для проведения экспериментальных исследований ионосферной плазмы институтом была разработана целая серия автоматизированных цифровых ионосферных станций (ионозондов) («Сойка-6000», «Базис», «Парус»), с использованием которых проводятся регулярные измерения состояния ионосферы методами вертикального, наклонного и возвратно-наклонного импульсного зондирования. Для диагностики динамических процессов, протекающих в ионосферной плазме при естественных и искусственных возмущениях, создана многочастотная установка, позволяющая осуществлять одновременную регистрацию доплеровского смещения сигналов разных частот, которые отражаются от соответствующих слоёв ионосферы. В ИЗМИРАН впервые была создана экспериментальная установка многочастотного фазового зондирования ионосферы, основанная на методе спектрально-фазового анализа импульсных когерентных радиосигналов, которая позволила с высокой точностью одновременно на восьми частотах измерять реальные высоты отражения радиоволн.

В 2006 г. возобновлён после некоторого перерыва регулярный контроль состояния ионосферы методом вертикального зондирования. Цифровой ионозонд «Парус» включён в режим круглосуточного мониторинга в режиме один сеанс измерений каждые 15 мин. Излучаемая мощность импульсных сигналов ионозонда составляет 12...15 кВт, что позволяет отслеживать вертикальное распределение плотности ионосферной плазмы даже в периоды сильных возмущений. Данные измерений оперативно отображаются на сайте института, а обработанные в соответствии с руководством URSI ионограммы ежедневно поступают в Мировой центр данных Б-2. Ведётся работа по автоматизации обработки данных измерений.

Дальнейшее развитие получили методы диагностики ионосферных возмущений. На базе ионосферного комплекса «Сойка» разработаны аппаратно-программные средства для комплексной диагностики внезапных ионосферных возмущений, связанных с различными факторами солнечно-земных связей, в первую очередь с вариациями рентгеновского и ультрафиолетового излучения Солнца, а также с вторжением корпускулярных потоков. Многочастотные доплеровские измерения в режиме вертикального зондирования совместно с одновременной доплеровской регистрацией коротковолновых (КВ) сигналов ряда радиовещательных станций на трассах наклонного зондирования позволили собрать информацию о пространственных масштабах возмущений. Таким образом, были зарегистрированы и изучены ионосферные эффекты от множества солнечных вспышек на Солнце. Особенностью некоторых ионосферных возмущений была их заметная высотная протяжённость от E- до F2-слоя и синхронный колебательный характер вариаций доплеровского смещения частоты зондирующих сигналов, положительная начальная фаза которых свидетельствовала о том, что возмущающий фактор распространялся вниз и приводил к росту электронной концентрации.

С помощью комплекса «Сойка» была осуществлена диагностика искусственных плазменных образований, которые возникали при инъекции заряженных частиц с борта международной космической станции (МКС)

«Мир». В таких образованиях возмущения электронной концентрации могли достигать 50 % от фонового значения, время их жизни составляло 1...2 ч. Разработан и создан экспериментальный комплекс для высокочастотной (ВЧ) радиолокации искусственных ионосферных неоднородностей. Комплекс является интегрированной системой, состоящей из двух многочастотных передатчиков когерентных радиоволн (расположенных в Калининграде и Троицке), и многоканальных приёмных установок в Троицке для бистатического доплеровского радиозондирования, а также из приёмопередающей установки для моностатической ВЧ-радиолокации на скользкой частоте. Совместно с НИРФИ (Научно-исследовательский радиофизический институт, Нижний Новгород) проведены экспериментальные исследования эффектов возбуждения искусственной ионосферной турбулентности при воздействии мощных радиоволн, получены новые данные о влиянии регулярной рефракции на условия оптимальной радиолокации неоднородностей над радиофизическим стендом СУРА.

В ходе экспериментов на стенде СУРА была опробована новая методика измерения скорости дрейфа искусственных мелкомасштабных неоднородностей, основанная на многопозиционном доплеровском радиозондировании области искусственного возмущения ионосферы. Использовались две пары КВ-радаров бистатической конфигурации: Калининград – СУРА – ИЗМИРАН и Станция точного времени (Москва) – СУРА – Ростов-на-Дону. В результате установлено, что искусственные ионосферные неоднородности при нагреве ионосферы мощной КВ-волной на высотах F-области могут иметь скорость горизонтального дрейфа в интервале 50...110 м/с и изменять направление с восточного на западное в течение одного часа.

