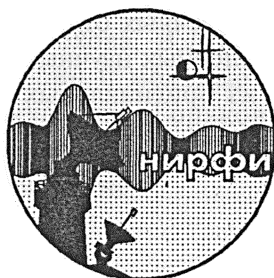


Министерство образования Российской Федерации

Ордена Трудового Красного Знамени
Научно-исследовательский радиофизический
институт

К 45-летию НИРФИ
Современность и перспективы



Нижний Новгород
2001 г.

К 45 летию НИРФИ. Современность и перспективы.

// Препринт № 468. – Н.Новгород: НИРФИ, 2001. – 80 с.

УДК 501

В препринте, посвященном юбилею НИРФИ, показана современная жизнь института. Представлены наиболее значимые результаты исследований научных отделов, показаны достижения и перспективы развития основных научных направлений.

Издание состоит из оригинальных статей, представленных всеми научными отделами.

В 2001 году исполнилось 45 лет с момента образования Научно-исследовательского радиофизического института – первого в стране института радиофизического профиля.

Научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ) Министерства образования Российской Федерации основан в 1956 году Постановлением Совета Министров СССР для проведения фундаментальных исследований в области радиофизики, радиотехники и радиоастрономии. Ядром научного коллектива стали известные физики М.Т.Грехова, В.Л.Гинзбург, В.С.Троицкий, И.Л.Берштейн, М.М.Кобрин и молодые ученые – выпускники радиофизического факультета Горьковского университета: А.В.Гапонов-Грехов, Г.Г.Гетманцев, Б.Н.Гершман, Н.Г.Денисов, В.А.Зверев, М.А.Миллер и другие.

Основные научные направления

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ИОНОСФЕРЫ, РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

распространение волн в различных средах;
модификация ионосферы мощным радиоизлучением;
радиофизические методы диагностики атмосферы и околоземной плазмы;
физика атмосферы, ионосферы и магнитосферы

ФИЗИКА СОЛНЦА И СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ

физика энерговыделения в атмосфере Солнца;
прогнозирование солнечных вспышек;
влияние солнечной активности на процессы в околоземном пространстве.

РАДИОАСТРОНОМИЯ И ФИЗИКА КОСМОСА

исследования галактического радиоизлучения,
протяженных и дискретных радиоисточников,
радиоастрономия Солнечной системы;
астрофизика высоких энергий, механизмы генерации
и распространения радиоволн в космической плазме;
астрометрия и координатно-временное обеспечение.

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ СРЕД И ОБЪЕКТОВ

радиофизические и акустические методы дистанционного зондирования,
обратные задачи диагностики;
определение структуры атмосферы и подстилающей поверхности,
подповерхностное зондирование;
медицинская диагностика.

ПРИКЛАДНАЯ АКУСТИКА И СТАТИСТИЧЕСКАЯ РАДИОФИЗИКА

излучение и распространение акустических и сейсмических сигналов в
неоднородных и нелинейных средах, вибродиагностика;
нелинейная радиолокация, помехоустойчивость и электромагнитная
совместимость радиотехнических средств.

Основные загородные лаборатории НИРФИ

РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ “ЗИМЕНКИ”

Основана в 1949 году, расположена в 30 км от Нижнего Новгорода. Проводятся патрульные радионаблюдения солнечной активности, исследования ионосферы и атмосферы Земли. Имеются: серия параболических радиотелескопов, установка для радиоакустического зондирования атмосферы, учебные лаборатории для студентов. В “Зименках” обнаружена частичная поляризация распределенного космического радиоизлучения (открытие В.А.Разина), а также генерация электромагнитных волн модулированными токовыми системами (открытие группы Г.Г.Гетманцева).

ЛАБОРАТОРИЯ “ВАСИЛЬСУРСК” (включена в перечень Уникальных научных установок России)

Организована в 1965 году, расположена в 140 км от Нижнего Новгорода. Проводятся: модификация ионосферы мощными радиоволнами, радиолокационные исследования верхней атмосферы и ближнего космоса, радиоастрономические исследования. Имеется экспериментальный нагревный стенд “Сура”, основу которого составляют три радиопередатчика мощностью 250 кВт каждый и трехсекционная диапазонная (4,3–9,5 МГц) приемопередающая антенна.

РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

“СТАРАЯ ПУСТЫНЬ” (включена в перечень Уникальных научных установок России)

Основана в 1964 году, расположена в 100 км от Нижнего Новгорода. Проводятся исследования в области радиоастрономии, исследования атмосферы и ионосферы, антенные измерения. Имеются: система апертурного синтеза из параболических радиотелескопов, интерферометр из двух радиотелескопов и две фазированные антенные решетки для поляризационных исследований.

РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ “КАРАДАГ”

Основана в 1964 году, расположена в Крыму. Проводятся радиоастрономические исследования, дистанционное зондирование атмосферы и морской поверхности. Имеются: параболические антенны, установка “искусственная луна”, стенд для дистанционного зондирования морской поверхности. На Карадаге обнаружено увеличение усредненной радиотемпературы Луны с ростом длины волны излучения (открытие В.С.Троицкого и В.Д.Крогикова).

Отдел астрофизики и дистанционного зондирования*К.С.Станкевич*

Основные научные направления отдела сложились ещё в 60-е годы, когда СВЧ-радиоастрономия начинала развиваться в многоплановом отделе №7 под руководством Всеволода Сергеевича Троицкого. Огромное влияние на становление радиоастрономии в Горьком оказал Виталий Лазаревич Гинзбург, в то время возглавлявший кафедру распространения радиоволн Горьковского государственного университета. Его лекции и семинары по радиоастрономии и происхождению космических лучей для радиофизиков послужили введением в важнейшие проблемы новой науки и способствовали формированию направлений исследования. Окончившие аспирантуру под руководством Виталия Лазаревича впоследствии стали ведущими учёными в области астрофизики и радиоастрономии. Позднее, в 1984 г., после учреждения специализации по радиоастрономии кафедра была переименована в кафедру радиоастрономии и распространения радиоволн (В.П.Докучаев, К.С.Станкевич) и на базе ряда отделов её филиал образован в НИРФИ. Ещё в те далёкие времена отделу для создания необходимой экспериментальной базы и ведения научных исследований по фундаментальным проблемам радиоастрономии и радиофизики бюджетного финансирования было недостаточно. Поэтому приходилось зарабатывать средства, ведя прикладные исследования. Нужно заметить, что становление радиоастрономии как раздела науки в стране, и у нас в Горьком, стало возможным тоже только благодаря Постановлению Правительства, организованному по инициативе Семёна Эммануиловича Хайкина, по которому предписывалось исследовать распространение радиоволн, используя источники внеземного излучения. Все прикладные работы в отделе

В.С.Троицкого велись с применением радиоастрономических методов и аппаратуры. Такой вид деятельности в академических кругах именовался “прикладной радиоастрономией”. Хотя работы выполнялись в конкретных целях, определённых заказчиком, но они по существу были фундаментальными, внесшими весомый вклад в создание новых разделов науки – пассивной радиолокации, дистанционного зондирования сред, техники антенных измерений. Вот эта сложившаяся “двуединая” тематика оказалась весьма плодотворной и особенно пригодилась отделу в тяжёлые времена последнего десятилетия.

В отделе Всеволода Сергеевича всегда уделялось особое внимание созданию новых методов исследований. В 60-х годах по его инициативе началась разработка методов точных прецизионных измерений интенсивностей слабых шумовых излучений космических источников. Работами В.С.Троицкого, В.Д.Кротикова, В.А.Порфирьева, К.С.Станкевича, Н.М.Цейтлина, В.П.Иванова был создан метод “искусственной луны”, позволивший измерять плотности потоков с погрешностью 2–3%. Для оптимальной реализации уникальных возможностей метода необходим особый рельеф горной местности. После ряда экспедиций в Крым в 1961–1964гг., в которых отрабатывались детали метода и были получены первые результаты точных измерений потоков ряда дискретных источников, было решено создать для абсолютных измерений постоянную радиоастрономическую станцию. В 1966–1969гг. в Крыму, в Феодосийском районе, была основана Карадагская радиоастрономическая станция, оборудованная двумя полноповоротными радиотелескопами с диаметром антенн 7 и 12м и установкой для эталонирования космических излучений “искусственная луна” (В.С.Троицкий, К.С.Станкевич, С.А.Каменская, Л.Н.Бондарь, В.А.Торхов).

После создания наблюдательной базы начались широкомасштабные исследования радиоизлучений Луны и дискретных источников. Абсолютные измерения спектров эталонных

дискретных источников на Карадаге обеспечивали точную калибровку антенн Центров дальней космической связи в Симферополе (32м) и Евпатории (25 и 70м), эти же антенны использовались для радиоастрономических измерений (К.С.Станкевич, В.П.Ласточкин, С.А.Пелюшенко, В.П.Иванов, И.Т.Бубукин, В.И.Алтунин, М.И.Агафонов).

В тех же 60-х годах Иосиф Самуилович Шкловский построил теорию векового уменьшения плотности потока остатков сверхновых и показал, что изменения можно обнаружить при сравнении радиоастрономических данных, выполненных с интервалом в несколько лет. Это было очень важное событие. До него никто не предполагал, что радиоастрономические источники могут изменять мощность излучения достаточно быстро, ожидалось, что эволюция излучений возможна, но скорость процессов ничтожно мала. Таким образом, в случае обнаружения векового уменьшения потока открывалось новое научное направление в радиоастрономии – исследование эволюции излучений остатков сверхновых и энергетических процессов в них. Точные абсолютные измерения потоков и спектров радиоисточников являлись адекватным методом обнаружения и исследования эволюции излучений молодых остатков сверхновых.

По результатам абсолютных измерений, проводившихся во время экспедиций в Крым в 1961–1964гг., было обнаружено уменьшение плотности потока остатка сверхновой Кассиопея А на ряде длин волн сантиметрового диапазона (К.С.Станкевич, В.П.Ласточкин, В.С.Лазаревский). Эти результаты были в числе первых наблюдательных данных, подтвердивших идею Иосифа Самуиловича. Он всегда живо интересовался нашими работами, поддерживал их и неоднократно бывал с нами в экспедициях. Наилучшие условия исследований эволюционных эффектов излучений дискретных источников были созданы на Карадагской радиоастрономической станции, что вошло в научную тематику отдела. Позднее, при систематических исследованиях выяснилось,

что эволюция имеет весьма сложный характер, протекает по-разному у плерионов и оболочечных источников и сопровождается рядом нестационарных эффектов.

В коротком экскурсе в историю я хотел отметить, как складывалась тематика отдела, по крайней мере отдельные направления, и отдать дань уважения тем людям, которые оказали на неё влияние. К настоящему времени в предшествующие юбилею института годы в отделе астрофизики и дистанционного зондирования сложились следующие научные направления, в которых получены основные научные результаты.

В области астрофизики и радиоастрономии:

1. нестационарные процессы и эволюция излучений радиосверхновых и исторических остатков сверхновых, планетарных туманностей, механизмы генерации излучений и их энергетика;
2. внегалактические радиоисточники: форма и статистика радиоспектров, разделение эффектов внутренней и космологической эволюции, предельные яркостные температуры;
3. точные радиоастрономические шкалы плотностей потоков и спектров радиоисточников, абсолютные измерения потоков и спектров эталонных источников и планет.

В области радиофизики – дистанционное зондирование:

1. собственные излучения природных и лабораторных сред, механизмы нестационарных излучений сред;
2. дистанционное зондирование атмосферы и водной поверхности;
3. исследование энергообмена на границе морская поверхность – атмосфера, тепловые потоки в температурной плёнке на морской поверхности;
4. диагностика экологического состояния окружающей среды.

В области радиофизики:

1. распространение коротких электромагнитных волн в атмосфере;
2. методы и приборы точных абсолютных измерений интенсивностей дискретных источников;

3. методы и приборы точных абсолютных измерений интенсивностей распределённых излучений природных и космических сред, в том числе нестационарных излучений.

Фундаментальные исследования отдела по перечисленным направлениям поддерживались грантами ГНТП “Фундаментальные космические исследования. Астрономия”, Ведущей научной школы “Галактическая и внегалактическая радиоастрономия и межзвёздная среда”, РФФИ и Минобразования РФ, Программ “Интеграции фундаментальной науки и высшего образования” – проект Учебно-научного центра “Фундаментальная радиофизика” и проект Учебно-научного центра “Физические технологии в машиностроении”, а также заказом-нарядом Минобразования.

Экспериментальные и теоретические работы проводились научными сотрудниками отдела д.ф.-м.н. проф. К.С.Станкевичем, к.ф.-м.н. в.н.с. И.Т.Бубукиным и В.П.Ивановым, к.ф.-м.н. с.н.с. О.И.Шаровой, н.с. С.П.Столяровым, ведущим программистом О.А.Подвойской. Неоценимую помощь в обеспечении экспериментальных исследований оказала ведущий инженер Л.В.Дёмина. В исследованиях принимали участие студенты, магистранты и аспиранты кафедры радиоастрономии и распространения радиоволн Нижегородского государственного университета им. Н.И.Лобачевского.

Основные научные результаты в области астрофизики и радиоастрономии.

Исследована эволюция радиоизлучения исторических остатков сверхновых Кассиопея А, Тихо Браге, Кеплера, Крабовидной туманности и ОСН 1181г.(3С58), авторы К.С.Станкевич, В.П.Иванов, С.П.Столяров.

Наблюдаемый в диапазоне частот от 5 МГц до 250 ГГц спектр радиоизлучения остатка сверхновой 1680г. Кассиопея А имеет ряд особенностей: изменение спектрального индекса на нисходящей части

спектра с частотой излома около 300 МГц и завал на частотах ниже 15 МГц. Собственный низкочастотный спектр излучения формируется синхротронным самопоглощением и на частотах, меньших максимума, ослабляется поглощением в межзвёздной плазме и в области НП вокруг источника.

Синхротронное радиоизлучение источника Кассиопея А генерируется релятивистскими электронами с нестепенным распределением энергий вида стандартного распределения Каплана – Цыговича, имеющего энергию в максимуме $E = 3,3$ МэВ. Полная концентрация релятивистских электронов равна 10^{-3} см⁻³, из них только 20% радиоизлучающих.

Отношение числа частиц протонно–ядерной и электронной компонент космических лучей внутри оболочки остатка сверхновой Кассиопея А существенно отличается от среднего галактического (100) и, вероятно, не превосходит единицу.

За время, прошедшее после открытия в 1948г. радиоизлучения остатка сверхновой Кассиопея А, его светимость уменьшилась на четверть. По данным абсолютных измерений с 1962г. по 1997г. установлено, что в диапазоне частот 0,5–37 ГГц уменьшение светимости сопровождается перераспределением энерговыделения по спектру: скорости падения плотностей потоков уменьшаются с ростом частоты, уменьшается со временем и спектральный индекс излучения. Энергетические процессы нестационарны, в последние 10–15 лет отмечается их замедление. Эти результаты обобщены в модели вековых изменений энергии релятивистских электронов и магнитного поля в оболочке остатка сверхновой.

Рассмотрено ускорение в токовых слоях, в областях пересоединения магнитных силовых линий на контактных поверхностях, как причина генерации нестационарных спектров радиоизлучения.

Впервые по радионаблюдательным данным на радиотелескопе РТ-70 получена скорость уменьшения потока остатка сверхновой Кеплера (1604г.), которая составила 0,24% в год, определены средняя

скорость расширения и параметр замедления. Показано, что предсверхновой являлась звезда большой массы.

По результатам наблюдений остатка сверхновой Тихо Браге (1572г.) на ряде частот сантиметрового диапазона определена средняя скорость уменьшения потока 0,41% в год и не обнаружено частотной зависимости этой величины. Показано, что в современную эпоху остаток находится в стадии адиабатического расширения. Среди галактических и внегалактических остатков сверхновых, имеющих возраст более нескольких сотен лет, только у остатка сверхновой 1181г. было обнаружено нами систематическое нарастание плотности потока, со скоростью 0,2%, которая не изменялась по спектру. OSH 1181г. принадлежит к другому классу объектов – остаткам сверхновых крабовидного типа.

Длительные абсолютные измерения мгновенных спектров Крабовидной туманности и восстановление мгновенных спектров по данным относительных измерений позволили исследовать эволюцию радиоизлучения за 45 лет с 1955 по 2000гг. Обнаружено регулярное (эволюционное) и спорадическое изменение светимости. С момента обнаружения радиисточника в 1948 г. и до наших дней светимость уменьшилась почти на 9% с регулярной скоростью 0,16% в год. Выделены два временных интервала: 1981–1987гг. и 1991–1996гг. спорадического возрастания светимости на 4% в среднем над уровнем регулярной составляющей. Причиной увеличения светимостей является уменьшение наклона спектра вследствие повышения плотностей потоков на коротких сантиметровых волнах. Наряду с вековым уменьшением интенсивностей обнаружены нестационарные изменения формы и наклона радиоспектра после 1975г., особенно значительные после 1983г. В диапазоне частот 500–1100 МГц обнаружены после 1988г. отклонения спектра от степенного в виде провала, достигающего в некоторые годы 12%. Явление дефицита светимости нестационарно и составляет около 6% от светимости туманности в этом диапазоне частот.

