

Отдел космической радиофизики Радиоастрономического института Национальной академии наук Украины

А. А. Минаков

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: minakov@ira.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 20 сентября 2005 г.

Представлены краткая история Отдела космической радиофизики РИ НАНУ, научные направления исследований, проводимые в рамках государственных и международных программ, основные результаты и достижения, полученные сотрудниками отдела за годы его существования.

Краткая историческая справка

История и научная тематика радиофизического теоретического отдела долгие годы была неразрывно связана с именем Заслуженного деятеля науки и техники Украины, доктора физико-математических наук, профессора Павла Викторовича Блюха (1922-2000 гг.). После демобилизации из армии в звании подполковника технической службы Павел Викторович в 1958 г. был принят на работу в Институт радиофизики и электроники АН УССР (ИРЭ) на должность младшего научного сотрудника. В 1959 г. он защитил кандидатскую диссертацию и с 1960 г. возглавил один из двух теоретических отделов ИРЭ. Со временем П. В. Блюх защитил докторскую диссертацию (1970 г.), а отдел получил название “Теоретический отдел распространения радиоволн и ионосферы” (ТОРРИ). Основная научная тематика работ ТОРРИ в ИРЭ была связана с распространением сверхнизкочастотных, сверхдлинных и коротких волн в случайно-неоднородных средах в околоземном пространстве. Кроме того, большое внимание уделялось различным природным линзам, фокусирующим электромагнитные волны в ионосфере Земли, солнечной короне и полях тяготения массивных космических

объектов. В 1980 г. в ИРЭ, по инициативе академика С. Я. Брауде и профессора Л. Н. Литвиненко, было организовано Отделение радиоастрономии (ОР ИРЭ), и ТОРРИ практически в полном составе во главе с заведующим перешел во вновь созданную структуру. В 1985 г. на базе ОР ИРЭ был организован Радиоастрономический институт АН УССР. Сфера научных интересов ТОРРИ после перехода в ОР ИРЭ существенно расширилась: кроме исследований распространения волн в околоземном и космическом пространстве, большое внимание уделялось диагностике ионосферы и волновым процессам в пылевой космической плазме. В связи с этим отдел был сначала переименован в “Отдел физики плазмы и ионосферы”, а впоследствии получил окончательное название “Отдел космической радиофизики” (ОКР). Летом 1986 г. Павел Викторович решил оставить заведование отделом, и эту должность занял профессор И. М. Фукс – теоретик, известный своими работами в теории рассеяния волн на случайно неоднородных поверхностях. С приходом И. М. Фукса в отделе появилось новое научное направление, связанное с задачами распространения радиоволн коротковолнового диапазона над морской поверхностью.

В 1993 г. директором РИ НАНУ академиком Л. Н. Литвиненко было принято решение о выделении из ОКР ионосферной группы и создании на ее базе нового “Отдела ионосферного распространения радиоволн”. Возглавил новый отдел ученик Павла Викторовича профессор Ю. М. Ямпольский. Логическим продолжением исследований распространения радиоволн над морской поверхностью явилось то, что в 1996 г. в состав ОКР вошла группа экспериментаторов под руководством Л. И. Шарапова. С 1999 г. Отдел космической радиофизики РИ НАНУ возглавил ученик Павла Викторовича Блюха профессор А. А. Минаков, научные интересы которого связаны с теорией распространения волн в случайно неоднородных средах, в частности, в полях тяготения массивных астрофизических объектов.

Несмотря на то что Павел Викторович с 1986 г. уже не являлся руководителем отдела, он, тем не менее, продолжал до конца своих дней активно работать в ОКР, фактически оставаясь его идеологом, определяя и формулируя тематику научных исследований. За многолетнюю историю в теоретическом отделе при непосредственном участии П. В. Блюха было подготовлено 14 кандидатов и 5 докторов наук.

Основные научные направления работ отдела космической радиофизики

Распространение электромагнитных волн в околоземном пространстве

Тематика работ ТОРРИ на первом этапе в основном была направлена на развитие теории распространения радиоволн в реальных средах в интересах радиолокации, связи и навигации с использованием наземных систем. История радиофизики – это одновременно и история освоения новых диапазонов длин волн. С момента первых работ А. С. Попова, ознаменовавших открытие радиосвязи (конец XIX столетия), возникло стремление к использованию все более длинных волн. Для радиоинженеров тех времен