Продолжены исследования состояния ионосферы и условий распространения радиоволн в ней в зависимости от солнечной активности и вариаций геомагнитного поля. Всё время, вплоть до настоящих дней, в институте проводятся комплексные исследования электромагнитных явлений в ионосферной плазме во всём их сложном взаимодействии,

Проанализированы многолетние (климатического масштаба) тренды параметров нейтральных и заряженных компонент верхней атмосферы (ионосферной плазмы), не связанные с 11-летними вариациями солнечной активности. Было показано, что во второй половине XX столетия критические частоты среднеширотных E- и F2-слоёв ионосферы (высоты 100...120 и 250...350 км) испытывали многолетние изменения собственно атмосферной природы. Эти изменения имели разнонаправленный характер и происходили со скоростями, многократно, иногда до порядка величины, превосходящими скорости, которые определялись темпом возрастания в атмосфере содержания парниковых газов CO_2 и CH_4 . Столь же существенным и разнонаправленным изменениям были подвержены высоты слоя F2. Ионный и газовый состав в области высот 100...350 км также испытывал изменения, превосходящие модельные оценки, исходившие из наблюдаемых скоростей содержания парниковых газов в приземных слоях воздуха. В частности, было показано, что в ряде регионов северного полушария концентрация молекулярного кислорода на высотах 100...110 км и концентрация атомарного кислорода на высотах 250...350 км за последние годы

сократились. Проведённый анализ позволил сделать вывод о том, что тренды в верхней атмосфере гораздо более выражены, чем в нижней атмосфере, а модельные представления о парниковых газах как об основных источниках наблюдаемого изменения климата требуют уточнений.

Успешно продолжались исследования процессов образования и динамики ионосферы как на основе анализа и систематизации экспериментальных данных, так и с помощью разработанных в ИЗМИРАН моделей ионосферы, включая глобальную самосогласованную модель термосферы, ионосферы и протоионосферы (модель ГСМ ТИП). Была дана количественная интерпретация уже известных закономерностей изменений ионосферы в различных гелиогеофизических условиях (зимняя аномалия, экваториальная аномалия, динамика ионосферы в периоды интенсивных суббурь и бурь в магнитосфере) и обнаружены новые свойства ионосферы, включая долготный эффект в локализации главного ионосферного провала, возникновение дополнительного, так называемого кольцевого, ионосферного провала (совместно с сотрудниками ИКИ РАН), волноподобную долготную структуру низкоширотной ионосферы.

На основе обобщения явного вида коэффициента теплопроводности электронов дано объяснение аномально высоких значений температуры электронов в плазмосфере, теоретически объяснён эффект исчезновения F2-слоя ионосферы в высоких широтах, построена картина глобального отклика ионосферы на интенсивные суббури в магнитосфере, обоснована ключевая роль солнечного воздействия в долговременных изменениях верхней ионосферы, развиты методы краткосрочного и долгосрочного прогнозирования ионосферы и осуществлена практическая реализация этих методов.

На основе анализа данных, полученных ранее в ходе экспериментов в акватории мирового океана с помощью научно-исследовательских судов РАН и Гидрометеослужбы, а также спутниковые измерения и данных мировой сети станций вертикального зондирования, измерений ионосферного поглощения радиоволн, получены предварительные выводы о возможном существовании глобальной циркуляции в верхней атмосфере, порождающей крупномасштабные (от 70 до 350 км по высоте и до тысяч км по долготе) квазистационарные неоднородности ионосферной плазмы.