Показано, что нестационарные изменения происходят во внутренней оболочке туманности, эволюционные охватывают весь

объём туманности. Показано также, что в эволюции радиоизлучения туманности регулярная и нестационарная компоненты отражают изменения в инжектируемой пульсаром энергии. Нестационарные процессы в туманности начались после катастрофических изменений излучений пульсара в 1974г. и отмечены в оптике и рентгене.

На основе установленной статистической зависимости между температурой и радиусом звезды – ядра планетарной туманности – создана новая шкала расстояний до этих объектов. Разработан метод определения температуры центральной звезды по радиопотоку планетарной туманности и её излучению в запрещённых линиях. Проведён анализ имеющихся (девяти) шкал расстояний и проведено их сопоставление с индивидуальными измерениями расстояний для 110 планетарных туманностей. Показано, что новая шкала значительно лучше согласуется с расстояниями, измеренными для планетарных туманностей любого линейного размера. Разработана теория уменьшения потока планетарной туманности при резком падении температуры центральной звезды. С привлечением новой шкалы расстояний определены линейные радиусы, концентрации атомов водорода и массы ионизованного газа для 186 планетарных туманностей. Установлены регрессионные зависимости этих параметров от кинематического возраста туманности, они согласуются с теоретическими в модели взаимодействующих звёздных ветров при условии скорости потери массы центральной звездой порядка 10^{-7} масс солнца в год (О.И.Шарова).

В период с 16 по 21 июля 1994г. произошли столкновения Юпитера с кометой Шумейкера-Леви 9. Это событие наблюдалось нами по единой программе совместно с ИРФЭ НАН Армении на радиоастрономической станции Карадаг (8мм) РТ-7 и в Евпатории (3,7см) РТ-70. Обнаружено значительное падение дисковой температуры Юпитера, достигшее 32% на волне 8 мм и 17% на 3,7 м относительно невозмущённого уровня. Через год (июль 1995г.) после этого события по измерениям на Карадаге обнаружилось, что дисковая температура ещё не восстановилась до невозмущённого уровня и

отличия составляли около 10%, и только по измерениям 1997г. было зафиксировано возвращение к уровню до 16 июля 1994г. Модель выпадения на поверхность Юпитера холодного пылевого вещества кометы объясняет этот эффект (В.П. Иванов, С.П.Столяров, К.С.Станкевич).

В абсолютной радиоастрономической шкале потоков и спектров, определённой по методу “искусственной луны”, увеличено число стандартных источников с эталонными спектрами до 60, позволяющими применять шкалу для измерения минимальных плотностей потоков порядка 20 мЯн на частоте 5 ГГц. Абсолютная шкала имеет диапазон частот от 26 МГц до 31 ГГц. Спектры стандартных источников определены с погрешностью 3–4%. Форма спектров эталонных источников установлена методом относительных спектров (В.П.Иванов) по данным относительных измерений в диапазоне частот шкалы. Абсолютные величины плотностей потоков получены на основе точных абсолютных измерений по методу “искусственной луны” в интервале частот 0,5–10 ГГц. Шкала существенно уточнена на частотах выше 15 ГГц на основе новых данных миллиметровых измерений (В.П.Иванов).

В шкале потоков “искусственной луны” определены спектры более 100 объектов, принадлежащих внегалактическим источникам с крутыми спектрами, обнаружена новая закономерность в статистике спектров. Для большинства спектров на частотах 178 МГц–14.9 ГГц характерна форма с изломом, также имеются источники с постоянным спектральным индексом. Для радиогалактик и квазаров с изломами в спектрах получены распределения частот излома в координатах, связанных с источниками. Распределения близки к логарифмически нормальным. Частота максимума распределения для радиогалактик равна 1250МГц, для квазаров – 2500МГц. Определены средние спектральные индексы для радиогалактик и квазаров в зависимости от частоты. У тех и других на частотах ниже 3 ГГц спектральные индексы увеличиваются с ростом частоты. На более высоких частотах у галактик крутизна среднего спектра сохраняется, спектр квазаров

уплощается. Результат может быть использован для исследования космологической эволюции радиоисточников. (В.П.Иванов, О.И.Шарова)

Основные результаты в области радиофизики – дистанционное зондирование атмосферы.

Разработан метод дистанционного исследования диэлектрических свойств воды в каплях, основанный на одновременном измерении яркостных температур облаков на двух длинах волн вне линии поглощения водяного пара. Метод реализован в созданном радиометрическом стенде, работающем на длинах волн 0,8 и 2см.

Проведено исследование спектров радиоизлучения 250 кучевых облаков лёгкого и среднего типа. Показано, что отношение радиояркостных температур на длинах волн 0,8 и 2см в различных ситуациях меняется до 60%. Изменения частотной зависимости происходят за счёт избытка радиояркостной температуры в низкочастотном крае спектра; эффект не зависит от температуры и солёности воды в каплях.

В рамках теории теплового излучения сред эффект интерпретирован как изменчивость времён молекулярной релаксации воды в мелкодисперсных каплях с размерами менее 3–4 мкм. В наблюдавшихся ситуациях времена релаксации увеличены и распределены в интервале $(2.5-4.5) \cdot 10^{-11}$ с и являются индивидуальной характеристикой каждого кучевого облака. Исследование спектров излучения тонких слоистых облаков показали, что частотная зависимость описывается стандартными моделями диэлектрической проницаемости воды, поскольку размер капель существенно больше, чем в тонких кучевых облаках и достигает сотен микрон. Обнаруженный эффект может являться методом диагностики экологического состояния облаков (К.С.Станкевич, В.Е.Дудин, В.М.Плечков, О.А.Подвойская).

При экспериментальных исследованиях слоистой облачности в условиях орографического эффекта обнаруживаются

квазипериодические изменения яркостной температуры, причиной которых является как внутренняя гравитационная волна (ВГВ), так и горизонтальный перенос неоднородностей. Предложен метод выделения колебательных процессов, связанных с ВГВ, заключающийся в выделении состояний с противофазными изменениями влаги и водосодержания. Коэффициент корреляции составлял до 0,85. Характерный период в среднем соответствует частоте Брента–Вейсала. Амплитуда и период имеют сезонную зависимость и увеличиваются при понижении приземной температуры. Предложен алгоритм определения параметров волновых процессов в нижней атмосфере, основанный на 3-частотном зондировании (0,8; 1,35 и 2 см), позволяющий разделять вертикальные и горизонтальные перемещения воздушных масс (В.М.Плечков, К.С.Станкевич).

Основные результаты в области радиофизики – дистанционные исследования морской поверхности.

На основе натуральных экспериментов и развитой теории радиоизлучения морской поверхности показано, что флуктуации радиоизлучения взволнованной морской поверхности могут быть описаны только с помощью четырех попарно ортогонально линейно поляризованных флуктуационных компонент электромагнитного поля (0; 90 градусов и 45; 135 градусов): первая пара характеризует наклоны волн в плоскости визирования, вторая – в перпендикулярной плоскости. Доказано, что каждая пара компонент имеет высокую корреляцию флуктуаций.

Разработан метод измерения яркостной температуры морской поверхности, исключаящий флуктуации, вызванные энергонесущими компонентами ветрового волнения. Его применение на порядок улучшает отношение сигнала к шуму, создаваемому флуктуациями яркостной температуры из-за ветрового волнения. Метод реализован в созданной радиометрической системе.

Создан метод измерения температуры воды в поверхностной плёнке в условиях ветрового волнения по одновременно полученным

данным о радиояркостной температуре и излучательной способности морской поверхности на нескольких частотных каналах в полосе поглощения атмосферного кислорода 5 мм.

Разработанные методы позволяют решать фундаментальную задачу измерения температурного градиента в термических плёнках морской поверхности, а по нему определять энергообмен на границе морской поверхности и атмосферы.

Разработан дистанционный метод определения спектра волнения и динамики его развития по спектру флуктуаций радиояркостной температуры моря.

Разработан метод определения анизотропии волнения по поляризационной структуре радиоизлучения моря. В результате применения этих методов определяется направление и сила ветра.

По радиометрическим измерениям получен суточный ход температуры морской поверхности в поверхностной температурной плёнке (глубина 1,5 мм). Выявлены эффекты радиационно-теплового обмена.

Впервые по радиометрическим данным сделаны оценки градиента температуры и теплового потока в поверхностной температурной плёнке.

Получены данные об изменениях радиояркостной температуры морской поверхности из-за гравитационно-капиллярных волн в зависимости от направления и скорости ветра (радиационно-ветровые зависимости), необходимые для построения адекватных моделей, связывающих характеристики микроволнового излучения с параметрами морской поверхности (И.Т.Бубукин, К.С.Станкевич, В.П.Иванов).

В дальнейшем развитии перечисленной выше тематики просматриваются перспективы отдела.

Отдел галактической и внегалактической радиоастрономии*В.А.Разин*

Основные научные направления отдела сформировались уже в первые годы существования НИРФИ и в дальнейшем получили развитие. Эти направления следующие:

- поляриметрические исследования синхротронного радиоизлучения Галактической межзвездной среды на волнах метрового и дециметрового диапазонов, поляриметрические исследования радиогалактик и молодых остатков сверхновых на волнах дециметрового и сантиметрового диапазонов волн;
- абсолютные и относительные измерения плотностей потоков радиоизлучения мощных радиогалактик и молодых остатков сверхновых;
- радиоастрономические методы исследования антенн;
- прикладные исследования с использованием методов радиоастрономии.

1. Поляриметрические исследования Галактики и космических радиоисточников

Исследования линейной поляризации синхротронного радиоизлучения Галактики эпизодически выполнялись в НИРФИ со времени образования института. Но регулярно они стали проводиться после создания в 1964–1966 гг. Радиоастрономической обсерватории (РАО) НИРФИ “Старая Пустынь” в Арзамасском районе Нижегородской области (географические координаты: широта места $\varphi = 55^{\circ}39'18''$, долгота $\lambda = 2^{\text{h}}54^{\text{m}}32^{\text{s}}$).

В НИРФИ получены уникальные экспериментальные данные о поляризации радиоизлучения Галактики на волнах дециметрового и метрового диапазонов, причем данные наблюдений в метровом диапазоне являются наиболее полными по охвату частотного

диапазона; разработаны основы теории поляризации синхротронного радиоизлучения Галактики; показано, что многоволновые поляриметрические исследования являются эффективным методом изучения трехмерной структуры галактического магнитного поля, пространственного распределения ионизированного газа и релятивистских электронов в межзвездном пространстве. Ведущая роль в проведении и обеспечении поляриметрических исследований галактического радиоизлучения, выполненных в НИРФИ, принадлежит В.А.Разину, А.Н.Родионову, В.В.Хрулеву, А.А.Мельникову, Л.В.Пупышевой-Поповой, В.Т.Федорову, А.А.Петровскому, П.А.Капустину, А.М.Пасеке, И.П.Хижняковой-Кузнецовой, А.И.Теплых, Е.Н.Виняйкину, Б.С.Формозову, А.Ю.Строкову, В.И.Абрамову, Л.Б.Трофимовой.

Разработаны поляризационные тракты и с их использованием на крупнейшем радиотелескопе РАТАН-600 (САО РАН) выполнены исследования углового распределения линейно поляризованного радиоизлучения центральной области нашей Галактики, мощных радиогалактик (Лебедь А, Дева А, Центавр А) и молодых остатков сверхновых (Кассиопея А, Телец А) в дециметровом и сантиметровом диапазонах волн (В.И.Абрамов, Е.Н.Виняйкин).

В последние годы начаты радиополяризационные исследования в рамках Итальянско-Российской программы SPORt (В.А.Разин, Е.Н.Виняйкин). Совместно с итальянскими коллегами (S.Cortiglioni и др. – Институты TeSRE/CNR, IRA/CNR, Италия) выполнены измерения линейной поляризации галактического радиоизлучения и получены поляризационные карты Луны на частоте 8,3 ГГц. (Е.Н.Виняйкин, В.Д.Кротиков).

2. Измерения плотностей потоков радиоизлучения космических источников

Измерения плотностей потоков радиоизлучения космических источников различной природы были начаты в НИРФИ Г.Г.Гетманцевым, В.С.Троицким, В.А.Разиным, В.М.Плечковым,

В.Д.Кротиковым, В.А.Порфирьевым, Н.М.Цейтлиным. Важное место в этих исследованиях занимают разработки новых методов прецизионных абсолютных измерений плотностей потоков радиоизлучения космических источников с использованием в качестве эталонных источников радиоизлучения дисков, покрытых поглощающим радиоволны материалом (“черных” дисков), размещенных в ближней зоне антенны. Этот метод, реализованный в РАО «Старая Пустынь», позволил проводить измерения с погрешностью 3–5%. В результате удалось получить прецизионные абсолютные спектры плотностей потоков радиоизлучения ряда дискретных источников (Лебедь А, Дева А, Кассиопея А и Телец А) на волнах сантиметрового и дециметрового диапазонов (Н.М.Цейтлин, Д.А.Дмитренко, А.А.Романычев, Л.В.Дмитренко и др.). Дальнейшее повышение точности измерений методом “черных” дисков возможно при использовании двухтемпературных эталонов (Н.А.Дугин, Л.В.Дмитренко, В.Т.Корелов).

В течение более чем 30 лет в РАО «Старая Пустынь» ведутся патрульные наблюдения плотностей потоков радиоизлучения молодых остатков сверхновых по отношению к стабильным радиоисточникам (радиогалактики и НП-области). Эти измерения, с учетом ведущихся сотрудниками отдела измерений на радиотелескопе ДКР-1000 (АКЦ ФИ РАН, Пущино), охватывают диапазон 38–2924МГц (Е.Н.Виняйкин, В.А.Разин, В.Т.Федоров).

Большой объем работ был выполнен в отделе по созданию и использованию малобазовых интерферометров в Старой Пустыни для исследований космических радиоисточников и “поляризованных” структурных деталей в распределенном радиоизлучении (В.А.Разин, Н.М.Цейтлин, А.А.Романычев, Н.А.Дугин, В.И.Турчин, В.С.Беагон, Л.Р.Семенова, А.И.Теплых, Е.Н.Виняйкин, И.П.Кузнецова, Л.А.Добрушский, Н.А.Кузнецова, В.Д.Вьюгин).

3. Радиоастрономические методы антенных измерений

Радиоастрономические методы антенных измерений развивались в НИРФИ в тесной связи с уже отмеченными

радиоастрономическими исследованиями, а также с целью обеспечения различных работ прикладного характера. Основополагающий вклад в развитие этого направления внесли В.С.Троицкий, Н.М.Цейтлин, Ю.И.Белов, В.И.Турчин, А.В.Калинин, А.Л.Фогель, В.С.Коротков, В.С.Беагон, Г.А.Кисляков. Существенное развитие получил в НИРФИ радиоастрономический корреляционный метод измерений параметров антенн (Н.М.Цейтлин, В.С.Коротков, В.И.Турчин, А.В.Калинин, А.А.Романычев). В 1991–1993 гг. в НИРФИ был создан автоматизированный комплекс для корреляционных измерений характеристик крупногабаритных антенн по сигналам геостационарных ИСЗ и дискретных космических радиоисточников. В 1994–1996 гг. разработанные аппаратура и методики измерений были применены для исследования и повышения качества поверхности главного зеркала 64-метрового радиотелескопа ТНА-1500 ОКБ МЭИ в п. Медвежьих Озерах (А.В.Калинин, В.С.Беагон, Г.А.Кисляков и др.). Выполненные в НИРФИ разработки аппаратуры и методик корреляционных измерений успешно используются для определения параметров антенн и юстировки также и других крупнейших радиотелескопов.

4. Исследования атмосферы и ионосферы радиоастрономическими методами

Методы поляризационных измерений радиоизлучения Галактики были использованы для исследования собственного радиоизлучения атмосферы на дециметровых волнах. Установлено, что яркостная температура радиоизлучения уменьшается с частотой и близка к расчетной по теории Ван Флека (В.В.Хрулев, С.А.Волохов, А.И.Теплых).

Тщательные исследования поляризационных характеристик радиоизлучения отдельных областей небосвода сделали возможным их использование в качестве эталонных для измерения полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы предложенным и реализованным в НИРФИ радиоастрономическим поляризационно-

фарадеевским (РАПФ) методом. В 1978г. в РАО «Старая Пустынь» на базе радиотелескопа РТ-10 начаты регулярные измерения ПЭС ионосферы. За прошедшие годы накоплен обширный материал по сезонным, суточным и другим вариациям ПЭС ионосферы (В.А.Разин, Л.В.Попова, А.И.Теплых, Л.А.Добрушский). Специально созданные в НИРФИ и размещенные вблизи Ашхабада (ФТИ АН ТССР) и Мурманска (ПГИ КФ АН СССР) 10-метровые радиотелескопы, оснащенные поляриметрами на 290 МГц, вместе с РТ-10 в РАО «Старая Пустынь» образовали сеть радиотелескопов примерно вдоль одного и того же магнитного меридиана. С использованием этой сети были исследованы распространяющиеся волновые возмущения электронной концентрации в ионосфере (В.А.Разин, А.И.Теплых, Н.В.Бахарев, Б.С.Формозов, А.Ю.Строков). На РАПФ-метод получены авторское свидетельство и патент на изобретение, а также акты о его использовании в ФТИ и ПГИ.