ионосферы еще не существовало и казалось, что загоризонтную радиосвязь удастся осуществить только за счет дифракции длинных волн. В течение относительно непродолжительного времени была обнаружена способность коротких волн распространяться на большие расстояния, причем в этом процессе проявилась важнейшая роль ионосферы. В результате возникла обратная тенденция: диапазон используемых частот начал расширяться в сторону коротких волн. Процесс “укорочения” стал особенно бурным в 40-х годах XX столетия, в период развития радиолокации. Это было связано с тем, что на коротких волнах достигалось лучшее пространственное и угловое разрешение. Ярким примером этой тенденции явилось создание в лаборатории электромагнитных колебаний Украинского физико-технического института (при активнейшем участии А. А. Слуцкина, А. Я. Усикова и С. Я. Брауде) импульсного трехкоординатного радиолокатора дециметрового диапазона “Зенит-Рубин” (1937-1943 гг.). Прошло еще немногим более двух десятков лет, и в число освоенных вошли ультракороткие, микрорадиоволны и даже волны светового диапазона. В то время казалось, что границы используемого диапазона частот наконец-то определились. Однако уже в 50-х годах вновь проявился интерес к еще не освоенной области частот – сверхнизким частотам (СНЧ – герцы, десятки герц). Благодаря тому что длины волн соизмеримы с радиусом Земли, в СНЧ диапазоне могут наблюдаться глобальные резонансы, когда частота колебаний совпадает с одной из собственных частот резонатора, образованного сферической полостью, заключенной между поверхностью Земли и нижней границей ионосферы (≈ 70 км). На возможность возникновения таких глобальных резонансов впервые указал В. Шуман, и впоследствии эти резонансы стали называться шумановскими. В ТОРРИ для исследования распространения СНЧ волн была образована группа, которая состояла не только из теоретиков, но и из экспериментаторов. В 1968 г. П. В. Блюхом совместно с А. П. Николаенко и Ю. Ф. Филипповым был предсказан

эффект расщепления собственных частот в резонаторе Земля–ионосфера под воздействием геомагнитного поля. Через тридцать лет этот эффект был экспериментально подтвержден в Германии. Следует заметить, что интерес к СНЧ диапазону в ИРЭ был связан не столько с проблемами “чистой” теории, сколько с конкретными прикладными задачами – с навигацией и связью погруженных в мировой океан объектов. Известно, что электромагнитные волны могут проникать внутрь проводящих сред. Глубина проникновения определяется величиной так называемого скин-слоя. Она тем больше, чем длиннее волна и тем меньше, чем выше проводимость среды. Для того чтобы волна проникала, например, под воду на большие глубины, нужно использовать очень длинные волны, например, СНЧ диапазона. При этом связь с погруженными в мировой океан объектами можно осуществлять и без всплытия последних. Результаты многолетних исследований получили логическое завершение в монографии (1987, 1980 гг.) [1, 2], а ученик Павла Викторовича А. П. Николаенко защитил докторскую диссертацию по СНЧ тематике (1988 г.).

Если сферическая полость, заключенная между поверхностью Земли и нижней границей ионосферы, в СНЧ диапазоне выполняет функции глобального резонатора, то в сверхдлинноволновом (СДВ – электромагнитные волны с частотами от 3 до 30 кГц) и коротковолновом (КВ – волны с частотами от 3 до 30 МГц) диапазонах она может рассматриваться как своеобразный естественный волновод. Пристальное внимание к волноводному распространению СДВ и КВ было опять же в основном связано с прикладными задачами создания глобальных систем связи и навигации. Оба направления сопровождалось активными теоретическими и экспериментальными исследованиями. В ТОРРИ была создана экспериментальная лаборатория, которую возглавил В. Ф. Шульга (1929-1972 гг.).

Радиоволны СДВ диапазона распространяются в волноводном канале Земля–ионосфера на большие расстояния со сравнительно малым затуханием. При этом волны