Проводились теоретические исследования связи физических явлений, происходящих в ионосфере, стратосфере и тропосфере, представляющих собой единую среду. На основе этих исследований разработана электродинамическая модель воздействия на ионосферу интенсивных сейсмических и метеорологических процессов, протекающих в нижней атмосфере. К ним отнесены процессы подготовки землетрясений, извержений вулканов и тайфунов, пыльные бури, грозная активность, техногенные катастрофы, причём воздействие на ионосферу в рамках модели осуществляется электрическим током проводимости, протекающим в атмосферно-ионосферной цепи и возникающим в результате вертикального турбулентного переноса заряженных аэрозолей, их взаимодействия с атмосферными ионами в процессе инъекции радиоактивных веществ и модификации атмосферной проводимости. Экспериментальной основой модели служат спутниковые и наземные данные регистрации плазменных и электромагнитных

возмущений, результаты измерений инъекции почвенных газов в атмосферу и уровня её радиоактивности. Входным параметром модели принят рост инъекции в атмосферу активных веществ и их конвективный перенос вверх. В процессе исследований был обнаружен ряд новых физических явлений, таких как неустойчивость акустико-гравитационных волн в ионосфере под действием электрического поля, формирование гиротропными волнами узкополосных спектров УНЧ-колебаний магнитного поля, возмущения нижней ионосферы при протекании в ней электрического тока. Проведённые исследования позволили с единых позиций дать объяснение ряду, казалось бы, не связанных друг с другом явлений различного временного масштаба, например, возникновению УНЧ-колебаний магнитного поля и плотности плазмы с ростом электрического поля, которые регистрируются на спутнике. Обнаружен механизм ограничения вертикальной компоненты электрического поля на поверхности Земли в результате его обратной связи со сторонним током. Из-за ограничения изменений электрического поля на Земле, которые могут быть меньше фоновых возмущений, спутниковые методы регистрации поля, связанного с сейсмической активностью, имеют преимущество по сравнению с наземными методами. Кроме того, усиление поля в ионосфере может контролироваться по регистрации плазменных и электромагнитных эффектов, обусловленных её реакцией на такое усиление. Таким образом, в результате усиления электрического поля сейсмического происхождения ионосфера может служить его чувствительным датчиком наряду с наземными средствами измерений. Вытекающие из модели выводы могут служить отправной точкой для поиска возможных «предвестников» катастрофической фазы тайфунов, создания спутниковых методов контроля активизации вулканической активности и прогноза сильных извержений вулканов, опасных для полётов авиации.

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» (COMPASS 2 — Complex Orbital Magneto-Plasma Autonomous Small Satellite, МКА, запуск 2006 г.).

По данным ИСЗ «Интеркосмос-24» были обнаружены очень низкочастотные (ОНЧ) эффекты подземного ядерного взрыва на о-ве Новая Земля 24 октября 1990 г. (широкополосные данные). В крайне высокочастотном (КНЧ) диапазоне (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) были выполнены активные эксперименты по инъекции плазменных пучков в ионосферную и магнитосферную плазму. В серии наземно-спутниковых измерений были получены томографические реконструкции профилей ионосферы в реальном времени,

обнаружены наклонные 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 при нагреве ионосферы мощными КВ-волнами над областью работы радиофизических стендов и зарегистрирован эффект нетуннельного прохождения радиоволн через волновой ионосферный барьер.

В 1998 г. за разработку методов спутниковой радиотомографии ионосферы и создание сети радиотомографических комплексов директору ИЗМИРАН В. Н. Ораевскому и доктору физико-математических наук Ю. Я. Ружину в составе авторского коллектива присуждена Государственная премия в области науки и техники.

Были проведены также измерения амплитудно-частотных характеристик ОНЧ-волн при инъекции 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 инъекции электронов. Возбуждение волн ВЧ-диапазона было зарегистрировано в точке инъекции на основном спутнике и на субспутнике «Магион-3». В режиме модулированной инъекции пучков получены интересные и перспективные результаты, связанные с формированием особых электромагнитных структур в плазме, индуцирующих электромагнитные поля в ОНЧ-диапазоне, подобно ОНЧ-антенне в плазме. Инъекция электронов в смодулированном режиме приводит к ВЧ-накачке в области инъекции и дальнейшей эстафетной перекачке волновой энергии в низкочастотную область спектра, усиливая, таким образом, низкочастотную турбулентность.

Методика измерений 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). Так, совместно с Институтом космофизических исследований и распространения радиоволн (ИКИР) ДВО РАН в рамках совместных наземных и спутниковых измерений были выполнены 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 вариаций обнаружены различные типы атмосферных волн: внутренние гравитационные волны (ВГВ, $T = 0,5...3,5$ ч),

приливные тепловые волны ($T = 4 \dots 24$ 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 $T = 0,5 \dots 1,5$ ч усиливаются в подготовительную фазу землетрясений, а их источник локализован в приземной атмосфере. Волны с такими периодами способны проникать до высот динамо-области ионосферы ($h \approx 120 \dots 130$ км). Колебания с $T = 1,5 \dots 3,0$ ч усиливаются при высокой геомагнитной активности. Источник этих колебаний локализован в динамо-области полярной ионосферы или выше.