5. Прикладные исследования

Работы прикладного характера являются традиционными для НИРФИ. В краткой заметке все их невозможно даже перечислить. Поэтому отметим здесь лишь некоторые направления прикладных исследований.

В 1959–1966гг. в НИРФИ были разработаны и внедрены радиоастрономические методы измерения параметров антенн метрового диапазона радиолокационных станций дальнего обнаружения. Использование этих методов позволило получить большую экономию средств за счет сокращения самолето-вылетов при испытаниях радиолокационных станций.

В 1960–1970гг. разработанные в НИРФИ методы антенных измерений использовались в радиолокационных станциях сантиметрового и дециметрового диапазонов.

В 1982г. НИРФИ было получено авторское свидетельство (Ю.И.Белов, Н.В.Бахарев, В.Т.Корелов, В.С.Коротков, В.И.Турчин, И.В.Мосалов, Н.М.Цейтлин) на конструкцию оригинального сканера-

переносчика измерительной антенны-зонда по плоскости апертуры антенны, т.н. “биполярный сканер”. Натурная модель сканера, предназначенная для испытаний космических трансформируемых антенн радиоголографическим методом, была построена в 1983г. и использована для измерений характеристик 7-метрового радиотелескопа. Большое участие в проведении измерений принимали Ю.И.Белов, А.В.Калинин, А.Г.Серкин, Е.Е.Бенедиктова, Л.Р.Семенова и др.

В рамках ГНТП «Астрокомплекс» НИРФИ активно участвует (совместно с АКЦ ФИ РАН) в реализации пульсарной шкалы времени. Для реализации этой программы в НИРФИ разработан и изготовлен спектроанализатор для наблюдения миллисекундных пульсаров (Ю.И.Белов, В.В.Власов, Д.А.Дмитренко, Г.А.Дмитриев, Т.И.Коршунова, Б.Н.Липатов, А.А.Петровский, В.И.Сазанов, А.Г.Серкин, А.С.Сизов, Ю.В.Смирнов, В.П.Сырейщиков, Б.С.Формозов, С.О.Черникова, М.В.Янказцев).

В последние годы в отделе ведутся работы (совместно с ЦУП-М, ЦНИИМАШ), направленные на повышение эффективности космических навигационных систем, повышения точности координатных и траекторных измерений ИСЗ. При этом основное внимание уделяется исследованиям влияния ионосферы и тропосферы Земли на функционирование космических навигационных систем, на распространение сигналов от навигационных спутников (В.А.Разин, Н.А.Дугин, А.И.Теплых, И.П.Кузнецова, Л.А.Добрушский).

6. Заключение

Проводимые в настоящее время в отделе исследования выполняются при Государственной поддержке ведущих научных школ (грант № 00-15-96591), грантов РФФИ (№ 00-02-17648 и 01-02-31007к), Минпромнауки (уникальная установка регистрационный номер 0629), ГНТП “Астрономия” (проекты № 1.3.1.6, 1.3.7.2, 2.1.2.8), ФЦП “Интеграция” (проект № 570), МНТЦ (проект №729) и в рамках соглашения РАН-CNR (Италия).

Солнце, РСДБ и связанные с этим результаты

Б.Н.Липатов, С.Д.Снегирев, В.М.Фридман

В этом году исполняется 40 лет с начала работ отдела по солнечным исследованиям и 34 года со дня первых работ НИРФИ по радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой. Возглавляли эти направления работ М.М.Кобрин и В.С.Троицкий, стоявшие у истоков радиоастрономических исследований в стране и организации НИРФИ. Предтечей тех и других были исследования по радионавигации и радиоастронавигации, приведшие к созданию инструментов, широко использовавшихся в прикладных целях. Это определило и подход к начавшимся работам, в которых при преобладающей роли фундаментальных исследований всегда уделялось должное внимание их прикладной и практической направленности.

Работы по солнечному радиоизлучению базировались первоначально на создании серии радиотелескопов сантиметрового и дециметрового диапазонов длин волн, осуществлявших регулярное слежение и регистрацию потоков радиоизлучения. Таким образом, были заложены основы Службы Солнца в радиодиапазоне, Головной организацией которой в стране стала в 1966г. (М.М. Кобрин, О.И.Юдин) Радиоастрономическая станция НИРФИ “Зименки”. В связи с характером и уровнем проводимых работ РАС НИРФИ “Зименки” на протяжении 20 лет принимала активное участие в программах по представлению данных и прогноза гелиофизической обстановки для обеспечения безопасности полетов пилотируемых космических кораблей (Т.С.Подстригач). Служба Солнца являлась и продолжает являться базой исследований микроволновых спорадических явлений, основой при разработке методов диагностики солнечных вспышек и прогнозирования потоков СКЛ и геоэффективных последствий вспышек.

Создание Службы Солнца сочеталось с развитием нового направления исследований Солнца – изучением волновых и колебательных процессов в солнечной атмосфере по квазипериодическим флуктуациям солнечного радиоизлучения. Важно подчеркнуть, что это направление на многие годы определило характер многих исследований, ведущихся в стране и институте. Такие исследования были направлены на решение проблем энергопереноса и нагрева солнечной короны, на изучение магнитогидродинамических процессов в нижних слоях атмосферы Солнца (М.М.Кобрин, О.И.Юдин, В.В. Пахомов, С.Д. Снегирев, М.С. Дурасова).

Другим базовым направлением солнечных исследований в отделе явилось создание и развитие микроволновой спектрографии для изучения тонкой спектральной, временной и пространственной структур солнечных процессов, позволившее обнаружить ряд новых явлений в солнечном радиоизлучении, внести важный вклад в понимание физических процессов на предвспышечных стадиях развития активных областей и в создание новых методов краткосрочного прогнозирования (М.М.Кобрин, А.И.Коршунов, В.М.Фридман, Ю.Д.Панфилов).

Идеи развития и применения радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой во многом были заложены в НИРФИ, и это направление развивалось в институте на основе собственных методологических предложений и созданной специализированной техники. Были разработаны и изготовлены радиоинтерферометрические комплексы в широком диапазоне частот от 9 МГц до 22 ГГц. На этой технике были проведены одни из первых в мире экспериментов со сверхдлинной базой (В.С.Троицкий, В.А.Алексеев, Б.Н. Липатов, Э.Д. Гатэлюк, А.С. Сизов). Предложены основы дифференциальной интерферометрии для создания фундаментальной квазиинерциальной системы небесных координат, опирающейся на внегалактические радиоисточники, системы земных координат и их взаимные связи. Разработан метод радиоинтерферометрического определения небесных координат

космических аппаратов в целях высокоточного навигационного обеспечения их полетов; создано на базе 70-метровых радиотелескопов в Евпатории и Усурийске, 64-метрового зеркала в Медвежьих Озерах и центра обработки в НИРФИ соответствующее аппаратурное и программное обеспечение, а в 80-х и начале 90-х годов проведен ряд измерений текущих координат межпланетных аппаратов “Вега” и “Фобос” и высокоорбитальных аппаратов “Астрон” и “Гранат”. Впервые были привязаны с погрешностью менее одного метра геодезические координаты больших антенн.

С начала 90-х годов НИРФИ активно участвует в проведении РСДБ-экспериментов на глобальных базовых линиях в составе международных радиоинтерферометрических сетей, включающих крупнейшие зарубежные и российские радиотелескопы.

Сформулируем основные проблемы солнечных и РСДБ-исследований, решаемые в отделе на современном этапе, и основные результаты, полученные за последние годы.

Достигнутое базируется на использовании и развитии технической, методической и наблюдательной базы отдела. Укажем 4 основных раздела работы в указанном направлении.

1. Радиоинтерферометрический метод дает возможность изучать пространственные характеристики (пространственные масштабы, положение) различных космических объектов, а также их динамику. Причем применение классической радиоинтерферометрии в сочетании с РСДБ позволяет использовать этот метод для исследования объектов с угловыми размерами от нескольких угловых минут до тысячных долей угловой секунды. При этом радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой открывает новые возможности для исследования неоднородностей межпланетной среды и солнечной короны, недоступные другим применявшимся методам.

НИРФИ имеет комплексы приемно-региструющей (MARK-2) аппаратуры РСДБ в Усурийске, Евпатории (РТ-70), Медвежьих Озерах (РТ-64), РАС “Старая Пустынь” (РТ-14) и “Зименки” (РТ-15),

тесно сотрудничает с АКЦ ФИАН, ОКБ МЭИ, JPL (NASA, США), РИ НАНУ (Украина) (Б.Н. Липатов, А.Ф. Дементьев, Н.А. Князев, А.А. Антипенко).

В 1998 году была запущена в действие первая очередь среднебазового (база 70 км) радиоинтерферометра НИРФИ “Ст.Пустынь – Зименки” на длину волны 92 см. Интерферометр предназначен для исследования пространственно-временной структуры солнечных микровспышек, неоднородностей корональной и межпланетной плазмы и пространственной структуры космических радиоисточников. В настоящее время проводятся работы по дооснащению интерферометра приемо-преобразующей аппаратурой на длины волн 50 и 18 см. Данный инструмент является составной частью международной РСДБ-сети (LFVN – Low Frequency VLB Network), организованной в период с 1997 по 2000 г. при поддержке INTAS (проект 96-0183) силами НИРФИ, АКЦ ФИАН, РИ НАНУ, ОКБ МЭИ, РНИИ КП и ВМРЦ (Вентспилс, Латвия). В кооперацию входят приемные пункты РСДБ в Медвежьих Озерах, Уссурийске, Пущине (РТ-22), Старой Пустыни и Зименках (Россия), Евпатория (Украина), Вентспилсе (РТ-32, Латвия), Noto (РТ-32, Италия), Урумчи (РТ-25, Китай), Торунь (РТ-15, Польша), GMRT (Индия) с центром обработки РСДБ-информации в НИРФИ. С 1997 по 2001 гг. было проведено 13 тестовых и научных РСДБ-сессий в диапазонах длин волн 92,18 и 6 см (В.А. Алексеев, Б.Н. Липатов, А.Ф. Дементьев).

2. В последние годы в НИРФИ начата программа исследования околоземного пространства новым в мировой практике методом РСДБ-локации, сочетающим радиозондирование с Земли космических тел Солнечной системы и РСДБ-наблюдения отраженных эхосигналов (В.А. Алексеев, Б.Н. Липатов, А.Ф. Дементьев, В.Э. Резникова). Комбинация “классической” радиолокации и РСДБ позволяет получить совершенно новый инструмент – радиолокатор для трехмерных измерений при изучении планет земной группы, астероидов, сближающихся с Землей, и “космического мусора” (выработавших ресурс КА, последних ступеней ракет и т.п.).

Радиолокатор обладает разрешением по дальности и радиальной скорости, а РСДБ – по углу и скорости его изменения. Эти работы направлены как на решение задач фундаментальной астрометрии, так и для прикладных целей, о которых будет сказано ниже.

3. Исследования излучения Солнца в широком диапазоне длин волн, в том числе явлений микроволнового спорадического радиоизлучения, предназначены для изучения процессов вспышечного энерговыделения, формирования корональных выбросов массы (КВМ) и последующего восстановления структуры центров активности. Как указано выше, такие исследования базируются на текущих данных Службы Солнца РАС НИРФИ «Зименки» и ее архивах. РАС НИРФИ «Зименки» уже 35 лет проводит мониторинг солнечной активности, доведя число частот наблюдений до шести, охватывающих сантиметровой, дециметровой и метровой диапазоны. При этом РАС НИРФИ «Зименки», оставаясь Головной организацией Службы Солнца в радиодиапазоне в стране, направляет свои данные в МЦД и публикует их в каталогах SGD и «Солнечные данные», соблюдая такие актуальные и важные параметры, как международные стандарты по чувствительности и однородности рядов наблюдений. В последние годы проводится определенная работа по автоматизации сбора данных наблюдений и повышению временного разрешения (до 0,1с на длине волны 3см) (Т.С.Подстригач, В.Ф. Мельников).

В исследованиях используются и каталоги данных других станций в микроволновом диапазоне, а также в рентгеновском, ультрафиолетовом и гамма-излучении. Для изучения КВМ привлекаются данные каталогов коронографа SMM (1980, 1984–1989гг.) и текущие данные коронографа LASCO.

4. В последние годы микроволновая спектрография, опираясь на развитые модельные представления о петельных солнечных структурах и процессах первичного энерговыделения, позволила подтвердить и установить основные реализуемые механизмы радиоизлучения в хромосфере и нижней короне Солнца, а также

развивать диагностику физических параметров солнечной плазмы. Ранее в отделе была создана серия спектрографов последовательного анализа в диапазоне 1–18 ГГц с флукуационным порогом чувствительности 0,5 К и электронной перестройкой по частоте, которая предназначена для работы на радиотелескопах с высоким пространственным разрешением. В то же время это позволяло проводить только эпизодические алертные наблюдения Солнца. Кроме того, в большинстве проводившихся исследований регистрировалась только компонента интенсивности радиоизлучения, не позволяющая анализировать спектр поляризации излучения изучаемых процессов. В настоящее время проводятся работы по созданию спектрографа диапазона 8–12 ГГц с электронной перестройкой по частоте, осуществляющего анализ 2-х параметров Стокса, и предназначенного для регулярных наблюдений спорадических явлений на Солнце на базе РТ-4,5 РАС НИРФИ “Зименки”. Работа основана на опыте исследований Солнца спектрографическими методами с использованием РТ-22 КРАО (НИРФИ-КРАО) и швейцарских спектрографов (Берн, Цюрих - НИРФИ).

Наиболее наглядно сформулировать основные результаты научных работ, ведущихся в отделе, можно, разбив их по объектам исследований.

1. Солнце.

1. Большое значение в разрешении проблем вспышечного энерговыделения и теории короткоживущих радиовсплесков имеют наблюдения на инструментах с высоким угловым разрешением. Такие наблюдения в принципе позволяют:

- проследить за развитием процесса вспышечной фрагментации в пространстве,
- определить размеры и яркостные температуры источников «элементарных» всплесков,
- определить, как соотносятся в пространстве и во времени вспышка в целом и ее отдельные микрофрагменты и существует ли между ними детерминированная связь.

Одним из наиболее перспективных для диагностики параметров вспышечной плазмы носителей информации является микроволновое излучение. Особенно это относится к короткоживущим ($< 1\text{с}$) всплескам радиоизлучения с узкополосным спектром (спайки, блипы, миллисекундные пульсации и др.) с ожидаемыми пространственными масштабами области их генерации $\sim 0,1-0,01$ угл. с. Их экстремальные характеристики являются отражением физических условий во вспышечной плазме и, в частности, фрагментации в пространстве и во времени как самого процесса энерговыделения, так и области распространения/захвата ускоренных частиц.

В этом направлении получены следующие основные результаты (С.Д. Снегирев, В.А. Алексеев, В.Ф. Мельников, А.С.Сизов, Ю.В. Тихомиров):

– на основе анализа РСДБ-данных наблюдений радиоизлучения Солнца 23 февраля 1995 года (длина волны 18 см, база: Медвежье Озера – Пущино) выделено 2 спайкоподобных события длительностью 2 с (с превышением уровня шума в 3–5 раз), оценены видимые угловые размеры вероятных источников всплесков величиной не более 0,5 угл.с и соответствующие яркостные температуры $< 10^9\text{К}$;

– впервые проведено разделение источников в многокомпонентном всплеске, расстояние между источниками может составлять до 8 угл.с. Это находит подтверждение в моделях вспышек, представляющих совокупность “элементарных” энерговыделений;

– показано, что вариации положения центра яркости в ходе индивидуальных интенсивных пиков многокомпонентного всплеска могут достигать также 8 угл.с. С другой стороны, в течение некоторых пиков положение центра яркости радиоисточника не изменяется в пределах погрешности позиционных измерений. В интервале между некоторыми пиками положение фазового центра также остается неизменным;

– установлено, что для ряда спайков на значительной части их временного профиля динамика роста и спада интенсивности

подчиняется простой закономерности, заключающейся в том, что логарифмическая производная от интенсивности (наблюдаемый инкремент) непрерывно уменьшается по линейному закону. Показано, что в рамках когерентного механизма генерации спайков такое поведение может быть объяснено квазилинейной релаксацией распределения энергичных электронов с конусом потерь.