обладают весьма ценным свойством: их поля стабильны и слабо чувствительны к случайным изменениям, происходящим в ионосфере. Именно поэтому в свое время СДВ нашли широкое применение в глобальной радионавигации, службах времени и частоты. Ныне многие из этих функций с успехом выполняют глобальные спутниковые системы. При распространении СДВ в естественном волноводе Земля–ионосфера возможно появление нескольких взаимодействующих между собой собственных мод. При распространении СДВ на большие расстояния происходит эффективная фильтрация мод, и поэтому поле сигнала в точке наблюдения формируется лишь небольшим числом нормальных волн. В результате интерференции возникают периодические осцилляции среднего поля вдоль трассы распространения, что проявляется в виде усиления или ослабления сигналов. Так как параметры естественного волноводного канала в течение суток подвержены изменениям, то в пункте приема будут наблюдаться флуктуации амплитуды и фазы волны. Анализ показывал, что в областях интерференционных минимумов среднего поля эти флуктуации должны быть аномально высокими. Для экспериментального подтверждения данного вывода с 1971 по 1974 гг. в ИРЭ проводились регулярные измерения амплитуды и фазы СДВ сигналов в диапазоне частот от 10 до 20 кГц. Для радиостанции GBR (Лондон), работающей на частоте 16 кГц, длина трассы оказалась такой, что пункт наблюдения, расположенный под Харьковом (пос. Граково), как раз попадал в область аномальных флуктуаций. Результаты многолетних измерений успешно подтвердили теоретические предсказания. Развитие работ по СДВ тематике естественным образом сопровождалось профессиональным ростом большой группы сотрудников. Логическим подведением итогов многолетней работы теоретического отдела явилась публикация монографии (1984 г.) [3] и защита учеником Павла Викторовича Безродным В. Г. докторской диссертации (1991 г.).

Исследования ионосферы

Ионосферная тематика ТОРРИ в период середины – конца 60-х годов XX столетия была в основном сосредоточена на рассмотрении резонаторных и волноводных свойств полости Земля–ионосфера в СНЧ и СДВ диапазонах. Однако в 80-х годах пристальное внимание было уделено исследованиям ионосферы, что было связано, прежде всего, с переходом отдела в ОР ИРЭ. В тот период в полную силу заработал крупнейший в мире декаметровый радиотелескоп УТР-2 – уникальный инструмент, который на долгие годы предопределил мировое лидерство Украины в низкочастотной радиоастрономии. Поскольку основным мешающим (вредным) фактором для радиоастрономических наблюдений в этой частотной области является ионосфера, естественно было сосредоточить усилия теоретиков и экспериментаторов на исследованиях распространения декаметровых радиоволн в околоземной плазме (ионосфере). В отделе сложилась научная группа, состоящая из теоретиков и экспериментаторов, которая стала активно работать по ионосферной тематике. Были сформулированы основные принципы многочастотного радиозондирования ионосферы с использованием сигналов не только искусственного (сигналы радиовещательных станций и спутниковых передатчиков), а и естественного и техногенного происхождения. К числу последних относятся, например, такие, как дискретные космические радиоисточники, радиоизлучение Солнца и Юпитера и др. Эффективность работ по исследованию распространения радиоволн и зондированию ионосферы, с учетом уникальных свойств УТР-2, превзошла все ожидания. Использование радиотелескопа как фазированной остро-направленной антенной решетки позволило проводить исследования многолучевых КВ полей в окрестности пространственной каустики, которая возникает при отражении КВ сигналов от ионосферы на частоте, близкой к максимально применимой. Угловое разделение интерферирующих “нижнего” и “верхнего” лучей позволило сформулировать и решить обратную задачу по вос-

становлению пространственно-временных характеристик ионосферного слоя. Многочисленные измерения в прикаустической области дали возможность разработать оригинальный метод дистанционного зондирования ионосферы на наклонных односкачковых КВ радиолиниях.

Помимо чисто радиоастрономических приложений, “ионосферная группа”, возглавляемая Ю. М. Ямпольским, активно участвовала в прикладных работах по КВ тематике. Прикладной интерес к задачам загоризонтной радиолокации в КВ диапазоне давал возможность участвовать в крупных НИР и развивать экспериментальную базу исследований. Работы проводились в широкой научной кооперации со многими коллегами из ИРЭ, ИЗМИРАН, ФИАН, НИРФИ, МИРЭА, ПГИ, ИПГ, МГУ и др.

В связи с административными переменами в ОКР в конце 80-х годов ионосферная группа получила большую самостоятельность. Учитывая это, директор РИ НАНУ академик Л. Н. Литвиненко в 1993 г. принял решение о создании нового “Отдела ионосферного распространения радиоволн”. Возглавил отдел ученик Павла Викторовича профессор Ю. М. Ямпольский, который в 1990 г. успешно защитил докторскую диссертацию по КВ тематике.

В заключение раздела, посвященного распространению электромагнитных волн в околоземном пространстве, следует отметить, что работы по исследованию распространения волн в случайно-неоднородных средах в настоящее время в ОКР активно продолжаются внуком Павла Викторовича К. Ю. Блюхом [4-6].