При изучении распространения свистящих атмосфериков на высотах 400 км по данным МКА «Компас-2» было установлено, что при определённых условиях низкочастотная ветвь сигнала достигает нулевой частоты за конечное время, а не стремится к ненулевой асимптоте.

В изучении литосферно-ионосферных взаимодействий рассмотрено влияние индуцируемых при солнечно-суточных геомагнитных вариациях теллурических токов в проводящей литосфере Земли на геодинамические процессы. Крупномасштабные токи, покрывающие площади в несколько миллионов квадратных километров, почти однородны и пронизывают литосферу до глубин 100 км. Показано, что их взаимодействие с главным магнитным полем Земли способно создать за счёт силы Лоренца механические моменты, энергетика которых сравнима с приростом энергии тектонической деформации. Таким образом, не исключается возможность локального инициирования землетрясений теллурическими токами от геомагнитных вариаций.

В области ионосферного распространения радиоволн исследовано нестационарное обобщение параболического уравнения теории дифракции, разработаны эффективные численные методы расчёта волновых полей на основе параболического уравнения и теории плавно-нерегулярных волноводов, создана асимптотическая теория глобального распространения декаметровых радиоволн, изучена лучевая структура ионосферного КВ-радиоканала и эволюция гауссовых пучков радиоволн в волноводе Земля-ионосфера. Для решения практических задач ионосферного распространения радиоволн были разработаны численно-аналитические модели крупномасштабной структуры ионосферы, исследованы механизмы и аномальные моды распространения, дано описание возвратно-наклонного распространения радиоволн в ионосфере с аномальной задержкой сигнала. Для расчёта распространения волн ультракоротковолнового (УКВ) диапазона над земной поверхностью разработаны вычислительные алгоритмы, предложены граничные условия прозрачности, моделирующие излучение в свободное пространство, изучено влияние рельефа местности на распространение волн. Исследованы траектории распространения волн КВ-диапазона и доплеровские сдвиги частоты на сверхдлинных трассах (Москва-Антарктида), построены карты распределения волновой интенсивности. Для практических применений проведено исследование распространения радиоволн в волноводах сложного профиля, распространение сверхширокополосных импульсов вдоль земной поверхности, развиты новые методы расчёта современных элементов волоконной и рентгеновской

оптики, обобщение метода параболического уравнения для задач дифракции в угловых областях (дифракция и излучение волн в клиновидной области), аналитическая теория фазового синхронизма с приложением к задаче распространения волн в периодических средах.

Заметное развитие получили работы по подповерхностному радиозондированию с целью изучения структуры грунта, поиска и отождествления подповерхностных объектов. Для этих целей разработаны и изготовлены (совместно с Институтом механизированного инструмента (ООО ВНИИСМИ)) георадары серии «Грот» и «Лоза», которые нашли широкое применение в инженерной геологии, археологии, экологии, в строительстве и других направлениях деятельности. Исследована обратная задача подповерхностного зондирования — восстановление подповерхностной структуры среды по данным импульсного зондирования. Дальнейшим развитием этих работ является разработка макета голографического подповерхностного радара.

В настоящее время в ИЗМИРАН продолжаются исследования ионосферы на основе регулярного вертикального зондирования ионосферы ионозондами «Базис», «Парус» и DPS-4 в Москве (Троицк), ионозондом «СП-3М» в обсерватории «Восейково» под Санкт-Петербургом и ионозондом «АИС» в обсерватории под Калининградом, проводятся исследования ионосферы и распространения радиоволн установкой с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) для наклонного зондирования (Троицк), многоканальной установкой «Сойка-М» для доплеровско-фазового зондирования ионосферы (Троицк), установкой «РФИ-М» для 8-частотного доплеровского мониторинга ионосферы на трассах наклонного распространения радиоволн (Троицк), установкой возвратно-наклонного зондирования «Зонд» (под Калининградом), радиопередатчиком «Мицар», в стадии подготовки находится серия ионосферных экспериментов для их реализации на российском сегменте МКС.