2. Развитие модельных представлений о процессах в структурах солнечной атмосферы в сочетании с совершенствованием радиоастрономической техники и применением новых методов наблюдений дали возможность рассматривать Солнце как естественную лабораторию по изучению различных плазменных и магнитогидродинамических явлений, развивать методы диагностики физических параметров, в первую очередь вспышечных образований. Это направление достаточно давно развивалось в отделе, а за последние годы получен ряд важных результатов (В.М.Фридман, О.А.Шейнер, В.Ф. Мельников совместно с сотрудником отд.№8 Б.Н.Левиным):

- обнаружена (по наблюдениям в диапазоне 8–12 ГГц) узкополосная компонента радиоизлучения на импульсной стадии всплесков и их предвестников, свидетельствующая о наличии плазменного механизма излучения во вспышечных петлях на Солнце;

- разработаны методики определения по параметрам узкополосного излучения с использованием развитых модельных представлений о существовании области плазменной турбулентности, прижатой во вспышечной петле к распространяющемуся тепловому фронту первичного энерговыделения, таких параметров, как поперечный размер области энерговыделения и масштабы неоднородности фоновой плазмы вдоль и поперек вспышечной петли. Возможно также оценить плотность потока высыпающихся частиц наиболее вероятных энергий, величину магнитного поля в источнике и ширину углового спектра плазменных волн, связанных с развитием во вспышечной петле конусной неустойчивости;

- оценены, на основании обработки данных в более широком спектральном интервале (8–12 и 14–17 ГГц) и разработанных методик,

минимальные высотные пределы существования такой области плазменной турбулентности, составившие 1000–3000 км над уровнем фотосферы;

– обнаружены субсекундные временные вариации степени круговой поляризации микроволновых всплесков, зарегистрированных на частоте 7 ГГц с высокой чувствительностью (0,5 сеп) и временным разрешением (60 мс). Показано, что наряду с плавной компонентой степени поляризации, уровень которой (20–30%) устанавливается в самом начале всплеска, существует импульсная компонента с секундными и субсекундными вариациями степени круговой поляризации заметно меньшей амплитуды (2–5%). Субсекундные вариации хорошо коррелируют с субсекундными изменениями плотности потока (НИРФИ совместно с Пекинской обсерваторией Китая).

3. Исследованы соотношение и временная эволюция спектральных индексов жесткого рентгеновского и микроволнового излучений импульсных солнечных вспышек. Обнаружено, что на спаде интенсивности всплесков в подавляющем большинстве событий спектральные индексы эволюционируют в противофазе: микроволновый спектр уплощается, а рентгеновский, наоборот, становится более крутым. Эта закономерность накладывает принципиальные ограничения на модели ускорения и динамики электронов в области субрелятивистских и среднерелятивистских энергий (НИРФИ совместно с РАС Бернского университета) (В.Ф.Мельников).

4. По существующим представлениям явления корональных выбросов массы (КВМ) являются фундаментальным явлением солнечной активности. Это обусловлено их ролью в глобальных магнитогидродинамических процессах на Солнце и высокой, но не выясненной до конца, геоэффективностью. Явления, предшествующие формированию КВМ и на предвспышечной стадии, возможно эффективно изучать с использованием данных радиоастрономических наблюдений в широком диапазоне длин волн.

Это обусловлено также тем, что регистрация КВМ на коронографах происходит на больших высотах, чем те, на которых по современным представлениям формируются КВМ. Остаются также недостаточно изученными вопросы соотношения явлений КВМ и солнечных вспышек, поскольку и тем и другим могут сопутствовать сходные явления спорадического радиоизлучения.

За последнее время в этом направлении получены следующие основные результаты (М.С. Дурасова, В.М. Фридман, О.А. Шейнер):

– выявлены по данным РАС НИРФИ «Зименки» на 6-и длинах волн сантиметрового, дециметрового и метрового диапазонов основные наиболее часто встречающиеся признаки спорадического нестационарного радиоизлучения на 2-х часовом интервале, предшествующем регистрации КВМ на временном периоде наблюдений на SMM (1980, 1984-1989гг.). К ним относятся шумовые бури в метровом диапазоне длин волн и их вариации вплоть до затухания, широкополосные импульсные всплески типа С и S, всплески типа GRF – медленный подъем и спад;

– проверена устойчивость выявленных признаков по наблюдениям в XXIII цикле солнечной активности и получено на близкой по объему выборке подтверждение, что частота подобных явлений различного типа в радиодиапазоне на стадии формирования КВМ близка к ранее выявленной при анализе данных за XXI и XXII циклы;

– сравнение данных нестационарного радиоизлучения во временные интервалы, связанные с формированием КВМ и в отсутствие регистрации КВМ (с близкими общими объемами временных выборок), показало, что частота событий спорадического радиоизлучения в 4 раза выше для интервалов времени, связанных с существованием КВМ, чем во вспышечные периоды без КВМ; для событий КВМ наличие шумовых бурь в 2,5 раза выше, чем для вспышечных событий без КВМ;

– полученные закономерности использованы для разработки методик прогнозирования КВМ по радиоданным и вынесены в раздел Прикладные исследования (п.3).

II. Межпланетная среда.

1. Исследования влияния неоднородностей плазмы солнечного ветра на спектр интерференции между просвечивающими среду сигналами космических радиисточников, проведенные на основе анализа экспериментальных РСДБ-данных, полученных в 1994–1997гг. для широкой области углов элонгации источников относительно Солнца (3–150 градусов), позволили сделать вывод о вероятном наличии среднемасштабной “волоконистой” структуры плазмы солнечного ветра в виде узких протяженных струй, направленных преимущественно вдоль солнечного ветра. Поперечный масштаб неоднородностей оценивается в 1,5–2 тыс. км, а продольный – более 300 тыс.км. В пределах отдельных “волокон” неоднородности примерно изотропны по направлению и имеют масштабы, не превышающие 1000 км (Б.Н. Липатов, С.Д. Снегирев, М.Б. Нечаева, Ю.В. Тихомиров).

2. По выборке для 13 одиночных возмущений, зарегистрированных вблизи орбиты Земли на КА OMNI, изучены и установлены наиболее вероятные источники на Солнце, вызвавшие данные возмущения. При анализе характера возмущений использована компьютерная программа, позволяющая проводить вычислительные эксперименты по эволюции возмущений в космической плазме на основе МГД-представлений (Н.А. Бархатов, М.С. Зырянова, В.М.Фридман, О.А.Шейнер).

III. Солнечно-земные связи.

1. При исследовании периодичности процессов в солнечных явлениях и ионосферных возмущениях установлено существование 2–4 летних периодов в данных солнечного радио- (наблюдения на РАС НИРФИ “Зименки”, станции Pentincton), рентгеновского излучений (наблюдения на КА GOES) и возмущений критической частоты ионосферы (по ионосферным данным станции “Зименки”), а также корреляция этих периодов для солнечного излучения и параметров ионосферы (М.С. Зырянова, В.М. Фридман, О.А. Шейнер совместно с сотрудниками отд. №8 Ф.И. Выборновым, Э.Е.Митяковой, А.В. Рахлиным).

2. Проведено сопоставление данных станции «Зименки» вертикального зондирования ионосферы с использованием разработанной методики получения суточных девиаций критической частоты f_0 слоя F2 с параметрами КВМ в периоды высокой и низкой солнечной активности. Установлено существование коррелированных с событиями КВМ типа LOOP длительных (2–3 суток) отрицательных «выбросов» значений девиации критической частоты f_0 с амплитудой до 3–5 МГц, причем такая реакция наблюдается уже через несколько часов после регистрации КВМ. Обнаружены также вариации критической частоты f_0 с амплитудой 2,5–3 МГц и периодом 5–10 дней, характерные для высокой солнечной активности (В.М. Фридман, О.А. Шейнер совместно с сотрудниками отд. №8 Н.Д. Крупеней, Э.Е. Митяковой и Рахлиным А.В.).

VI. Прикладные исследования.

1. В дополнение к ранее проведенным исследованиям по разработке метода краткосрочного прогноза мощных солнечных вспышек по динамике долгопериодных (более 20 минут) пульсаций солнечного микроволнового излучения проведена экзаменационная проверка метода (С.Д. Снегирев, В.М. Фридман, О.А. Шейнер) на материале регулярных наблюдений на разработанном в НИРФИ специализированном радиотелескопе РТ-2Ф за 1977–1984гг. в ГАС ГАО и получено: вероятность прогноза мощных солнечных вспышек составляет более 80 %, успешность прогноза – 90%, вероятность пропуска мощных вспышек – 10% при вероятности возможной ложной тревоги – 30%. Показаны высокий уровень значимости такого прогноза и его превышение над оправдываемостью применяемых тривиальных прогнозов.

2. Разработан метод диагностики параметров СКЛ по радиоданным, основанный на полученных статистических связях параметров потоков протонов в межпланетном пространстве с характеристиками вспышечного континуального микроволнового излучения, такими как максимальная интенсивность всплесков, их спектральный максимум и эффективная длительность. При этом для повышения точности

прогноза учитываются данные об электронной компоненте СКЛ, а комплексный анализ связи СКЛ и микроволновых всплесков включает физические представления о характере динамики ускоренных частиц во вспышечных петлях (В.Ф. Мельников, Т.С. Подстригач).

3. Проведен ряд подготовительных работ по созданию методики прогноза факта формирования КВМ по радиоданным и предложен вариант алгоритма прогноза, учитывающий совокупность установленных статистических закономерностей (раздел Солнце, п.4). Проводится работа по оптимизации этого алгоритма и установлению основных положений предлагаемого метода прогноза (В.М.Фридман, О.А.Шейнер).

4. Важными прикладными целями РСДБ-локации являются определение точных траекторий астероидов, потенциально опасных для Земли, и элементов «космического мусора», опасных для выполнения программ полетов космических аппаратов. Для реализации этих целей с использованием планетного радиолокатора на базе РТ-70 в Евпатории (длина волны 6 см, излучаемая мощность до 180 кВт) и кооперации, налаженной в рамках проекта LFN, было проведено три уникальных эксперимента: в июне 1999 г. – по Венере и Марсу, в августе 2000 г. – по астероидам Митра и 2000CE59, планетам Венера и Меркурий, в мае 2001 г. – по астероиду 1999KW4, планетам Венера и Меркурий и нескольким объектам “космического мусора” на окологеостационарной орбите (Б.Н. Липатов, А.Ф. Дементьев).

Заключение.

Из сказанного видно, что дальнейшие перспективы солнечных исследований связаны, в первую очередь, с углублением знаний о тонкой пространственной, временной, спектральной структурах вспышечных процессов и о динамике глобальных явлений корональных выбросов массы и связанных с ними процессов в атмосфере Солнца. И если первое направление может позволить построить пространственную картину и динамику процессов энерговыделения и ускорения энергичных частиц, то второе, наряду

с выяснением физического характера явлений, имеет большое значение при создании методов краткосрочного прогноза КВМ и диагностики их геоэффективных последствий. Важным элементом всех этих исследований остается Служба Солнца в радиодиапазоне, базирующаяся на РАС НИРФИ “Зименки” и осуществляющая патруль потоков солнечного радиоизлучения в диапазоне сантиметровых и дециметровых волн.

Солнечные исследования на современном этапе могут строиться только на широком использовании данных наземных и космических наблюдений. Ряд таких перспективных исследований уже ведется, что отражено в вышеприведенном тексте.

Являясь современным методом изучения тонких пространственных структур солнечной атмосферы, околосолнечной плазмы и их динамики, РСДБ-исследования предназначены и для более широкого круга актуальных проблем. Эти работы в своей основе направлены на создание методической, технической и программной баз для решения задач фундаментальной астрометрии: определения параметров векторов собственного вращения небесных тел, включая их короткопериодические (внутриорбитальные) вариации, а также определение методом дифференциальных координатных измерений точного положения центров масс небесных тел (траекторий их движения) в квазиинерциальной системе координат, опирающейся на внегалактические радиоисточники, имея конечной целью установление точной взаимной связи между радио- и динамической барицентрической системами координат.

Естественно, что рамки препринта позволили осветить только ряд результатов исследований, в основном, физического характера, оставив за ее пределами проведенные исследования по изучению волновых явлений на Солнце и околоземном пространстве, по “Космической погоде” – серии работ, направленных на выявление и определение геоэффективных параметров окружающего космического пространства и их прогноза.

Дистанционное зондирование природных сред и объектов

А.П. Наумов, А.В. Троицкий

Дистанционное зондирование (ДЗ) природной среды, как новое научное направление, возникло в 60-х годах на базе синтеза достижений распространения микроволн и радиоастрономии. В НИРФИ в силу существующих традиций развивалось пассивное микроволновое зондирование природной среды, основанное на приеме и физической интерпретации теплового излучения природных объектов (атмосферы, подстилающей поверхности, биологических сред). Проблемы распространения микроволн и ДЗ в целом соотносятся между собой как прямые и обратные задачи взаимодействия электромагнитного излучения с окружающей средой.

На первом этапе исследований сотрудниками института решались задачи по определению метеорологических параметров атмосферы из радиометрических наблюдений с поверхности Земли, с бортов самолетов и вертолетов, с научно-исследовательских судов в Атлантическом и Тихом океанах, а также по изучению динамических процессов (внутренних гравитационных волн, скорости и направления ветра в пограничном слое и т.п.). К этому времени относится и разработка совокупности методов измерения теплового излучения сильнопоглощающих сред, которые составили основу подповерхностной радиотермометрии, включающей определение температурного профиля биологических тканей и метод мониторинга температуры нагреваемых тканей при внутрисполостной гипертермии. Решение обратных задач радиометрии опиралось на результаты фундаментальных исследований молекулярного поглощения микроволн в атмосферных газах и ослабления их в природных средах.

В настоящее время исследования по ДЗ природной среды проводятся в следующих направлениях :

– продолжается изучение физических основ ДЗ в части совершенствования модели распространения микроволн, связанного с экспериментальными исследованиями диэлектрических свойств дисперсных сред в коротковолновой части миллиметрового диапазона, с развитием методов численных расчетов излучающих и поглощающих свойств частиц сложной формы и структуры с учетом их реальной конфигурации, осуществляется построение экспериментальной базы данных по параметрам линий вращательного спектра атмосферного водяного пара и т.п. ;

– разрабатывается принципиально новый поляризационный метод диагностики смешанных облаков атмосферы в микроволновом диапазоне ;

– исследуются процессы переноса атмосферной радиации в осваиваемом переходном (между ИК и СВЧ) диапазоне электромагнитного спектра с целью постановки и решения новых задач ДЗ в различных высотных областях, включая труднодоступные слои средней атмосферы ;

– осуществляется разработка концепции и создание средств микроволнового ДЗ содержания примесных газов антропогенного происхождения в нижних слоях атмосферы по их тепловому радиоизлучению.

Первые экспериментальные исследования по поляризационной диагностике облаков выполнялись на одной частоте (94 ГГц). Последующие измерения поляризационных контрастов и их физическая интерпретация проводились также на частотах 85 и 37 ГГц. На рис. 1 наряду с поляризационными контрастами $\Delta T(\nu)$ на указанных частотах ν показан и пример записи результатов определения капельной фракции W в облаках из радиометрических измерений на частоте 37 ГГц. Из рисунка видно, что поляризационный контраст имеет нерегулярный характер: наблюдается контраст обоих знаков – положительный и отрицательный. Во время измерений

отрицательные контрасты регистрировались примерно в 85%, а положительные, соответственно, примерно в 15% от общего числа случаев.

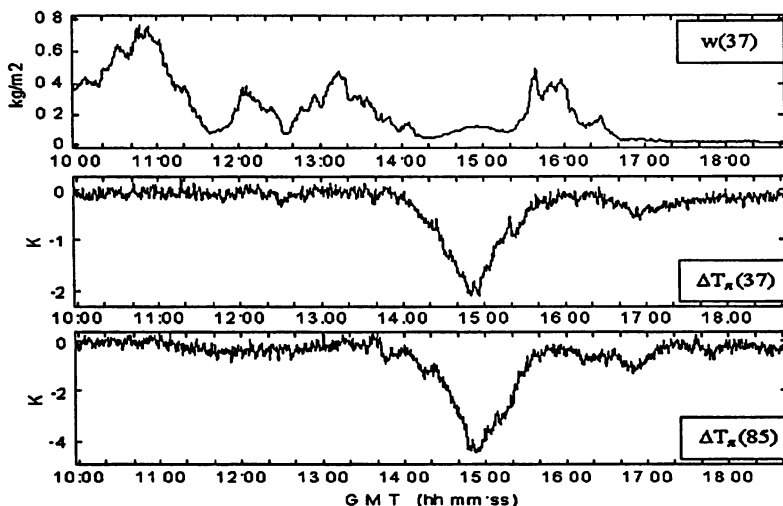


Рис. 1.

Теоретические исследования показали, что знак поляризационных контрастов зависит от формы ледяных облачных кристаллов. Поляризационный контраст для кристаллов пластинчатых, игольчатых и плоскоподобных нерегулярных форм, ориентированных в горизонтальной плоскости, имеет преимущественно отрицательный знак. Поляризационный контраст для ледяных сфер и сфероподобных (в смысле рассеяния) нерегулярных форм имеет преимущественно положительный знак. В текущем году проводились теоретические и экспериментальные исследования по определению предельных и средних величин поляризационных контрастов на различных частотах микроволнового диапазона, а также сравнительных значений контрастов на ряде частот.