Космические линзы

Начиная с запуска первого искусственного спутника Земли (1957 г.), во многих странах стали бурно развиваться радиофизические исследования околоземного пространства, причем приоритет отдавался дистанционным неконтактным методам. Были созданы гигантские радары некогерентного рассеяния, позволяющие зондировать всю ионосферную толщу; а также

получили широкое распространение методы радиопросвечивания ионосферы сигналами служебных и специальных спутниковых передатчиков. Большинство задач распространения радиоволн в ионосфере и магнитосфере Земли в те годы носило не только чисто научный, но и “прикладной” (оборонный) характер. Вполне естественно, что сотрудники ГОРРИ не могли остаться в стороне от перспективных исследований.

В 1962 г. в журнале “Геомагнетизм и аэронавигация” появилась статья, в которой директор ИРЭ Александр Яковлевич Усиков и Павел Викторович Блюх рассмотрели интересный, но абстрактный по тем временам вопрос о линзоподобном действии атмосферы Земли [7]. Эту работу можно смело считать отправной точкой исследований природных линз не только в Харькове, но и во всем бывшем Советском Союзе. Интерес к линзовому эффекту, возникающему при прохождении электромагнитных волн через атмосферу планет солнечной системы, был связан с тем, что в конце 50-х годов некоторыми зарубежными исследователями было предложено использовать его для наблюдений (с высочайшим разрешением) планет у ближайших звезд или для передачи энергии от земных источников на большие расстояния космическим аппаратам. Однако в расчетах не было учтено рассеяние волн на случайных неоднородностях среды, которое сильно “портит” природные линзы. В 1961 г. А. Я. Усиковым на сессии АН УССР был сделан доклад об атмосферной линзе, после чего появилась указанная выше работа. Продолжая линзовую тематику ИРЭ, в 1969 г. Павел Викторович и его ученик А. С. Брюховецкий предложили оригинальную идею создания гигантской искусственной ионосферной линзы за счет нагрева плазменного слоя мощным коротковолновым излучением [8]. В этот же период вышла из печати работа П. В. Блюха, В. Г. Синицына и И. М. Фукса [9], в которой авторы рассмотрели распространение электромагнитных волн в солнечной короне. Эти исследования были инициированы С. Я. Брауде, и их практическая необходимость была связана с наблюдениями радиоисточников,

траектории движения которых на небесной сфере проходили вблизи диска Солнца. Анализ показал, что в декаметровом диапазоне длин волн корона Солнца создает своеобразный линзовый эффект. Несмотря на то что “линза-корона” не фокусирует в обычном смысле, а рассеивает лучи, она формирует каустическую поверхность, имеющую вид расходящегося конуса. Земля при своем движении по орбите пересекает границу, отделяющую две каустические области “свет” – “тьень”. При этом параметры наблюдаемых источников претерпевают сильные искажения, которые необходимо учитывать для правильной интерпретации результатов. Следующей природной линзой, рассмотренной сотрудниками ГОРРИ, была линза – лунная тень. Эта необычная линза явилась в какой-то степени “побочным продуктом” СДВ тематики. В конце 70-х годов П. В. Блюхом и Р. С. Шубовой исследовался вопрос об изменениях параметров ионосферы в области лунной тени, возникающей во время полного солнечного затмения [10]. Было известно, что параметры СДВ сигналов, распространяющихся в естественном волноводе Земля–ионосфера, сильно зависят от эффективной высоты волноводного канала. В свою очередь, последняя зависит от состояния ионосферы: днем, когда наблюдается сильная ионизация частиц ионосферы солнечным излучением, она ниже, чем в ночное время, когда солнечная радиация отсутствует. Во время солнечного затмения лунная тень закрывает часть ионосферы Земли (средний радиус тени на поверхности Земли приблизительно равен 100 км). В области тени состояние ионосферы приближается к ночным условиям, и это приводит к тому, что увеличивается эффективная высота волноводного канала. Локальное увеличение высоты волновода приводит к уменьшению фазовой скорости распространяющегося СДВ сигнала. Фазовый фронт волны деформируется таким образом, что в принципе возможна фокусировка какой-либо волноводной моды.