В 2008 и 2009 гг. при головной роли ИЗМИРАН изданы тематические тома «Ионосферная плазма» в энциклопедической серии «Энциклопедия низкотемпературной плазмы», в которой представлены обзоры о состоянии и достижениях в исследовании ионосферы последних лет.

В области солнечно-земной физики продолжались работы по наблюдениям Солнца в оптическом и радиодиапазонах, по изучению активных явлений на Солнце и их воздействию на околоземное космическое пространство и геомагнитную активность. За последнее время ИЗМИРАН расширил направление своих космических исследований: при головной роли ИЗМИРАН были реализованы два крупных космических проекта по исследованию Солнца — проекты КОРОНАС-И и КОРОНАС-Ф, явившиеся составной частью программы КОРОНАС.

С использованием данных спутника «КОРОНАС-Ф» сотрудниками ИЗМИРАН в кооперации с другими учреждениями проведены исследования корональных выбросов массы (КВМ) и связанных с ними проявлений солнечной активности, имеющих высокую степень геоэффективности. Установлено, что в процесс эрупции крупных КВМ оказываются вовлечёнными структуры глобальной солнечной магнитосферы с пространствен-

ным масштабом, намного превосходящим размеры активных областей и обычных комплексов активности. Наблюдаемые при этом крупномасштабные области пониженной яркости крайнего УФ 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.

Разработана МГД-модель выброса из солнечной атмосферы скрученных магнитных трубок, которая описывает наблюдаемые явления эрупции отдельных магнитных петель, отождествляемых как выбросы коронального вещества.

Проведены многолетние исследования крупномасштабных магнитных полей и показана их ключевая роль в формировании явлений солнечной активности — пятен, активных областей, вспышек, корональных дыр и т.д. Подробно изучены фоновые мелкомасштабные магнитные поля и поведение магнитной спиральности на поверхности Солнца с циклом активности. Установлено, что распределение спиральности в цикле соответствует теории Паркера, причём спиральность в северном полушарии была отрицательной независимо от изменения Хейловской полярности в пятнах при переходе от 22-го к 23-му циклу.

Проведён анализ и классификация межпланетных МГД-возмущений вблизи Земли и их связи с возможными солнечными источниками — волокнами, корональными дырами, вспышками, гелиосферными стримерами. Установлено, что простые изолированные МГД-возмущения преимущественно связаны с волокнами, а для более сложных МГД-возмущений имеет место сочетание указанных выше четырёх источников, при этом только волокна входят во все возможные типы сложных потоков. Такая исключительная роль активных волокон в формировании структуры и динамики околоземных МГД-возмущений позволяет предположить, что содержащаяся в них плазма является одним из главных источников спорадических потоков солнечного ветра вблизи Земли.

На основе комплексного анализа одного из самых мощных солнечных протонных событий 20 января 2005 г. по данным спутника «КОРОНАС-Ф» и наземных наблюдений микроволновых радиовсплесков и потоков протонов установлено, что временные профили вспышечного гамма- и радиоизлучения из области вспышки, вызываемые ускоренными электронами и протонами, были подобны и тесно связаны между собой. Тем самым и электроны, и протоны были ускорены в одном источнике в активной области непосредственно во время вспышки, а не в ударной волне, распространявшейся в короне перед КВМ.

На спутниках «КОРОНАС-И» и «КОРОНАС-Ф» с использованием фотометра «ДИФОС» выполнены наблюдения флуктуации яркости Солнца в диапазоне длин волн от УФ до ИК, и изучены глобальные колебания Солнца. Построены спектры мощности глобальных колебаний, зарегистрированы p -моды со степенями $l = 0, 1, 2$. Экспериментально показано

частотное расщепление р-мод вследствие вращения Солнца. Обнаружено наличие несинфазных длиннопериодных вариаций амплитуд р-мод глобальных колебаний Солнца, отражающих внутреннюю динамику Солнца, установлен заметный рост амплитуды глобальных колебаний в ультрафиолетовой области спектра.

За работы по проекту «КОРОНАС-Ф» директор ИЗМИРАН В. Д. Кузнецов и кандидат физико-математических наук А. И. Степанов в составе авторского коллектива удостоены премии Правительства в области науки и техники за 2008 г.