Теоретические исследования показали, что величина поляризационного контраста теплового излучения облачной атмосферы зависит, в первую очередь, от интегральной ледности облаков (W_l), а интенсивность излучения – от их интегральной водности (W). Этот факт позволяет дистанционно диагностировать фазовый состав облака и отдельно определять W_l и W из совместного решения уравнений для поляризационного контраста и интегральной водности. Поскольку знак поляризационного контраста и спектральные соотношения величин поляризационных контрастов, например, на частотах 85 и 37 ГГц зависят от микроструктуры облака (формы кристаллов и их характерных размеров), многочастотные поляризационные измерения должны позволить также диагностировать микроструктуру облака, особенно наличие в нем крупных кристаллов и капель.

Результат по обнаружению поляризации микроволнового теплового радиоизлучения облачной (без дождя) атмосферы включен в число важнейших достижений РАН 2000 года.

Одна из четко прослеживаемых тенденций развития ДЗ состоит в использовании новых (осваиваемых) спектральных областей для постановки и решения задач мониторинга природной среды. С этой точки зрения естественным представляется проявление интереса к радиометрическим измерениям теплового излучения в субмиллиметровом (СБММ) диапазоне волн. Дело в том, что каждый участок спектра имеет свои характерные особенности, связанные с наличием и преобладанием спектральных линий определенных газовых компонент атмосферы, со спектральными и высотными зависимостями ее оптической толщины, с физическими процессами, определяющими формирование спектральных линий, с различной степенью влияния подстилающей поверхности на уходящее излучение системы «атмосфера – подстилающая поверхность» (А–ПП) и т.п. Как следствие, во вновь осваиваемых диапазонах волн появляются новые возможности индикации тех или иных газовых компонент, изменяются высоты ДЗ, расширяются условия оптимизации соответствующих исследований.

В текущем году проведены теоретические исследования поглощающих свойств атмосферы в области волновых чисел $1/\lambda \leq 200 \text{ см}^{-1}$ и характеристик уходящего теплового излучения системы А–ПП в длинноволновой и средней частях СБММ радиодиапазона ($1/\lambda \leq 50 \text{ см}^{-1}$). В результате этих исследований установлены спектральная и вертикальная структура теплового излучения атмосферы, определен состав дистанционно диагностируемых МГС и предпочтительные условия их ДЗ, включая лимбовый вариант. Сделан вывод, что, несмотря на возрастание частоты излучения, преобладающую роль в формировании спектральных линий во всей области $1/\lambda \leq 50 \text{ см}^{-1}$ имеют диабатические молекулярные соударения, хотя количество квантовых переходов в течение соударения уменьшается почти на 2 порядка по сравнению с той же характеристикой для средней части миллиметрового диапазона.

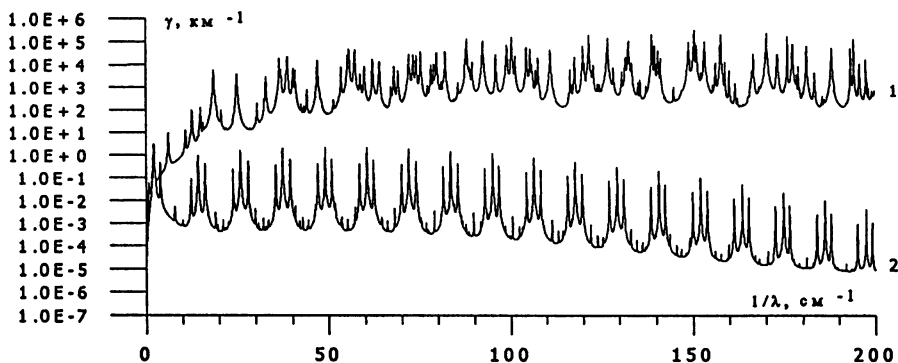


Рис. 2.

На рис. 2 представлены значения суммарного коэффициента поглощения при стандартных атмосферных условиях на уровне моря (кривая 1) и молекулярного кислорода (кривая 2) во всем рассматриваемом диапазоне волн. На рис. 3 изображена спектральная зависимость интенсивности уходящего излучения системы А–ПП в длинноволновой части СБММ диапазона ($1/\lambda = 10\text{--}20 \text{ см}^{-1}$). При

стандартных атмосферных условиях вклад поверхности в излучение системы А–ПП проявляется лишь в области $1/\lambda=10-12 \text{ см}^{-1}$. В остальной части рассматриваемого диапазона излучение поверхности экранируется значительным атмосферным поглощением. Сложное поведение спектральной зависимости интенсивности I_{ν}^{\uparrow} в резонансных областях основных атмосферных газов связано с тем, что формирование уходящего излучения в каждой линии происходит в достаточно широкой области высот, в которой изменения температуры атмосферы имеют немонотонный характер.

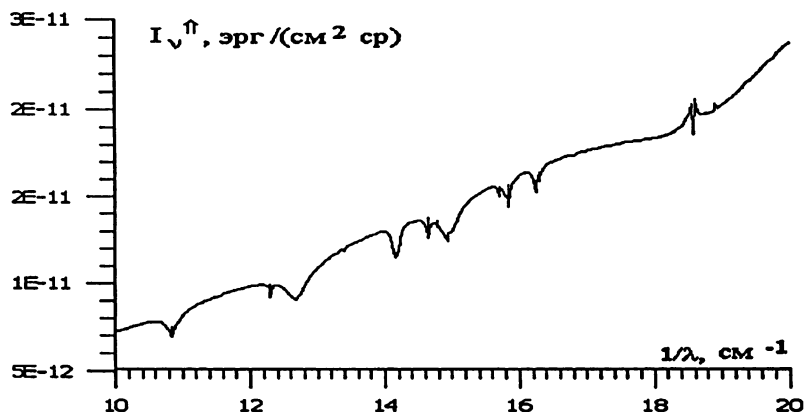


Рис. 3.

Возвращаясь к проблемам экологической физики, отметим, что в текущем году на основе анализа общих закономерностей переноса атмосферной радиации, состояния элементной базы и методических аспектов радиометрических измерений в микроволновом диапазоне сформулированы основные принципы инструментальной реализации системы пассивного микроволнового мониторинга загрязнения нижней атмосферы. На данном этапе представляется возможным создание 4-канальной системы для мониторинга сернистого ангидрида, двуокси азота, сероводорода и окиси углерода при содержаниях, сопоставимых с предельно допустимой концентрацией (ПДК). Соответствующие рекомендации могут быть дополнены

включением в систему еще одного канала для дистанционного определения высотного распределения температуры в приземном слое, которое существенно для описания характеристик диффузии атмосферных примесей. Возможности наземной радиометрии для решения задач экологии были проиллюстрированы натурными наблюдениями на частоте 131 ГГц загрязнения атмосферы сернистым ангидридом (Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1997. Т.40. № 6. С. 704-711).

Ограничение объема изложения результатов по обсуждаемым в препринте проблемам не позволяет сколько-нибудь подробно даже перечислить задачи, которые решаются в том или ином направлении. Поэтому в тексте мы ограничились только теми результатами, которые уже получили признание научной общественности и были поддержаны грантами Минобразования РФ, РФФИ и МНТП “Физика микроволн”, хотя число и этих результатов может быть увеличено без особого труда. Наконец, привлечение к написанию данной статьи только двух авторов тоже не дает полного представления о составе и высокой квалификации коллектива, успешно развивающего актуальное, интересное и сложное (поскольку требует комплексного подхода) научное направление по дистанционному зондированию природной среды.

Перечисленные выше результаты и задачи вместе с поляризационными измерениями радиоизлучения подстилающей поверхности, с космическими исследованиями земной атмосферы (программа “Метеор-3”, спутник № 1) определяют основные перспективы развития данной проблемы в институте. В этом смысле как полученные, так и планируемые результаты НИРФИ отвечают общим тенденциям в дистанционных исследованиях природной среды – увеличение числа метеорологических и экологических параметров, которые могут определяться дистанционными методами, включая радиофизические методы, возрастание высот дистанционного зондирования атмосферы, повышение качества (точности) соответствующих дистанционных исследований, целесообразность комплексирования активных и пассивных средств ДЗ в различных спектральных диапазонах и т.п.

Отдел сейсмофизики и акустики сегодня (от прошлого к настоящему)

В.В.Луцин

Новые условия жизни в стране и специфика финансирования науки заставили руководство отдела пересмотреть объем и направление проводимых исследований. В первую очередь, мы решили сконцентрировать свои усилия на тех научных направлениях, в которых все еще удерживаем ведущие позиции как в стране, так и мире. Вторым необходимым условием считаем обеспеченность планируемых исследований достаточным финансированием, желательно многоканальным. Как правило, такие работы находятся на острие практической важности и актуальности и требуют при своем завершении выдачи реальной продукции в виде устройств и приборов. Фундаментальная составляющая таких исследований необходима для сохранения научной базы и приоритетности в дальнейших работах. Исходя из этих условий, в отделе сформулировано пять основных направлений научных исследований.

1. Создание физических основ нетрадиционных методов сейсмоакустической разведки.
2. Физика ледяного покрова (изучение подвижных нагрузок, акустическая эмиссия, нелинейные свойства).
3. Акустика многофазных сред (нелинейные эффекты, нелинейная сейсморазведка, акустические технологии).
4. Оптические измерения и технологии (интегральная спектроскопия, контроль границ сред, построение высокоточных оптических измерительных систем).
5. Медико-биологические исследования.

Структура отдела по возможности приведена в соответствие с указанными направлениями исследований. Отдел состоит из

лабораторий геоакустики (В.В. Гуцин), нелинейной сейсмоакустики (Г.М.Шалашов), лаборатории “оптических измерений” (И.Е.Кожеватов). Научный потенциал представлен шестью кандидатами и двумя работающими по совместительству докторами наук. Для экспериментального и технологического сопровождения проводимых работ функционируют производственная мастерская (Ю.П. Шангин) и технологический участок (В.А. Жогликов). Общая численность 25 человек. Инженеры-электронщики объединены в сектор радиотехнических измерений (Н.А. Седунов), тесно работающий со всеми лабораториями. Экспедиционные работы поддерживаются имеющимися в отделе двумя специализированными автомашинами на базе ЗИЛ-131 и УАЗ.

Из сформулированных направлений научных исследований *направление “Оптических измерений и технологий”* обладает наиболее богатой историей. С первых лет существования отдела (1957–1967 гг.) заведующим отделом В.А. Зверевым были предложены оригинальные идеи создания некогерентных оптических вычислительных систем. За короткий срок фактически трудами всех служб института были созданы приборы, не имеющие мировых аналогов как по быстродействию, так и по объему обрабатываемой информации: одноканальные и многоканальные анализаторы спектра (Е.Ф. Орлов, С.Н. Рубцов, И.С. Раков), двумерный и одномерный коррелометры (С.М. Горский, В.В. Гуцин), анализаторы, работающие с ЛЧМ-базами (Э.М. Зуйкова, А.А. Шишарин, В.В. Гуцин), а также множество технических вариаций этих устройств применительно к решаемым оборонным задачам (А.А.Грачев, Г.А.Андреев, В.В.Семенов, Т.А. Крюкова, В.А. Кудрявцев).

Используя аппаратуру оптической обработки информации, отделом был выполнен ряд тем по постановлению директивных органов, по результатам которых в 1964г. был построен новый корпус НИРФИ.

С момента изобретения лазеров и созданных с их помощью голографических когерентных устройств обработки информации

преимущество некогерентных систем стало неочевидным. Свежую струю в создании нового поколения двумерных анализаторов спектра с различными базами внесли изобретения В.А. Жогликова и Б.В. Кияшко, предложивших генерировать базовые функции анализаторов путем интерференции обыкновенных и необыкновенных лучей в специальных кристаллах. Созданные при непосредственном участии А.А. Грачева анализаторы успешно работали в условиях ограниченного пространства и наличия сильных вибраций. Это поколение оптических машин просуществовало до середины 80-х годов, пока бурно развивающаяся на Западе вычислительная техника не превзошла их по своими показателям.

Другой ветвью оптического приборостроения можно назвать работы по интерферометрии, начатые также по инициативе В.А. Зверева еще в конце 50-х годов. Применение разработанных в отделе оптических анализаторов к анализу спектров солнечного излучения позволило создать новый класс спектральных приборов, существенно превышающих технические характеристики аналогичных устройств в стране и мире (С.М. Горский, В.П. Лебедев). Дальнейшее развитие методов привело к разработке устройств, осуществляющих интегральные представления спектра. В отличие от традиционной, классической спектроскопии интегральная спектроскопия позволяет представлять спектр наблюдаемого излучения набором интегральных параметров формы линий, адекватных физическим характеристикам источника (температура, скорость, давление и т.д.). Такое представление позволило создать, начиная с 80-х г. целый класс специальных приборов для дистанционных исследований солнечной плазмы (И.Е. Кожеватов, Н.П. Черагин, Е.Х. Куликова).

В настоящее время (1998–2001гг.) основное развитие получил второй класс задач оптической интерферометрии — интерферометрия объектов по известным спектральным характеристикам излучения.

На сегодняшний день достижения лаборатории Оптических измерений связаны в основном с работами по широкополосной

оптической интерферометрии высоких порядков. Интерференцию широкополосного излучения при больших разностях хода (или интерференцию высоких порядков) большинство исследователей, в том числе и специалистов по оптической интерферометрии, считают невозможной. В лаборатории получены и сформулированы условия возникновения такой интерференции. Целый ряд особенностей, свойственных интерференции широкополосного излучения, позволили разработать устройства с характеристиками недостижимыми с использованием традиционных методов. Главными из этих особенностей являются “селективность” к расстоянию до исследуемого образца и возможность получения высокой точности. Эти свойства интерферограмм широкополосного излучения дали возможность осуществлять детальное исследование многослойных объектов, а также проводить точные измерения геометрических и оптических характеристик удаленного объекта, в том числе *in situ*, т.е. непосредственно на месте его изготовления или работы. Точность измерений составляет единицы ангстрем на апертурах до 300 мм. Столь точные измерения прежде всего актуальны в фундаментальных исследованиях. Лаборатория в настоящее время участвует в наиболее наукоемких оптических экспериментах по солнечной астрофизике и гравитационной астрономии

– Проект “Тахомаг”. Основой проекта является магнитографический комплекс с одноименным названием, планируемый к установке на российском научном модуле МКС “Альфа”.

– Проект “Интергелиос”. Лаборатория отвечает за постановку магнитографических измерений при помощи Солнечного зонда, планируемого к полету на максимально близких к Солнцу расстояниях.

– Проект “LIGO”. Достижением последних лет явилось включение лаборатории в LIGO Collaboration, т.е. в группу по созданию лазерного детектора гравитационных волн, разрабатываемого в США.

В настоящее время нарастает спрос на точные измерения не только в фундаментальных научных исследованиях, но и в наукоемких отраслях промышленности. Одна из разработок лаборатории –

оптический датчик дистанционного контроля смещений валов реакторов – была выполнена по заказу ГУП ОКБМ им. И.И. Африкантова. Интенсивные разработки ведутся по развитию методов контроля поверхностей деталей, определяющих ресурс двигателей и их экологическую чистоту. Прежде всего, это касается внутренних поверхностей цилиндров двигателей для автомобильной промышленности.

Основная структурная составляющая *направления* “Акустика многофазных сред” – нелинейная сейсмология. Работы по этому направлению проводятся силами лабораторий геоакустики и нелинейной сейсмологии. Возникновению интереса к нелинейным сейсмическим задачам предшествовали работы отдела, выполняемые ранее (начиная с 1957 г.) под руководством В.А. Зверева. Прежде всего эти исследования по параметрическим приемникам и излучателям в жидкости (В.А. Зверев, А.И. Калачев), нелинейным акустическим антеннам (Ю.А. Абрамов, И.Д. Гиц), параметрическому приемнику в воздухе (В.В. Гуцин, Ф.В. Головин), приемникам с управляемой диаграммой направленности (В.В. Гуцин, Ю.М. Заславский), исследованиям по динамике нелинейных взаимодействий в твердых телах, подвергаемых разрушениям (В.В. Гуцин, Б.А. Конюхов, И.Д.Гиц), а также работы по управляемой нелинейности в пьезо и магнитных средах (Г.М. Шалашов).

Одной из первых работ, в которой был сформулирован ряд задач нелинейной сеймики, был доклад В.В. Гуцина и Г.М. Шалашова на Всесоюзной конференции “Традиционные и новые вопросы сейсмологии сейсмостойкого строительства” (Душанбе, 1980). В докладе были сделаны оценки нелинейных сейсмических эффектов, приведены данные по экспериментально обнаруженному эффекту генерации гармоник, дана оценка значений параметров нелинейной упругости горных пород, указано на их аномально высокое значение. В дальнейшем эти выводы были подтверждены в цикле работ по совместной программе ИФЗ АН СССР и НИРФИ .