Линзовая тематика, возникшая в недрах ИРЭ и продолженная в РИ НАНУ, со временем вовлекла в свою сферу большое число

ученых не только харьковского, но и московского, киевского, ленинградского и других регионов. Резко увеличилось не только количество исследователей и публикаций, но и существенно возросли масштабы исследуемых линз. Ярким примером этой тенденции явились работы по изучению эффекта гравитационной фокусировки, которые были начаты в ТОРРИ еще в 1973 г. задолго до экспериментального обнаружения в 1979 г. Д. Уолшем, Р. Карсвеллом и Р. Вейманом первой гравитационной линзы (ГЛ). Основу эффекта ГЛ составляет один из классических эффектов ОТО – отклонение лучей света в полях тяготения массивных объектов. В качестве таковых могут выступать планеты, звезды (например, Солнце), скопления звезд – шаровые скопления, галактики или даже целые скопления галактик. Под действием линзового эффекта полей тяготения близлежащих к наблюдателю массивных объектов сильно искажается картина заднего фона источников. Возникают дугообразные, кольцеобразные и множественные изображения одного и того же источника. Другими словами, наблюдаются своеобразные космические “миражи”. Таких “миражей” к настоящему времени обнаружено уже несколько десятков, и их количество с каждым годом “катастрофически” растет, так как в процесс их поиска подключены все без исключения крупнейшие обсерватории мира. Огромный интерес к ГЛ-эффекту связан, прежде всего, с его актуальнейшими астрофизическими приложениями. С помощью линзового эффекта полей тяготения возможно непосредственное определение таких важнейших космологических параметров Вселенной, как постоянная Хаббла, параметр замедления и выявление “темной” (неизлучающей) массы. Ввиду отсутствия в бывшем СССР, на период начала работ в ИРЭ, инструментов, пригодных для наблюдений ГЛ (разрешающая способность телескопов в оптике и радиодиапазоне должна быть не хуже одной угловой секунды), Павлом Викторовичем и его учеником – в то время аспирантом А. А. Минаковым, проводились в основном теоретические ис-

следования, хотя непременным требованием Павла Викторовича всегда был “выход на эксперимент”. И здесь в качестве курьезного случая можно указать на создание во второй половине 70-х годов отдельской “игрушки” – первой в мире лабораторной модели ГЛ, которая в точности воспроизводила отклонение лучей света в поле тяготения Солнца. Демонстрация модели приводила в восторг не только харьковских исследователей, но и друзей – коллег радиофизиков, астрофизиков и астрономов из Москвы, Ленинграда, Горького и других научных центров бывшего СССР. В настоящее время работы по ГЛ-тематике в ОКР проводятся в рамках многочисленных государственных и международных программ в тесной кооперации с зарубежными и отечественными коллегами [11-13]. При этом пристальное внимание уделяется регулярным наблюдениям ГЛ. Эта часть работы выполняется наблюдателями астрономами (сотрудниками ОКР РИ НАНУ и НИИ астрономии Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина) на 1.5-метровом телескопе Института астрономии АН Республики Узбекистан (г. Ташкент). Результатом исследований явились многочисленные публикации, первая в мире монография по ГЛ (1989 г.) [14] и еще одна докторская диссертация ученика Павла Викторовича А. А. Минакова (1993 г.).

Пылевая плазма

В 1981 и 1982 гг. в журнале “Science” были опубликованы сенсационные данные о кольцах Сатурна и Юпитера, полученные при пролетах вблизи этих планет космических аппаратов “Voyager”. П. В. Блюх, не откладывая дело на потом, начал с энтузиазмом знакомиться с литературой, посвященной кольцам планет. Его интерес к этим классическим для небесной механики объектам был связан с совершенно новым взглядом на роль пылевых частиц. Пролеты “Voyager” выявили необычные свойства мелких частиц, составляющих кольца Сатурна и Юпитера: ничтожно малая толщина колец и их расслоение на множество (до нескольких тысяч) элементарных колечек, переплетения отдельных тонких колечек и, наконец,

самое интригующее – возникновение спице-подобных радиальных неоднородностей (“спиц”), состоящих из микронных и субмикронных пылинок в широком В-кольце Сатурна. Все эти аномальные структуры невозможно было объяснить в рамках классической небесной механики. Это удалось сделать только с привлечением сил электромагнитного взаимодействия. Наличие таких сил в космических условиях объясняется тем, что пылинки колец обладают не только значительной массой, но и несут на себе достаточно большой электростатический заряд. Этот заряд возникает в результате воздействия солнечного излучения и взаимодействия пылевых частичек с космической плазмой, которая окружает массивные планеты. Взаимодействие заряженных пылинок с космической плазмой приводит к тому, что образуется своеобразная квазинейтральная среда, которая получила название “пылевая плазма”. Активно заниматься пылевыми структурами в космосе Павел Викторович начал с ноября 1982 г., взяв для выполнения новой задачи молодую аспирантку В. В. Ярошенко. Проблемы пылевой плазмы надолго привлекли внимание небольшой теоретической группы и составили одно из основных научных направлений ОКР. В начальный период исследований П. В. Блюхом и В. В. Ярошенко одновременно с американскими учеными были предсказаны модификации кеплеровских орбит заряженных частиц и впервые сформулирована идея о коллективных взаимодействиях частиц в среде, состоящей из смеси плазмы и космической пыли (1982-1983 гг.). Особое внимание было уделено волновым процессам в плазме, связанным с наличием пылевого компонента. Разработанная волновая теория “спиц” в кольцах Сатурна хорошо согласовалась с результатами наблюдений. На протяжении 1985-1995 гг. Блюх и Ярошенко активно разрабатывали идею о взаимосвязи гравитационных и электростатических волновых возмущений в пылевой плазме с широким спектром размеров (масс) пылевого компонента. В результате исследований была предсказана связь между так на-