В 1995 г. ИЗМИРАН начал разработку перспективного солнечного космического проекта ИНТЕРГЕЛИОС, который в настоящее время под название ИНТЕРГЕЛИОЗОНД готовится к реализации в рамках Федеральной космической программы при головной роли ИКИ РАН с участием широкой кооперации институтов и иностранных специалистов. В области космических исследований Солнца начаты также работы по проекту «Солнечный парус» с целью запуска космического аппарата для наблюдений полярных областей Солнца с высоко наклонённых гелиоцентрических орбит.

Были организованы экспедиции по наблюдениям полных солнечных затмений и солнечной короны. Состоялись экспедиции в пос. Черский (Колыма), 1990 г.; Ла Пас (Мексика), 1991 г.; Бразилия, 1994 г.; Вьетнам, 1995 г.; пос. Первомайский (Читинская обл.), 1997 г.; о-в Гваделупа, 1998 г.; Болгария, Румыния, 1999 г.; Ангола, 2002 г.; Северный Кавказ, 2006 г., Западная Сибирь, 2008 г., в результате которых получены уникальные снимки солнечной короны и изучена её структура на разных фазах солнечного цикла. В результате интерферометрических наблюдений около-солнечного участка неба во время полного солнечного затмения 26 февраля 1998 г. в совместном эксперименте ИЗМИРАН и ГАИШ МГУ обнаружена новая составляющая излучения солнечной короны (S-корона), связанная с сублимацией межпланетной пыли в околосолнечном пространстве. Индикатором S-короны служит резонансная эмиссия ионизованного кальция с доплеровским смещением, соответствующим орбитальному движению планет Солнечной системы. Интерферометрические наблюдения свечения продуктов сублимации твёрдого вещества в окрестностях Солнца проводились во время пяти последующих полных солнечных затмений. Анализ результатов привёл к выводу о крайней неоднородности распределения твёрдотельной составляющей межпланетной среды вблизи Солнца.

Продолжались наземные наблюдения космических лучей (КЛ) и изучение их вариаций. Эти исследования включают развитие теории метеорологических и геомагнитных эффектов, возникающих при прохождении релятивистских заряженных частиц через атмосферу и магнитосферу Земли, использование релятивистских частиц для зондирования токовых систем магнитосферы, воздействие КЛ на ионосферу и распространение радиоволн.

В 1997 г. ИЗМИРАН стал первой в мире организацией, представляющей в сети Интернет измеряемые на Земле вариации КЛ. В последние годы восстановлены непрерывные наблюдения КЛ на ст. «Мирный» в Антарктиде.

Разработанные в ИЗМИРАИ методы и теории позволяют использовать современную мировую сеть станций КЛ в качестве единого многонаправленного планетарного детектора, движущегося в космосе и непрерывно зондирующего с помощью КЛ в широком интервале энергий динамические процессы распространения и ускорения энергичных частиц, электромагнитную и радиационную обстановку в окрестности Земли и во всей гелиосфере.

Выполнены важные исследования по проблеме распространения КЛ в межпланетной среде. Исследованы эффекты предвестников в интенсивности КЛ перед приходом к Земле межпланетных ударных волн. С помощью релятивистских заряженных частиц проводится зондирование структуры выбросов солнечного вещества. Развита кинетическая теория распространения и флуктуации интенсивности КЛ в межпланетных магнитных полях. Разработана теория анизотропной диффузии релятивистских частиц в гелиосфере и проведено моделирование межпланетной модуляции КЛ с учётом эффектов запаздывания, реальных изменений солнечного магнитного поля и солнечной активности. Построена теория нелинейного взаимодействия КЛ с солнечным ветром. Получены характеристики плотности и анизотропии КЛ за каждый час в последние 50 лет, создана база данных, включающая все форбуш-эффекты и крупномасштабные возмущения солнечного ветра за последние пять солнечных циклов, исследована связь анизотропии КЛ с параметрами межпланетной среды и её долгопериодное поведение.