Начиная с конца 80-х годов, исследования нелинейных явлений в Земле стали принимать практическую направленность. Был

разработан метод нелинейного межскважинного прозвучивания (НМП) (Г.М. Шалашов, В.А. Шемагин, Д.А. Касьянов), создан комплект аппаратуры реализующий НМП, проведены полевые испытания метода. Впервые в мире получены данные об аномально высоких значениях нелинейных упругих параметров геологической среды в реальном залегании до глубин 200 м. Впервые в прямом виде исследован эффект нелинейного взаимодействия волн на кубической нелинейности и измерен параметр кубической упругой нелинейности грунтов (Г.М. Шалашов). Предложен метод скважинного каротажа с использованием эффекта детектирования цилиндрической волны с фокусировкой, для всего доступного геологического разреза: метод нелинейного вертикального профилирования (НВП) (Г.М. Шалашов, Д.А. Касьянов).

С начала 90-х годов в лаборатории развиваются исследования по созданию нового типа скважинных акустических излучателей с возможностью фокусирования акустического поля. Создана дифракционная теория фокусирования расходящихся цилиндрических волн (Д.А. Касьянов), кроме этого, разработаны конкретные технические реализации фокусирующих антенн (Д.А. Касьянов, Г.М.Шалашов).

С разработкой фокусирующего типа скважинных антенн связаны достижения в области акустической интенсификации геотехнологических процессов. С помощью такого типа антенн в продуктивных коллекторах добычных скважин можно создавать уровни акустического поля, достаточные для интенсификации различных геотехнологических процессов. Полупромышленные испытания скважинных фокусирующих антенн показали их высокую эффективность, была достигнута значительная и продолжительная по времени интенсификация процесса подземного выщелачивания редких металлов. В настоящее время подготовлены технологии акустического воздействия сфокусированными полями на процессы газонефтедобычи и обосновано использование сфокусированного звука при подземном растворении солей (Д.А. Касьянов, Г.М.Шалашов).

Во второй половине 90-х годов сотрудниками лаборатории Нелинейной сейсмологии (Г.М. Шалашов, Д.И. Иудин, Д.А. Касьянов) выполнен цикл работ по фрактальной динамике геологических сред. Была предложена перколяционная модель сейсмической активности. Впервые осуществлена экспериментальная проверка выводов континуальной теории протекания для фильтрационных течений в дисперсных средах.

Кроме того, со второй половины 90-х годов по инициативе и научном руководстве профессора В.Ю. Трахтенгерца (ИПФ РАН) активно развивается направление, связанное с исследованием грозового электричества. Основные усилия направлены на изучение фрактальной динамики внутриоблачного пространственного электрического заряда на предварительной стадии грозового разряда, в процессе которой формируется, так называемая, дренажная система сбора заряда со всего объема облака, служащая основой для зарождения лидерного канала молнии. Сотрудниками лаборатории предложен метод расчета радиоизлучения от внутриоблачных микрозарядов, позволяющий проводить непосредственное сопоставление теоретической модели с экспериментальными данными (Д.И. Иудин). Указанные работы выполняются при финансовой поддержке 2-х грантов РФФИ.

Совершенно *новая область сейсмофизики* возникла в последние годы главным образом в связи с бурным развитием когерентных низкочастотных (< 20 Гц) и высокочастотных (> 500 Гц) излучателей и их применением в фундаментальных и прикладных исследованиях (сейсмический мониторинг, апертурный синтез, акустическая томография и т.д.). Эффективность решения указанных задач прежде всего зависит от предельно достижимых величин ширины спектральной линии сейсмических излучателей. В свою очередь форма спектральной линии сложным образом зависит от таких малоизученных характеристик грунта, как гранулированность, наличие микронеоднородностей, изменение акустических характеристик со временем, нелинейность, реологические свойства

и т. д. Интересно отметить, что аналогичный подход к свойствам среды возник и у механиков, в связи с технологическими применениями композитов и полимерных материалов.

Исследуя влияние гранулированности и нелинейности среды, механиками теоретически было предсказано существование нового типа волн, так называемых ротационных или волн микровращений. Это вызвало большой интерес и у сейсмологов, еще в 70-х годах указывающих на необходимость учитывать при распространении упругих волн блочное строение земли. Для объединения усилий сейсмологов и механиков в рамках программы “Интеграция” была создана совместная с НФИМАН РАН, НГТУ и НИРФИ лаборатория Нелинейной реологии конденсированных сред. Для адекватного описания среды потребовалось получение новых экспериментальных данных и наблюдений. В НИРФИ силами лаборатории геоакустики были начаты исследования поведения верхнего слоя грунта в условиях сейсмобассейна.

Было показано, что источник сейсмического сигнала при работе меняет плотность грунта и в зависимости от его типа возможно как уплотнение, так и “разжижение”. Как следствие этого, экспериментально наблюдаются гистерезисные явления при изменении амплитуды колебаний источника, смещение резонансной частоты, относительное изменение амплитуды волн различных типов, излучаемых источником. Экспериментально наблюдались нелинейные явления генерации субгармоник в реальном грунте. Показано, что эффект носит резонансный характер и возбуждение субгармоник того или иного порядка зависит от степени уплотнения грунта. При выполнении работы создан оригинальный способ фильтрации нелинейных составляющих, основанный на методах амплитудного и фазового синтеза сигналов (В.В. Гуцин, В.А. Кудрявцев, С.Н. Рубцов). Работы планируется продолжить в рамках Федеральной программы в 2002 – 2006 годах.

Направление исследований “Создание физических основ нетрадиционных методов сейсмоакустической разведки” берет

начало с 1965 года, когда в инициативном порядке были проведены работы на полигонах заказчика по апробации идеи обнаружения объектов техники по создаваемым ими упругим полям. Первые эксперименты дали обнадеживающие результаты (В.В. Гушин, А.А.Грачев, Ю.А. Абрамов). В дальнейшем отдел успешно выполнял в течение более 20 лет цикл работ в интересах 5 министерств. По результатам работ издано 3 сборника НИРФИ.

Проводимые исследования дали толчок к зарождению целого ряда интересных нетрадиционных для классической сейсмофизики направлений. Прежде всего это малоглубинная сейсморазведка (Г.М.Шалашов, Ю.М.Заславский, Ф.В.Головин), акустика приповерхностных атмосферных волноводов (А.В. Разин), поляризованная приповерхностная сейсмика и высокочастотные малобазовые динамические сейсмические антенны (В.А. Кудрявцев), инфразвуковая акустика машин и механизмов (Е.Я. Бубнов, В.В.Чернов). Были рассмотрены такие не рассматриваемые ранее в сейсмологии механизмы излучения, как Черенковское, тормозное, переходное (С.П. Вдовиченко, В.В. Гушин, А.В. Разин). Построена удобная для практического использования теория поверхностных излучателей (В.П. Докучаев, Ю.М. Заславский), детально изучены ближние поля сейсмовибраторов (Ю.В. Петухов, А.В. Соколов).

Однако в начале 90-х годов было практически прекращено финансирование прикладных исследований. В результате ставшая традиционной для отдела тематика была резко сокращена. В настоящее время усилия отдела (лаборатория геоакустики) сконцентрированы на решении важнейшей для мирового сообщества проблеме “Обнаружения и распознавания противопехотных мин”. Десятки стран мира в рамках гуманитарной программы ООН пытаются решить эту проблему. Тем не менее до сих пор она далека от завершения. Сотрудниками лаборатории получены обнадеживающие результаты по выявлению информативных признаков мины при озвучивании места ее расположения сейсмическими и акустическими волнами (Е.Я. Бубнов).

Согласно проводимой ОКР, отдел должен изготовить в 2002 году акустический блок-обнаружитель для размещения его на подвижной машине-роботе. Запланированы работы по дальнейшему поиску информативных параметров и комплексированию полей различной физической природы для повышения надежности и помехоустойчивости обнаружителей.

Направление “Физика ледяного покрова” фактически зародилось в отделе в начале 80-х годов, когда проводились исследования полей объектов техники при движении по льду (В.В.Гущин, С.П. Вдовиченко, Т.А. Крюкова). В совершенно новой для отдела области за короткий срок были получены фундаментальные результаты по теории генерации упругих волн находящимися на поверхности льда вибраторами по анализу волновой структуры движущихся источников (С.П.Вдовиченко, В.В.Гущин, Ю.М.Заславский), созданы необходимые для экспериментальных исследований специальные низкочастотные источники дебалансного и электродинамического типов (Г.М. Шалашов).

В последние годы интерес к исследованию полей подвижных нагрузок был подогрев возникшими идеями создания нетрадиционных методов разрушения льда. В рамках программы “Интеграция” (1997–2001гг.), совместно с кафедрой судостроения НГТУ, закончен цикл исследований, позволивший предсказать неизвестные ранее режимы работы ледокола на воздушной подушке, при которых разрушение льда происходит наиболее эффективно. По полученным результатам подготовлена к изданию совместная монография “Физические основы взаимодействия подвижной нагрузки с подстилающей поверхностью” (В.В. Гущин, С.П.Вдовиченко, В.А. Зуев (НГТУ)). В монографию включены и последние теоретические исследования сложного и аномального эффектов Доплера, а также сложного абберационного эффекта при движении переменной нагрузки по сжатому льду (С.П. Вдовиченко, В.В. Гущин, В.В. Тамойкин).

Совместное использование ледового бассейна НГТУ позволило провести на нем первые эксперименты по изучению акустической эмиссии льда в процессе его разрушения статическими нагрузками в присутствии вибрационного источника. (В.А. Кудрявцев, С.Н. Рубцов, В.В. Чернов). Предварительно полученные результаты позволяют рассчитывать на перспективу создания вибрационных методов упрочнения льда, а также модели инициирования возникновения трещин (землетрясений) ударными источниками.

Работы по *медицинской тематике* всегда занимали определенную нишу в планах отдела. С момента зарождения отдела В.А. Зверевым поддерживался тесный контакт с Горьковскими кардиологами. Главным образом рассматривались вопросы применимости разрабатываемых оптических анализаторов спектра в задачах диагностики сердечных заболеваний (И.К. Спиридонова). Затем отдел значительно расширил сферу взаимодействия с врачами. С.М.Горский и В.В.Чернов получили сенсационные результаты по возможности ранней диагностики рака по сонолюминисценции плазмы крови. Ими же были начаты интересные исследования по использованию кепстрального анализа в диагностике ларингологических заболеваний. Перспективным оказалось и привнесение в практику врачей педиатров идей многомерного регрессионного анализа, опыт успешного применения различных модификаций которого в практике авиационного завода был изложен в книге “Функциональная взаимозаменяемость основных систем изделий” (В.В. Гушин и др.).

В последние годы сотрудники отдела вновь обратились к сотрудничеству с кардиологами, решив проверить возникшие идеи о связи нелинейных упругих свойств ткани с различного вида сердечными заболеваниями. Методы биспектрального анализа, разрабатывавшиеся ранее, в рамках программы “Конверсия ” были применены для ранней диагностики ишемической болезни сердца. Созданный с этой целью анализатор акустического кардиобиспектра прошел апробацию на базе областного медицинского

диагностического центра и специализированной кардио-хирургической клинической больницы г. Н.Новгорода (В.А.Шемагин).

В 2001 году в рамках научно-технической программы “Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники” в отделе начались работы по созданию биотехнической системы биоадекватной терапии и реабилитации больных при травмах конечностей. В работе принимают участие специалисты Нижегородского научно-исследовательского института травматологии и ортопедии и кафедры “Медицинская инженерия” Нижегородского государственного технического университета (НГТУ). В результате выполненных исследований выявлена связь реабилитационных медицинских технологий при травмах верхних конечностей с акустическими сигналами от восстанавливаемых мышц, получены характерные спектры акустических сигналов от здоровых и поврежденных тканей и разработан макет для механотерапии верхней конечности (О.И.Кушников, В.А. Шемагин).

Снижение продолжительности жизни и ухудшение здоровья граждан медики связывают с неблагоприятной экологической обстановкой. Еще в середине 70-х годов отделом начинались совместно с институтом профзаболеваний исследования по влиянию инфразвука на состояние человека (В.В. Гуцин). В настоящее время в продолжение этих работ планируется осуществлять мониторинг акустического загрязнения города в рамках ряда внутригородских и региональных экологических программ. Несколько лет назад в интересах города отделом была выполнена работа по прогнозу экологических последствий монтажа озонаторной установки на водозаборной станции “Слуда” (В.А.Шемагин, Е.Я. Бубнов). С этой целью был создан имитатор звука озонаторной установки и выполнены натурные испытания. А в течение 1999–2001 гг. для оценки экологического ущерба при ликвидации последствий аварийных разливов нефти совместно с ГУП НПП “Полет” по заказу комитета по охране окружающей среды Ханты-Мансийского автономного округа в отделе создан переносной контактный толщиномер для

измерения глубины разлива нефти на водной и земной поверхностях. (В.А. Шемагин, Д.А. Касьянов). Прибор отмечен золотой медалью на международной выставке в Брюсселе. Планируется продолжить работы в части создания различных модификаций прибора.

Одной из проблем отдела является старение коллектива. Средний возраст сотрудников 46 лет. Выход из такой ситуации (помимо поиска источников финансирования) лежит в более тесной работе со студенческим коллективом.

В рамках программы “Интеграция” сотрудники отдела стали активно участвовать в учебном процессе. На кафедрах НГТУ читаются оригинальные курсы лекций “Методология анализа контактного взаимодействия пар трения” (В.А.Шемагин), “Применение фрактальных методов в физике” (Д.А.Иудин), “Ударно-волновые явления при соударении твердых тел” (Ю.В. Петухов).

На территории отдела проводятся практические занятия со студентами кафедры “Медицинская инженерия”, читаются специализированные курсы лекций “Медицинские приборы, аппараты, и комплексы”, а также “Электронная и микропроцессорная техника” (В.А. Шемагин).

Проводятся лабораторные работы. Студенты привлекаются к выполнению исследований по трем проводимым в отделе грантам РФФИ, участвуют в экспедиционных полевых работах и работе научных семинаров.

Для усиления фундаментальной составляющей исследований и укрепления материальной базы принимаются усилия по получению международных грантов и заключению зарубежных контрактов. Идя таким путем, мы надеемся, что в ближайшее время сумеем в полном объеме проводить исследования по намеченным научным направлениям.

Залогом нашей веры и оптимизма являемся преданность сотрудников науке и их НИРФИнский патриотизм.

Исследования вопросов распространения километровых и более длинных волн.

С.В.Поляков, Д.С.Котик

Исследования в диапазоне длинных радиоволн были начаты в НИРФИ с наступлением спутниковой эры, еще в шестидесятых годах. Так, на первых советских научных спутниках Электрон-2 и Электрон-4 в 1964г. были установлены созданные в НИРФИ, приемники радиоизлучения в диапазоне 0,7 – 1,5 МГц¹. В этих экспериментах впервые было обнаружено интенсивное спорадическое излучение магнитосферы впоследствии получившем наименование Авроральное Километровое Излучение (АКР), а также тесная корреляция интенсивности АКР с величиной потока электронов с энергиями выше 100 эВ. Интенсивность излучения на 2–3 порядка превышала интенсивность космического фона. Практически впервые было обнаружено проявление неустойчивости сильнонеравновесной плазмы в магнитосфере Земли.

Обнаружение АКР дало толчок к интенсивным исследованиям явления в семидесятых годах на спутниках ISIS1, IMP6, IVP8, Voyager1,2 и др. Эти исследования показали, что область генерации АКР находится на расстоянии 2–3 радиусов Земли и тесно связана с ярким явлением в энергетическом спектре электронов, получившим название “перевернутое V”, а интенсивность АКР максимальна на частотах 200–300 кГц.

Следующим интересным экспериментом уже в диапазоне сверхдлинных волн была локация магнитосферы на частоте 15 кГц в

¹ Бенедиктов Е.А., Гетманцев Г.Г., Митяков Н.А., Рапопорт В.О., Сазонов Ю.А., Тарасов А.Ф. Результаты измерения интенсивности радиоизлучения на частотах 725 и 1525 кГц на спутнике Электрон -2. – В кн. Исследования космического пространства. – М. 1965, с. 581-605.

1970г². В качестве зондирующего излучения использовался СДВ передатчик вблизи г. Горького. Отличие данного эксперимента от подобных, проводимых на западных СДВ-передатчиках, состояло в проведении измерений магнитосферного эхо-сигнала не в магнитосопряженной передатчику точке, а непосредственно вблизи него. Эксперимент показал, что при зондировании магнитосферы импульсами длительностью 0,4–0,8 с ширина спектра эхо-сигнала была порядка 50 Гц. Амплитуда и ширина спектра эхо-сигнала существенно зависела от длительности зондирующего сигнала, а время задержки по отношению к зондирующему сигналу составляло примерно 1,4с, что соответствовало отражению от магнитосопряженной ионосферы. Эти эксперименты позволили прояснить ряд теоретических моделей взаимодействия радиоволн и частиц в магнитосфере Земли.