зываемой джинсовской неустойчивостью нейтральной гравитирующей среды и плазменными волновыми процессами в среде заряженных пылинок. В качестве приложений исследовались волновые процессы и их устойчивость в самогравитирующей пылевой плазме колец планет-гигантов. Были рассчитаны потери энергии движущейся тяжелой заряженной частицы на поляризацию самогравитирующей плазмы, а также предсказана возможность излучения электромагнитных волн нейтральной массивной частицей. Результатом многолетних исследований явились опубликованная первая в мире монография по пылевой плазме (1995 г.) [15] и защита ученицей Павла Викторовича В. В. Ярошенко сначала кандидатской, а затем и докторской диссертаций (1998 г.).

В последний пятилетний период совместной деятельности (1995-2000 гг.) П. В. Блюхом и В. В. Ярошенко было предсказано возникновение своеобразных аналогов кинетических эффектов (бесстолкновительное затухание пылевого звука и возможность разнообразных кинетических неустойчивостей), связанных с непрерывным спектром размеров пыли, который наблюдается в реальных пылевых космических объектах [16]. В эти же годы были исследованы нелинейные низкочастотные волны в пылевой и самогравитирующей плазме и получены условия возникновения решений типа уединенных нелинейных волн (солитонов) [17].

В настоящее время работы по пылевой плазме, инициированные Павлом Викторовичем в РИ НАНУ, успешно продолжают не только в Украине, но и за рубежом. Можно отметить, что в свое время первые работы теоргруппы отдела увлекли своей необычной научной направленностью выпускника радиофизического факультета Харьковского госуниверситета А. Г. Загородного, ныне член-корреспондента НАНУ директора Института теоретической физики им. М. М. Боголюбова. Результаты его многолетних исследований также внесли существенный вклад в теорию флуктуационных явлений в пылевой плазме. В последние годы В. В. Ярошенко активно взаимо-

действует с коллегами из института Внеземной физики им. Макса Планка (Германия). Особое внимание при этом уделяется лабораторным приложениям предыдущих многолетних исследований. Речь идет о так называемых “пылевых кристаллах”. Последние мировые достижения показали, что самосогласованное моделирование коллективных процессов в пылевой плазме приводит к интересным особенностям, которые не имеют места в обычной электронно-ионной плазме. В частности, частицы в пылевой плазме могут быть слабо или сильно энергетически связаны (в зависимости от величины отношения электрическая энергия/тепловая энергия). Если это отношение меньше или порядка единицы, то пылевая компонента характеризуется слабой связью, и в такой среде возможно возникновение плазменных волн, например, пылевого звука. В случае сильной энергетической связи между частицами в пылевой плазме возможно возникновение самоорганизованных структур – “плазменных кристаллов” [18, 19]. Экспериментальное и теоретическое изучение плазменно-пылевых кристаллов представляет собой наиболее перспективное направление в физике пылевой плазмы. Особенно большие надежды связываются с плазменно-пылевыми экспериментами, проводимыми на международной космической станции (см., например, [20]).

Дистанционное зондирование среды

С момента перехода теоретического отдела в ОР ИРЭ внутри него была образована небольшая теоргруппа, которую возглавил профессор И. М. Фукс. Задачей группы было, в тесном взаимодействии с экспериментаторами других отделов, всестороннее исследование распространения коротких радиоволн (миллиметрового диапазона) вблизи морской поверхности. На первом этапе научная направленность работ определялась в основном задачами пеленгации целей и источников прямого сигнала, а также оперативным дистанционным контролем состояния поверхности Мирового океана. В годы независимости Украины приоритеты были отданы дистанционно-

му зондированию различных земных покровов. В 1996 г. взаимодействие экспериментаторов с теоретиками ОКР обрело свое логическое завершение включением в состав ОКР экспериментальной группы (Н. В. Горбач, В. Г. Гутник, А. П. Удовенко и др.), возглавляемой Л. И. Шаратовым.