В области теоретических исследований по астрофизике КЛ построена модель распространения КЛ в Галактике и определены коэффициенты переноса КЛ в межзвёздной среде; разработаны модели галактического ветра, ускоренного давлением КЛ с учётом потоковой неустойчивости выходящих из галактики релятивистских частиц; проведён расчёт аномальной диффузии КЛ в случайных межзвёздных и межпланетных магнитных полях; исследовано ускорение КЛ в остатках сверхновых с учётом сильной нелинейности процесса ускорения заряженных релятивистских частиц вблизи фронта ударной волны; выполнен расчёт потока КЛ сверхвысоких энергий, ускоренных в скоплениях галактик и распространяющихся в расширяющейся Вселенной, заполненной фоновым излучением. Проводились исследования климатического отклика Земли на долговременные изменения солнечной активности. На основе комплексного анализа палеоклиматических данных и палеоданных о вариациях солнечной активности (вариации концентрации космогенных изотопов ^{14}C и ^{10}Be в земных архивах) показано, что как в исторический временной интервал, так и в прошлом, до сотен миллионов лет назад, вековые и квазидвухсотлетние вариации солнечной активности оказывали эффективное воздействие на климатические изменения. Полученный результат имеет большое значение для интерпретации долговременных климатических изменений в современную эпоху. Показано, что в конце прошлого — начале нынешнего столетия имел место максимум квазидвухсотлетнего солнечного цикла, который в настоящее время идёт на спад. Это позволяет считать, что с этим связана стабилизация глобальных температур в последние годы при продолжающемся росте концентрации парниковых газов. Экспериментальные данные указывают на то, что воздействие долговременной солнечной активности

на климатические изменения связано с модуляцией потоков КЛ, которые, в свою очередь, воздействуют на облачный покров и содержание аэрозолей в нижней атмосфере. Оценки показывают, что солнечная активность может обуславливать около 50 % возрастания глобальных температур в прошедшем столетии до 1960 г., и около 30 % — после 1970 г. Полученный результат имеет существенное значение для понимания роли естественных и антропогенных факторов в глобальном потеплении в современную эпоху.

Значительное развитие и большую востребованность получили работы Центра прогнозов геофизической обстановки ИЗМИРАН, который используя накопленный опыт работы института в области солнечно-земной физики и изучения космической погоды, осуществляет прогнозы солнечной активности, прогноз радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве, прогноз геомагнитной обстановки. Эта информация поставляется организациям Роскосмоса и других ведомств и используется для запуска ракет-носителей на космодромах Байконур и Плесецк, для управления МКС и спутниками, для контроля за состоянием больных пациентов в медицинских учреждениях в периоды магнитных бурь. Для широкого круга потребителей информация Центра доступна на Интернет-сайте Центра (<http://forecast.izmiran.ru>) и по телефонному автоответчику (495)775-43-57. Ежедневно за информацией Центра обращаются сотни потребителей из России и других стран мира.

Наряду с экспериментальными исследованиями проводились также теоретические работы, непосредственно связанные с основными направлениями деятельности института — по теоретической астрофизике, физике плазмы, радиофизике и др.

В теоретических работах с использованием наблюдательных данных получены ограничения на магнитное поле в радиационной зоне (РЗ) Солнца. Наличие предполагаемых магнитных полей в центральных областях Солнца приводит к возникновению магнито-гравитационных волн, которые, в свою очередь, вызывают возмущения плотности в РЗ, влияющими на нейтринные осцилляции при условии совпадения длины МГД-волны и длины осцилляции нейтрино $L \approx 100...200$ км (параметрический резонанс). Глобальный анализ нейтринных данных позволяет получить ограничения на длины волн возмущений плотности и их амплитуду в РЗ для таких коротковолновых колебаний, не связанных с чисто гравитационными g -модами. Крупномасштабное магнитное поле в центральных областях Солнца является также возможным источником наблюдаемого сдвига частоты колебаний, которые найдены экспериментально и являются кандидатами в g -моды глобальных колебаний Солнца. По наблюдаемому магнитному сдвигу частоты дипольной моды ($l = 1$) радиального порядка $n = -10$ (мода g_0^1) получено значение поля $B \approx 2500$ кГс. Для низкочастотных g -мод порядка $|n| > 20$, величина магнитного поля, отвечающая тому же 1%-му сдвигу частоты, значительно меньше, $B \leq 300$ кГс. Эти ограничения на величину магнитного поля в центральных областях Солнца находятся в соответствии с полученными ранее ограничениям на магнитное поле из глобального анализа влияния МГД-возмущений плотности на нейтринные осцилляции в общепринятой модели Михеева-Смирнова-Вольфенштейна.