Новый многолетний этап в низкочастотных исследованиях был связан с развитием в НИРФИ с начала 70-х годов нового направления под руководством Г.Г. Гетманцева – “Нелинейные явления при воздействии на ионосферу мощным коротковолновым радиоизлучением”. В рамках данной тематики были предприняты целенаправленные попытки обнаружить низкочастотное радиоизлучение в диапазоне нескольких килогерц, генерируемое в ионосфере в результате взаимодействия плазмы с мощным модулированным КВ-излучением. Первые же эксперименты дали результаты³, существенно превосходящие предварительные теоретические оценки, основанные на стрикционном механизме. Экспериментальные данные убедительно свидетельствовали о том, что генерация низкочастотных радиоволн происходит на высотах

² Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю., Череповицкий В.А. Свойства искусственного ОНЧ – сигнала после двукратного прохождения магнитосферы. – Изв. ВУЗов – Радиофизика, 1975, т. 19, с 1904.

³ Гетманцев Г.Г., Зуйков Н.А., Котик Д.С., Мироненко Л.Ф., Митяков Н.А., Рапопорт В.О., Сазонов Ю. А., Трахтенгерц В.Ю., Эйдем В.Я. Обнаружение комбинационных частот при взаимодействии мощного коротковолнового излучения с ионосферной плазмой. – Письма в ЖЭТФ, т. 20, №4, 1974, с. 229.

нижней ионосферы и имеет четко выраженный суточный ход с максимумом в полуденные часы. Опираясь на эксперимент, была предложена модель генерации на основе тепловой нелинейности и модуляции квазистационарных ионосферных токов⁴. Непосредственное доказательство ионосферно-токовой природы эффекта было получено группой исследователей из ПГИ при постановке аналогичных экспериментов в высоких широтах⁵. Позднее (в 1980г.) группа ученых из НИРФИ и ПГИ получила дипломы на открытие №231, а сам эффект получил название – “эффект Гетманцева” (Открытия в СССР, ВНИИПИ, М. 1981, с.25).

В течение двух десятилетий “эффект Гетманцева” интенсивно и всесторонне исследовался как на мощном стенде НИРФИ “Сура”, так и во всех мировых центрах, обладающих мощными коротковолновыми нагревными средствами (Аресибо – Пуэрто-Рико, Тромсё – Норвегия, Фербенс – Аляска).

В наших исследованиях отчетливо прослеживается тенденция продвижения к низким частотам. На частотах ниже 10 Гц существенно (на несколько порядков) повышается уровень естественных помех, что потребовало разработки новой сверхчувствительной приемной техники – датчиков электромагнитного поля и новых методов обработки сигнала. Такая техника была создана в НИРФИ в 80–х начале 90-х годов. Это позволило детально исследовать совместно с группой исследователей из ИФЗ “эффект Гетманцева” в диапазоне микропульсаций⁶.

Развитие активного эксперимента по генерации низкочастотного радиоизлучения стимулировало также исследования естественных

⁴ Котик Д.С., Трахтенгерц В.Ю., О механизме возбуждения комбинационных частот в ионосферной плазме. – Письма в ЖЭТФ, т. 21, №2, 1975, с. 114.

⁵ Капустин И.Н., Перцовский Р.А., Васильев А., Н., и др. Генерация излучения на комбинационных частотах в области авроральной электроструи. – Письма в ЖЭТФ, т. 25, №5, 1977, с.7.

⁶ Беляев П.П., Котик В.С., Поляков С.В., Рапопорт В. О., Гульельми А.В., и др. Возбуждение геомагнитных пульсаций при периодическом нагреве ионосферы мощным КВ-радиоизлучением. – Геомагнетизм и Аэрономия, Т. 25, № 1, с. 102.

электромагнитных явлений в УНЧ диапазоне. Так была создана и развита теория магнитосферного альвеновского мазера с включением ионосферы как селективного и нелинейного элемента, определяющего частоты излучений в зависимости от потоков высыпающихся протонов, позволившая построить модель генерации короткопериодных геомагнитных пульсаций и объяснить их основные свойства (импульсные режимы, свипирование частоты и т.д.)⁷.

С помощью нового поколения сверхчувствительных датчиков и, опираясь на теоретические модели ионосферного альвеновского резонатора⁸, были проведены целенаправленные исследования спектральных характеристик атмосферных шумов на частотах ниже 10 Гц. Эти исследования выявили неизвестную ранее резонансную структуру спектра (РСС)⁹ в диапазоне 0,1–10 Гц обусловленную свойствами ионосферного альвеновского резонатора. Детально исследованы характеристики РСС, имеющие четко выраженные дневные, сезонные и солнечно цикловые зависимости¹⁰.

В последние годы начаты экспериментальные исследования с помощью уникальной УНЧ установки на Кольском полуострове, разработанной в Российском институте мощного радиостроения, состоящей из усилителя мощности и излучателя длиной в 108 км¹¹,

⁷ Поляков С.В., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю. Альвеновский свип-мазер. – Физика плазмы, т 9, №2, 1983, с. 371.

⁸ Belyaev P.P., Polyakov S.V., Rapoport V.O., Trakhtengertz V.Yu. – The ionospheric Alfvén resonator. J. Atm. Terr. Phys. V.32, N. 9, 1990, p. 781.

⁹ Беляев П.П., Поляков С.В., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю., Обнаружение тонкой структуры спектра атмосферного электромагнитного шумового фона в диапазоне короткопериодных геомагнитных пульсаций. – ДАН СССР, т. 297, №4, с. 840.

¹⁰ Беляев П.П., Поляков С.В., Ермакова Е.Н., Исаев С.В. Экспериментальные исследования ионосферного альвеновского резонатора по наблюдениям электромагнитного фона в солнечном цикле 1985–1995гг. Изв. Вузов. Радиофизика, т. 40, № 10, 1997, с. 13105.

¹¹ Belyaev P.P., Sobchakov L.A., Vasil'ev A.V., Polyakov S.V., Yakunin M.N., Isaev S.V., Litvak A.G., Smirnov A.I., Astakhova N.L. First Geophysical ULF (0.1-10Hz) Ground-Based Facility. XXII General assembly, IUGG, Birmingham, UK, July 18-30, 1999 Book of abstracts

позволяющей генерировать электромагнитные поля в диапазоне от 0,1 до 15 Гц, обнаруживаемые на удалении в 1500 км.¹²

В настоящее время планируется развитие исследований на базе данной установки с привлечением нагревных стендов “Сура” и “Тромсё” под общей идеологией – “УНЧ-радар”, как для трехмерной томографии верхней атмосферы, так и глубинного строения земной коры, включая шельф. Предполагается использовать разработанные в НИРФИ датчики, размещаемые в Нижегородской области и в Карелии, а также магнитометрическую сеть в Финляндии.

В заключение отметим выдающуюся роль Г.Г.Гетманцева, определившего на многие годы направления низкочастотных исследований в НИРФИ. С начала 70-х годов эти исследования в НИРФИ проводились в отделе Физики низкочастотных процессов под руководством В.О.Рапопорта с группой его учеников П.П.Беляева, Д.С.Котика, Л.Ф.Мироненко, С.В.Полякова и др. В настоящее время низкочастотные электромагнитные исследования проводятся, в основном, отделом №6 Низкочастотная электродинамика атмосферы и методы электромагнитного зондирования.

Нелинейная радиолокация в НИРФИ (о прошлом и настоящем)

Горбачев А.А.

В 1972 году НИРФИ было предложено начать исследования эффекта нелинейного рассеивания радиоволн телами, содержащими дискретные нелинейные включения (контакты металлоконструкций, полупроводники). В связи с отсутствием научного задела и необходимой технической базы, институт отказался от этого предложения, допустив, на мой взгляд, недооценку этого направления работ. Более настойчиво предложение было повторено в 1979 году.

¹² Belyaev P.P., Sobchakov L.A., Vasil'ev A.V., Plyakov S.V., Isaev S.V., Astakhova N.L. First Measurements of artificial ULF signals at the long distance 1500 km. The 5th European heating seminar, Sodunkyla, Finland, Book of abstracts, 1997.

Возможно, этому способствовало появление в середине 70-х годов в зарубежной печати публикаций с обсуждением некоторых возможностей применения указанного эффекта. Речь идет об использовании в качестве информационного сигнала, в частности, гармоник, образующихся в нелинейном рассеивателе при облучении его монохроматическим зондирующим сигналом. В начале 1980 г. работы были начаты, а проведение их поручено отделу № 6, которым я тогда руководил.

Первые эксперименты показали, что этот эффект может быть использован для широкого круга прикладных задач, решение которых традиционными методами радиолокации невозможно или неэффективно. Среди них: уже известное обнаружение малоразмерных объектов на фоне отражений от подстилающей поверхности; дистанционная техническая диагностика и неразрушающий контроль систем на основе анализа рассеиваемых ими нелинейных продуктов, содержащих информацию о внутренней динамике систем; классификация нелинейных объектов; маркировка объектов и материальных ценностей; обозначение маршрутов следования с помощью простейших нелинейных рассеивателей (НР) (вибратор, рамка) для их последующего дистанционного обнаружения при отсутствии возможности их визуального наблюдения. Эти же исследования показали, что энергетика указанного рассеяния весьма слабая, а к исследовательской аппаратуре должны быть предъявлены очень жесткие технические требования по чувствительности, линейности измерительных трактов, чистоте зондирующих сигналов.

Работы привлекли внимание заинтересованных ведомств и руководства АН СССР, результаты исследований которому неоднократно докладывались. Коллектив исполнителей получил поддержку академиков А.П. Александрова, В.А. Котельникова, А.В. Гапонова, Е.П. Велихова, Ю.Б. Кобзарева. Вскоре вышел ряд решений Директивных органов по направлениям работ, открыто необходимое финансирование. К работам в институте были привлечены теоретический отдел, антенная лаборатория и другие

технические лаборатории и службы. При этом к исследованиям подключились некоторые кафедры Горьковского политехнического института, а затем и промышленные предприятия. Не удалось избежать ряда сложностей, связанных со стремлением руководства нашего министерства непосредственно руководить и контролировать нашу работу.

Успешное решение прикладных задач потребовало проведения исследований фундаментального характера.

В процессе этих исследований, продолжающихся по настоящее время, были:

- исследованы амплитудные, пространственные, поляризионные, частотные фазовые характеристики нелинейного рассеяния широкого класса нелинейных рассеивателей (рукотворные объекты, россыпи металлосодержащих руд);
- разработаны модели рассеивателей и их систем, методики их исследования, соответствующая техническая и исследовательская база;
- исследованы явления нелинейной дифракции на телах, содержащих нелинейности различной природы при наличии границ раздела сред;
- сформулированы основные требования к пространственно-временной структуре зондирующих сигналов для разных задач
- предложена классификация рассеивателей, в рамках которой рассмотрены некоторые алгоритмы распознавания;
- предложены устойчивые методы обработки сигналов, учитывающие особенности нелинейной радиолокации (возросший уровень априорной неопределенности).

Изложение конкретных положений вышло бы за рамки настоящей статьи, поэтому остановлюсь на некоторых примерах.

1. Было установлено, что при зондировании нелинейных рассеивателей, находящихся вблизи границы раздела двух сред, в среде с большим ϵ из среды с меньшим ϵ может наблюдаться

возрастание уровня рассеяного сигнала по мере удаления (в определенных пределах) рассеивателя от границы раздела. Таким образом, маскировка грунтом нелинейных рассеивателей может привести к увеличению его радиояркости.

2. Принимаемый рассеивателем сигнал может возрастать по мере увеличения расстояния между рассеивателем и зондирующей установкой.
3. Характер помех при приеме сигналов определяется помеховой ситуацией не только в месте его приема, но и в месте расположения рассеивателя.
4. Находящиеся вблизи человека обесточенные радиоэлектронные бытовые устройства могут служить датчиками его биологической активности, позволяющими при наличии преград дистанционно измерять некоторые его физиологические параметры.
5. Наличие в рассеивателе меняющихся в зависимости от уровня зондирующего сигнала емкостей и индуктивностей может создавать условия для параметрического резонанса и появления в рассеянном сигнале не только высших гармоник, но и субгармоник монохроматического зондирующего сигнала, что имеет значение при решении задач распознавания рассеивателей и ЭМС.
6. Амплитудные характеристики некоторых нелинейных рассеивателей могут иметь разрывы, что открывает возможности использовать такие рассеиватели в метрологических целях.

Эти результаты были получены, в основном, в период 80–90гг. и являются плодом труда большого коллектива, к которому я испытываю теплые чувства благодарности. Не имея возможности перечислить всех, ограничусь авторами опубликованных работ, это: Д.Ш. Агрба, Н.Ю. Бабанов, О.С. Бычков, Л.В. Васенкова, А.А.Васенков, П.А. Горбачев, В.И. Данилов, В.И.Есипенко, Т.М.Заборонкова, А.П. Колданов, В.А. Кочетков, В.Д.Красильников,

С.В. Ларцов, Я.Г. Родионов, А.М. Сизьмин, С.П. Тараканков, А.М.Шабалин.

В течение указанного десятилетия была создана серия макетов радиолокаторов различного назначения. Полученные результаты показали перспективность исследования. Была разработана комплексная научно-техническая программа из 30 НИР, направленная на дальнейшее развитие этих исследований с привлечением ряда научных и промышленных организаций. Однако известные события в России не позволили ее реализовать. Но, тем не менее, те результаты, которые были уже получены, заслужили высокую оценку, а четыре сотрудника НИРФИ стали лауреатами премии СМ СССР по одному из направлений.

Перечисленные выше результаты использованы при написании и защите одной докторской (Т.М. Заборонкова) и четырех кандидатских (Н.Ю.Бабанов, П.А.Горбачев, С.В.Ларцов, С.П.Тараканков) диссертаций и подготовке двух докторских (А.П.Колданов, С.В.Ларцов) и одной кандидатской (А.А. Васенков) диссертаций.

Последние годы коллектив работает, в основном, по грантам РФФИ. За последние 6 лет опубликовано и направлено в печать в центральные и зарубежные издания, а также представлено на различных конференциях и симпозиумах 75 работ (всего же опубликовано более 200 работ). Судя по публикациям, НИРФИ в этом направлении исследований, по крайней мере в России, занимает ведущее положение. В настоящее время промышленность как отечественная, так и зарубежная выпускает ряд нелинейных радиолокаторов ближнего действия для обнаружения закладок, подслушивающих устройств, мин с электронными взрывателями. Однако фугасы продолжают взрываться. Существующая поисковая аппаратура нуждается в совершенствовании, в частности в увеличении радиуса действия, обеспечении распознавания нелинейных рассеивателей, снижающем вероятность ложных тревог, определения их координат. Замечу, что 20–30 лет не такой уж большой срок для становления нового направления развития техники.

В настоящее время на первый план выходят следующие задачи:

- синтез пассивных нелинейных рассеивателей – маркеров с увеличенным объемом информации в их отклике на зондирующий сигнал-запрос;
- синтез пассивных нелинейных рассеивателей – датчиков для дистанционного контроля изменений локальных параметров окружающей их среды;
- дальнейшее исследование механизмов появления субгармоник в рассеянном сигнале и особенностей их рассеяния;
- проведение натуральных экспериментов по поиску потерпевших аварию летательных аппаратов и людей, терпящих бедствие на воде;
- дальнейшее исследование устойчивых методов обработки сигналов нелинейной радиолокации и алгоритмов распознавания объектов.

С целью дальнейшего развития работ в последнее время установлены рабочие контакты НИРФИ с рядом предприятий города (НИИС, КБ “Электромаш”) и некоторыми кафедрами ННГУ (кафедры электродинамики и прикладной теории вероятностей) и НГТУ (кафедра общей и прикладной физики).

Прикладные исследования в отделе микроволновой диагностики поверхностных контрастов

С.А.Пелюшенко

Создание в 1999 г. отдела № 7 “Микроволновая диагностика поверхностных контрастов” организационно оформило сложившееся направление исследований, проводящихся в НИРФИ в области прикладной радиофизики. Основы направления были заложены в 80–90гг. сотрудниками отдела Кротиковым В.Д., Пелюшенко С.А. на базе работ, проведенных при выполнении НИР и ОКР по созданию пассивных систем радиовидения миллиметрового диапазона в интересах оборонных отраслей промышленности. Решалась задача изучения условий формирования поляризационных радиоярких контрастов при дистанционном зондировании объектов на фоне подстилающей поверхности. В настоящее время накопленный научно-технический потенциал в данной области исследований реализуется в целом ряде проектов. С 1993 г. сотрудники отдела И.В. Ракуть, И.Н.Мордвинкин, С.А. Пелюшенко, В.Д. Кротиков участвуют в проекте “След” по разработке радиометрического комплекса в составе технических средств региональной системы экологического патрулирования и мониторинга – САНЭПМ по заказу Ханты-Мансийского автономного округа. В рамках проекта разработан всепогодный переносной автоматизированный радиометрический датчик дистанционного измерения толщины пленки нефти в разливе на поверхности воды – КТС РМК-Н. Прибор передан в промышленное освоение и прошел государственную сертификацию.

Со середины 80-х годов получил развитие предложенный ранее С.А. Пелюшенко метод активно-пассивной радиометрии для решения прикладных задач антенных измерений, медицинской диагностики и интроскопии протяженных неоднородных сред.