Накопленный материал многолетних исследований характеристик радиоволн трехмиллиметрового диапазона, распространяющихся вблизи морской поверхности, позволил выявить ряд необычных особенностей рассеяния, не вписывающихся в общепринятые на тот период модельные представления [21-24]. В первую очередь это касалось законов распределения флуктуаций амплитуд принятого сигнала. Несмотря на то что большинство экспериментальных распределений флуктуаций амплитуды при пеленгации точечных целей и источника прямого сигнала могли быть аппроксимированы кривыми семейства закона Райса (что вписывалось в общепринятые модели), в ряде экспериментов на коротких трассах были зарегистрированы флуктуации амплитуды с отличающимися законами распределения. Для таких измерений характерной особенностью являлись завышенные (по сравнению с законом Райса) значения вероятности малых амплитуд сигнала. Другими словами, довольно часто наблюдались глубокие интерференционные замирания. Кроме того, для таких записей характерным было наличие корреляционной связи между флуктуациями амплитуды и углов прихода сигнала. Согласно хорошо разработанной теории диффузного рассеяния при отражении сигнала от объекта, состоящего из большого количества элементарных отражателей, такая корреляционная связь должна была бы практически отсутствовать. Всесторонний анализ необычного поведения кривых рассеяния позволил сделать вывод, что наблюдаемые эффекты связаны с наличием на поверхности моря ограниченного количества зеркально отражающих участков. На основе проведенных исследований была разработана модель распространения радиоволн коротковолновой части миллиметрового диапазона над морской поверхностью на коротких трассах.

Еще одной важной отмеченной особенностью рассеяния было наличие резких изменений интенсивности отраженного сигнала, наблюдаемых при обрушении морских волн. Отраженный сигнал в этом случае, как правило, являлся нестационарным, и в нем наблюдались две фазы: всплески (с превышением среднего уровня интенсивности) и паузы (когда уровень сигнала оказывался значительно ниже среднего). Анализ выявленных особенностей показал, что одной из основных причин появления всплесков и пауз в суммарном сигнале является эффект когерентного сложения полей, отраженных в обратном направлении от капельно-брызговой фракции (КБФ), образующейся при обрушении морских волн.

Согласно теории, эффект когерентного усиления обратного рассеяния возникает в результате интерференции многократно рассеянных волн, проходящих в среде по прямым и обратным траекториям. Интерференция волн в направлении обратного рассеяния приводит к появлению острого пика в распределении интенсивности по углам. Кроме усиления, при обратном рассеянии сигналов возникают еще и поляризационные эффекты, которые очень чувствительны к параметрам среды (плотности упаковки рассеивателей и их диэлектрическим свойствам). Это обстоятельство имеет важное значение и может быть использовано для задач дистанционной диагностики сред.

Анализ соответствия теории и наблюдаемых статистических энергетических и спектральных характеристик сигналов, рассеянных морской поверхностью в широком диапазоне частот (вплоть до 150 ГГц), позволил сделать важный вывод о том, что с укорочением длины электромагнитной волны вклад отражений от КБФ возрастает. Учет влияния КБФ был положен в основу разработанной модели обратного рассеяния радиоволн коротковолновой части миллиметрового диапазона. Теоретико-экспериментальная модель позволила не только оценить вклад различных механизмов формирования энергетического спектра, сме-

ну механизмов рассеяния в разных участках рассматриваемого частотного диапазона радиоволн, но и получить оценки вероятностей появления всплесков и пауз. Результаты многолетних исследований эффекта обратного рассеяния морской поверхностью были использованы при проектировании когерентно-импульсной РЛС двухмиллиметрового диапазона радиоволн.

В исследованиях распространения электромагнитных волн вблизи морской поверхности огромное значение имеет оперативный контроль состояния поверхности Мирового океана, которое зависит от параметров приводного ветра. В практике океанографических исследований широко применяются дистанционные радиолокационные методы, которые позволяют оценивать состояние поверхности и приповерхностного слоя по характеристикам отраженного сигнала. Основным параметром отраженного сигнала – интенсивность, которая характеризуется удельной эффективной поверхностью рассеяния (УЭПР). Современное состояние техники позволяет использовать для дистанционного зондирования поверхности радиоволны, начиная от метрового диапазона и вплоть до радиоволн оптического диапазона, причем использование многочастотных методов радиолокации значительно повышает информативность получаемых данных.