Развита кинетическая теория пространственно-временных нелокальных флуктуации в столкновительной плазме и предложен новый метод дистанционной диагностики локальных градиентов в плазме. Показано, что амплитуду и ширину спектральных линий флуктуации в плазме определяют как мнимая часть диэлектрической восприимчивости, так и пространственно-временные производные от её действительной части. В пространственно-неоднородной плазме появляется асимметрия спектральных линий по отношению к смене знака частоты, и измерение этой асимметрии может служить мерой локальных градиентов в плазме.

Исследованы нелинейные волновые процессы. Найдены однопараметрические траекторные вариационные принципы для распространения мощных волновых пучков и волн в нелинейных средах с внутренней структурой, в том числе обобщение вариационного принципа Ферма на случай нелинейных сред, в котором роль параметра играет полная интенсивность пучка. Развита аналитическая теория локализованных волновых процессов и найдены новые асимптотические методы, существенно расширяющие круг решаемых волновых задач.

Рассмотрено магнитогидродинамическое (МГД) описание бесстолкновительной плазмы с использованием 16-моментных уравнений переноса, которые приводят к анизотропной МГД с тепловыми потоками. Найдены и изучены новые дополнительные сжимаемые моды, которые являются асимметричными по отношению к направлению внешнего магнитного поля, т.е. волны распространяются вдоль и против магнитного поля с разными скоростями. В области взаимодействия мод возможны оба типа неустойчивостей — аperiodическая и колебательная. При резонансном взаимодействии трёх обратных мод в условиях возникновения классической шланговой неустойчивости возникает новый тип неустойчивости, инкремент которой превосходит максимум инкремента обычной шланговой неустойчивости. Полученные результаты представляют интерес для описания волновых явлений в таких средах как плазма солнечной короны, солнечного ветра и магнитосферы.

В настоящей статье приведены лишь некоторые полученные в ИЗМИРАН результаты, дающее представление о деятельности института за последние годы.

Сотрудники института принимают широкое участие в международных научных организациях и конференциях, являются руководителями и членами ряда научных советов и организаций, участвуют в реализации крупных международных научных программ и проектов — Международный гелиогеофизический год (2007). Международный год астрономии (2009), Международные программы SKOSTEP CAUSES (Climate And Weather of the Sun-Earth System) и VarSITI (Variability of the Sun and its Terrestrial Impact) и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Свой 75-летний юбилей ИЗМИРАН встречает зрелым научным учреждением со сложившимися научными направлениями деятельности, актуальность

и перспективность которых проверена временем. Эти направления охватывают широкий круг исследований физических процессов и явлений, происходящих на Солнце и межпланетной среде, в магнитосфере, ионосфере и атмосфере Земли, в её недрах. По всем этим направлениям фундаментальных исследований ведутся экспериментальные и теоретические работы, выполняются разработки для практического использования, для нужд радиосвязи, навигации, космической деятельности, экологии и др.

Оглядываясь на свой 75-летний путь ИЗМИРАН и дальше будет достойно вносить свой вклад в фундаментальную науку и в практические применения её достижений.

ЛИТЕРАТУРА

- Электромагнитные и плазменные процессы от Солнца до ядра Земли: сб. ст. / Отв. ред. В. В. Мигулин. М.: Наука, 1989. 360 с.
- Распопов О. М., Копытенко Ю. А., Эфендиева М. А., Мещеряков В. В.* Развитие геомагнитных исследований в России от начала наблюдений до 1918 г. // История наук о Земле. 2009. Т. 2. № 1. С. 18–43.
- Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б. Справочные приложения, базы и банки данных. Т. 1–3. Ионосферная плазма. Ч. 1 / Под ред. В. Д. Кузнецова, Ю. Я. Ружина. М.: Янус-К, 2008. 548 с. Энциклопедическая сер.
- Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б. Справочные приложения, базы и банки данных. Т. 1–3. Ионосферная плазма. Ч. 2 / Под ред. Андреевой Е. С., Ружина Ю. Я., Афраймович Э. Л. и др. М.: Янус-К, 2009. Энциклопедическая сер. 512 с.