Результаты исследований структуры неоднородных сред по их характеристикам рассеяния в сферически сходящихся пучках позволили решать задачу пространственной локализации неоднородностей с разрешением, сопоставимым с рабочей длиной волны. На базе метода активно-пассивной радиометрии созданы радиометрические комплексы, позволяющие решать задачи медицинской диагностики, обнаружения оружия под одеждой на теле человека и подповерхностной локации.

В отделе продолжают традиционные для НИРФИ фундаментальные научные исследования зависимости параметров радиоизлучения планет земной группы от характеристик их физических покровов и разрабатываются вопросы, связанные с использованием Луны в качестве эталонного источника поляризованного радиоизлучения при проведении антенных измерений.

Потенциальные возможности отдела в направлении развития прикладных исследований во многом определяются наличием макетной мастерской и конструкторской группы, руководимых зав.сектором Ю.А. Железняковым, наличием современных средств вычислительной техники и парка измерительной аппаратуры.

**Отдел сегодня - основные научные направления,
достижения и перспективы развития**

Н.А.Митяков, Ю.В.Токарев

Основой экспериментальной базы научных исследований в отделе № 8 является стенд “Сура”, созданный основателем отдела Г.Г.Гетманцевым и успешно функционирующий два десятилетия. Стенд расположен в 145 км восточнее Н.Новгорода. Основу стенда составляют три радиопередатчика ПКВ-250 и трехсекционная многодипольная приемо-передающая антенна площадью 300х300 кв.м, формирующая вертикальный (или наклоненный на угол от 0 до 45 градусов от вертикали) пучок радиоволн с эффективной мощностью $P_G = 150-250$ МВт в диапазоне частот 4,5–9,0 МГц. По своим данным стенд “Сура” сравним с аналогичными стендами в Аресибо (Пуэрто-Рико), в Тромсё (“EISCAT”, Норвегия) и на Аляске (“NAARP”, США). Стенд “Сура” является единственным в средних широтах и входит в число уникальных научных инструментов России. Только на стенде “Сура” передающая антенная система может выполнять также функции приемной антенны, причем для этой цели может быть использована как вся антенна, так и любая из трех ее секций. Это обстоятельство делает стенд “Сура” многофункциональным инструментом. Кроме проблемы исследования модификации ионосферы мощными радиоволнами, для решения которой в первую очередь и был создан этот стенд, с его помощью успешно проводятся радиоастрономические исследования и радиолокационные исследования атмосферы, ионосферы, магнитосферы, Луны и солнечного ветра на рекордно низких частотах.

Исследования модификации ионосферы мощными радиоволнами

Исследования в этом направлении были начаты почти 30 лет назад Г.Г.Гетманцевым на стенде “Ястреб” в Зименках. Именно в тот

период было открыто новое явление – низкочастотное излучение ионосферы, возникающее под воздействием на нее модулированного коротковолнового радиоизлучения. Было обнаружено явление рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях, возникающих в поле мощной стоячей волны. Обнаружена искусственная ионосферная турбулентность (ИИТ), возникающая в результате стрикционной и тепловой параметрической неустойчивостей и исследовано влияние ИИТ на распространение радиоволн. С 1981г. аналогичные исследования продолжаются учениками Г.Г.Гетманцева с использованием многоцелевого стенда “Сура”.

Приведем некоторые результаты исследований:

– Обнаружена искусственная плазменная линза, возникающая за счет рекомбинационной нелинейности в E-слое ионосферы (НИРФИ, ИЗМИРАН).

– Определены оптимальные режимы работы стенда, необходимые для возбуждения крупномасштабных неоднородностей и волновых движений в F-слое ионосферы: неоднородностей, ответственных за искусственный F-spread, неоднородностей типа ионосферной полости, искусственных внутренних гравитационных волн (НИРФИ).

– Достоверно установлено, что при воздействии на ионосферу мощными КВ-радиоволнами генерируется электромагнитное излучение СВЧ-диапазона (измерения проводились на частотах $f \approx 600$ МГц с использованием 15-метрового радиотелескопа в Зименках). При флуктуационном пороге чувствительности приемной аппаратуры 0,15 К величина зарегистрированного сигнала составляла 0,3–0,5 К, а максимальная величина сигнала достигала 1,1К (НИРФИ).

– Выполнены детальные измерения характеристик искусственного радиоизлучения ионосферы в КВ-диапазоне (ИРИ) во всем диапазоне частот стенда “Сура” от 4,3 МГц до 9,3 МГц. Обнаружен эффект подавления нелинейного взаимодействия, когда частота ВН совпадает с гармоникой гирочастоты электронов. Полоса подавления ИРИ и аномального ослабления составляет несколько килогерц, что

позволяет измерять геомагнитное поле Земли с точностью до долей процента. Выявлена периодическая (по номеру гармоники) зависимость структуры стационарных спектров ИРИ от разницы частоты мощной волны и гармоники электронной циклотронной частоты, которая определяется дисперсионными свойствами и характером нелинейного взаимодействия верхнегибридных и бернштейновских волн (НИРФИ, Институт аэронауки им. Макса Планка, Германия, Институт космической физики, Швеция).

– Определены спектры размеров и пространственные характеристики искусственной ионосферной турбулентности в возмущенной области. Измерения проводились методом наземного приема сигналов ИСЗ и с использованием радиотелескопа УТР-2 (НИРФИ, КазГУ, ИРА УкрАН).

Радиолокационные исследования

– На стенде создана установка и проводятся исследования динамики нейтральной и заряженной компонент верхней атмосферы методом рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях ионосферы. Опубликована монография В.В.Беликович, Е.А. Бенедиктов, А.В. Толмачева, Н.В. Бахметьева “Исследование ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей”, ИПФ РАН, Нижний Новгород, 1999. Это первая в мире монография, где систематизированы результаты исследований искусственных периодических неоднородностей и диагностики с их помощью мезосферы и нижней термосферы. Приоритет разработанного в НИРФИ метода исследований признан на международном уровне.

– Создан мезосферный локатор и проводятся регулярные исследования мезосферы доплеровским методом проведены измерения вертикальной составляющей скорости в среднеширотной мезосфере. Показано, что в условиях существования развитых мезосферных слоев распределение вертикальной скорости, как правило, носит неоднородный характер. Обычно в нижней части

области мезопаузы скорость направлена вверх, а в ее верхней части – вниз; характерная величина градиента скорости составляет 0,2–0,4 м/с/км. Наличие квазипериодических вариаций вертикальной скорости с увеличивающейся с высотой амплитудой и периодами более 10 минут интерпретируется как проявление внутренних гравитационных волн.

На стенде проводились *радиолокационные исследования магнитосферы Земли и осуществляется радиолокация Луны*. В рамках международной программы регулярно проводятся исследования солнечного ветра и ударной волны на границе магнитосферы. Для этой цели используется метод радиопросвечивания: радиоизлучение стенда “Сура” регистрируется на удаленном спутнике “WIND”. В ряде сеансов трансионосферное зондирование спутника “WIND” осуществлялось в режиме интерферометра “Сура” – “Тромсё” или “Сура” – “HAARP” по совместной программе.

Перечислим некоторые результаты таких исследований.

– Проведены успешные сеансы по приему сигналов стенда СУРА на борту КА Cassini во время пролета этого аппарата мимо Земли 18–27 августа 2000г. на его пути к планете Сатурн; выполнена калибровка трех частотных каналов бортового приемника RPWS в диапазоне 9 МГц (НИРФИ, GSFC NASA).

– Организовано координированное излучение двух европейских радиопередатчиков стендов СУРА и EISCAT (Тромсе, Норвегия) в диапазоне 5.5 МГц с приемом радиоволн на КА WIND, в результате чего впервые реализован активный КВ-радиоинтерферометр со сверхдлинной базой ~ 2000 км; обнаружен специфический интерферометрический признак – квазисинусоидальные вариации интенсивности с периодом порядка секунды при синхронной работе обоих стендов в различных геофизических условиях (февраль–май 1999 г.). (НИРФИ, GSFC NASA, Норвегия)

В октябре–ноябре 2000 г. были проведены экспериментальные исследования среднеширотного *F-spread* с помощью радиопросвечивания ионосферы КВ-сигналами стенда СУРА с

приемом его излучения на двух фиксированных частотах 4525 и 9075 кГц на борту космического аппарата NASA WIND, находящегося на расстояниях $R \approx (150-170)R_z$ (R_z - радиус Земли). Сравнительный анализ результатов космических экспериментов по проекту в 1999 и 2000 гг. и сопоставление их с результатами траекторных расчетов свидетельствуют в пользу того, что аномальное распространение коротких радиоволн при радиопросвечивании среднеширотной ионосферы есть следствие существования в ионосфере в условиях развитого *F-spread* крупномасштабных неоднородностей электронной концентрации с характерными размерами в десятки километров в форме областей с пониженным электронным содержанием, вытянутых вдоль направления магнитного поля Земли, и перемежающихся областями с обычным плоскостойким распределением электронной концентрации (НИРФИ, GSFC NASA).

Радиоастрономические исследования

На стенде “Сура” успешно проводятся исследования нетеплового космического радиоизлучения в малоизученном участке электромагнитного спектра вблизи низкочастотной границы прозрачности земной ионосферы. Разработаны оригинальные методы помехозащищенного приема и учета влияния ионосферы на характеристики наблюдаемого космического радиоизлучения. Впервые для северной небесной полусферы в длинноволновой части декаметрового диапазона радиоволн построены радиоизофоты Галактики и измерены спектры четырех наиболее мощных дискретных радиоисточников; исследованы частотные и угловые вариации спектра низкочастотного распределенного радиоизлучения, получены новые данные о локальной межзвездной среде.

Большинство исследований на стенде “Сура” проводятся учеными НИРФИ в содружестве с коллегами российских и зарубежных научных организаций: МарГТУ (Йошкар-Ола), КГУ (Казань), ИЗМИР АН (Москва), СибИСЗФ СО РАН (Иркутск), ИКИР ДВО РАН (Хабаровск), Филлиппс-лаборатория, Военно-морская лаборатория, Корнельский

и Клемонский Университеты, NASA (США), Институт космической физики (Швеция), Институт аэронавтики им. М.Планка и Институт физики атмосферы при Ростокском университете (Германия).

В ближайшее время планируется создать на стенде “Сура” установку радиоакустического зондирования атмосферы (РАЗ) на основе существующего мезосферного локатора. Для этого необходимо построить акустическую систему, излучающую звук на частоте 20 Гц. Система РАЗ с антеннами локатора большой мощности и низкой частотой акустического излучателя позволит регистрировать температурные профили и изучать динамику атмосферных процессов до высот 10–15 км. В перспективе будет продолжено строительство приемо-передающей антенны в диапазоне частот 10–20 МГц (мощные передатчики ПКВ-250 работают в диапазоне 4,5–10 МГц). Расширение диапазона стенда “Сура” позволит существенно расширить круг радиоастрономических и локационных задач, решаемых на стенде. Это позволит, в частности, разработать долговременную программу совместных исследований с украинскими учеными, работающими на радиотелескопе “УТР-2” и осуществить радиолокацию Солнца.

Кроме стенда “Сура” в отделе имеются еще две уникальные экспериментальные установки: *ионозонд с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ) сигнала* для исследования ионосферы и ионосферного распространения радиоволн и *бистатический акустический локатор (содар)* для исследования тропосферы.

С помощью ЛЧМ-ионозонда, созданного в начале 80-х годов совместно с МАРПИ, продолжается традиционная для отдела программа классических методов исследования ионосферы, ионосферного распространения радиоволн и оперативного прогнозирования каналов радиосвязи. Ионозонд НИРФИ работает в составе российской сети ЛЧМ-ионозондов, включающей как европейскую – Йошкар-Ола (МАРПИ), Мурманск (ПГИ), в перспективе Харьков (РАИ УкрРАН), Ростов-на-Дону (РГУ), Шпицберген (НПО Полет), так и азиатскую часть России – Иркутск (СибИЗМИР СО РАН), Хабаровск, Магадан и Камчатку. Для научных

исследований и для учебных целей используются ЛЧМ-сигналы непрерывно работающих зарубежных ЛЧМ-ионозондов. Апробированные в НИРФИ методы диагностики ионосферы с использованием ЛЧМ зонда отличаются высокой помехозащищенностью и высокой разрешающей способностью. Сочетание уникальных функциональных возможностей стенда “Сура” и российской сети ЛЧМ-ионозондов позволяет рассматривать комплекс как современную базу для моделирования широкого класса геоионосферных явлений, для исследования источников и эволюции глобальных атмосферных возмущений на основе изучения особенностей распространения КВ-радиоволн в среднеширотной и субавроральной ионосфере, для выявления глобальных факторов, оказывающих влияние на эффективность возбуждения регулярных и флукуационных ионосферных волноводов в районах высокой геомагнитной активности. В последнее время на основе фундаментальных исследований все большее значение приобретают практически важные задачи широкополосной связи и задачи оперативного прогнозирования каналов связи с самолетами.

В качестве примера приведем два результата работы с ЛЧМ-ионозондами.

–Проведены экспериментальные исследования особенностей распространения КВ-сигналов при одновременном ЛЧМ-зондировании ионосферы на среднеширотной трассе Хабаровск – Н.Новгород и субполярной трассе Магадан – Н.Новгород, различным образом ориентированных относительно ионосферного провала. Установлено, что в магнитоспокойные дни с $Kp < 2$ в дневные часы 7–14 мск коэффициент пространственной корреляции МНЧ составляет величину порядка 0,75–0,95. С ростом возмущенности $Kp < 3$ коэффициент корреляции уменьшается до значений порядка 0,8–0,65 (НИРФИ, ИКФ ДВЦ РАН).

– Проведены измерения характеристик КВ-сигналов во время солнечного затмения 11 августа 1999г. Установлено, что на трассе ЛЧМ-зондирования Йошкар-Ола – Н.Новгород в период затмения с

фазой покрытия 0,6 происходило уменьшение МНЧ на 10–15%. На трассах Лондон – Н.Новгород, Прага – Н.Новгород с фазой покрытия 0,7–0,85 имело место уменьшение амплитуды на 6–8 дБ и увеличение в 1,5–2,5 раза скорости замираний сигнала (НИРФИ. МАРПИ).

Система акустического зондирования атмосферы (содар) создана в 1998 г. на полигоне Зименки на основе двух полноповоротных 15-метровых радиотелескопов РТ-15 с базой 425 м. В фокальной плоскости первого радиотелескопа установлены четыре рупорных акустических излучателя с общей электрической мощностью 400 Вт на фиксированных частотах в диапазоне 600–800 Гц. Излучатели могли работать на разных частотах, формируя четырехлучевую диаграмму направленности, или синфазно на одной частоте, формируя карандашную диаграмму. В фокальной плоскости другого радиотелескопа установлены четыре микрофона, формирующие диаграмму с четырьмя лучами. Телескопы поворачиваются таким образом, чтобы лучи приемной и передающей антенн перекрещивались на заданной высоте. Такая система позволяет проводить пространственно-временные исследования атмосферы в области высот 400–800 м. В результате спектральной обработки определяются параметры атмосферной турбулентности одновременно на двух масштабах – порядка длины волны (0,5 м) и порядка размеров луча содара в месте встречи лучей (18 м).

Было установлено, в частности, что только в половине сеансов параметры атмосферной турбулентности на двух масштабах соответствуют теории Колмогоровской турбулентности. В перспективе планируется продолжить исследования атмосферной турбулентности и разработать программу фрактального анализа экспериментальных данных. Планируется проводить мониторинг электрического поля Земли и атмосферных токов с целью изучения грозных явлений и регистрации атмосферных аэрозолей. Планируется создать систему радиоакустического зондирования атмосферы на основе мезосферного радиолокатора стенда “Сура”.

В заключение сформулируем наиболее перспективные научные направления отдела.

Распространение радиоволн:

– исследование дальнего распространения КВ на базе современных средств широкополосного ЛЧМ-зондирования ионосферы,

– распространение радиоволн в ионосфере, возмущенной мощным КВ-радиоизлучением, нелинейные явления в ионосфере.

Физика ионосферы:

– нелинейные явления в ионосфере,

– диагностики параметров ионосферной плазмы с использованием ЛЧМ-ионозондов, нелинейных эффектов, в том числе с помощью искусственных периодических неоднородностей.

Физика атмосферы:

– радиолокационные исследования динамических процессов в мезосфере с помощью мезосферного локатора и в верхней атмосфере методом рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях,

– исследование динамических и электрических процессов в тропосфере с использованием систем акустического и радиоакустического зондирования атмосферы.

Солнечно-земные связи:

– диагностика геовозмущенной области солнечного ветра и околоземной плазмы методом декаметрового радиопросвечивания,

– разработка методов радарных исследований солнечной короны и раннего обнаружения геоэффективных солнечных событий.

Длинноволновая радиоастрономия:

– развитие методов наземных наблюдений космического радиоизлучения на предельно низких частотах,

– исследование радиоструктуры Галактики и дискретных радиоисточников северного небосвода в малоизученной длинноволновой части декаметрового диапазона волн.