При решении задач дистанционного зондирования поверхности Мирового океана значительный интерес представляет поведение УЭПР в большом диапазоне скоростей приводного ветра и в широком частотном диапазоне зондирующих сигналов. Сигнал, отраженный от морской поверхности, можно представить в виде суммы сигналов – отраженного непосредственно от самой поверхности и рассеянного на КБФ, образующейся в результате обрушения морских волн. Расчетные оценки УЭПР моря были получены в рамках метода малых возмущений. Учет УЭПР КБФ проводился на основе разработанных методик и выражений, апробированных при исследовании эффекта обратного рассеяния морской поверхностью, а также эмпирической зави-

симости водности облака КБФ от скорости ветра, полученной при проведенных исследованиях. На основе найденных оценок была уточнена расчетная модель рассеяния радиоволн морской поверхностью в большом диапазоне скоростей приводного ветра и в широком диапазоне частот зондирующих сигналов.

Экспериментальные и теоретические исследования эффекта обратного рассеяния радиоволн коротковолновой части миллиметрового диапазона проводились не только для морской поверхности. Большое внимание уделялось и рассеянию волн различными земными покровами и разнообразными движущимися объектами. Работы проводились применительно к созданию систем доплеровской селекции целей. Исследования позволили получить огромный массив записей сигналов, рассеянных разными видами растительности. Основное внимание в экспериментах уделялось доплеровским спектрам сигналов, рассеянных травой, кустарником, отдельно стоящими деревьями, лесом, в широком диапазоне скоростей приземного ветра. На основе полученных данных были построены различные статистические характеристики, а также предложены аналитические выражения, с помощью которых можно было удовлетворительно аппроксимировать доплеровские спектры, проанализировать эффективность существующих и предложить алгоритмы построения эффективных систем доплеровской селекции целей на фоне мешающих отражений от местности.

Тщательный анализ состояния теории и экспериментальных характеристик обратного рассеяния радиоволн (коротковолновой части миллиметрового диапазона) от суши и движущихся объектов позволил к концу 80-х годов впервые в СССР разработать и создать макет когерентно-импульсной РЛС с системой доплеровской селекции на частоте 140 ГГц. За цикл работ по распространению коротких волн вблизи поверхности раздела руководитель теоретической группы ОКР И. М. Фукс в составе группы сотрудников РИ НАНУ

(Л. Н. Литвиненко, В. П. Чурилов, Л. И. Шарпов, А. П. Удовенко и Н. А. Даниленко), был удостоен в 1987 г. Государственной премии УССР в области науки и техники.

В настоящее время теоретические исследования различных аспектов эффекта обратного рассеяния продолжают сотрудники ОКР Тишковцом В. П. и Литвиновым П. В. Разработанная векторная теория когерентного усиления обратного рассеяния для случайно-неоднородных сред, состоящих из дискретных хаотически ориентированных рассеивателей (например, гидрометеоров), позволяет определять зависимость наблюдаемых эффектов от различных параметров среды [25-27]. В частности, впервые показано, что в результате интерференции рассеянных волн:

- степень линейной поляризации может быть как отрицательной, так и положительной;

- полуширина интерференционного пика возрастает с увеличением размеров рассеивателей и уменьшается с ростом действительной части показателя преломления;

- при наклонном падении излучения на среду амплитуда пика уменьшается с увеличением угла наклона, а сам пик становится ассиметричным: более широким в направлении к зениту и сужающимся в направлении к горизонту.

Полученные результаты могут быть использованы не только для дистанционного контроля состояния различных сред в земных условиях, но и во многих задачах астрономии и астрофизики.

Педагогическая и научно-популяризаторская деятельность

Сотрудники ОКР уже многие десятилетия активно участвуют в педагогической и научно-популяризаторской деятельности. Основу этому заложил в свое время П. В. Блюх. К началу 70-х годов прошлого столетия на многих факультетах и кафедрах с радиофизическими и радиотехническими специализациями возникла острая необходимость постановки общего курса, посвященного изложению основ статистической радиофизики. Под эгидой Министерства

высшего, среднего и специального образования СССР в 1975 г. в ведущих вузах страны был объявлен смотр-конкурс проектов такого курса. Вариант, предложенный профессором кафедры космической радиофизики Харьковского госуниверситета П. В. Блюхом, был признан лучшим и рекомендован в качестве базового. Долгие годы лекции по статистической радиофизике, физике плазмы и аэрономии читались Павлом Викторовичем на радиофизическом факультете Харьковского госуниверситета. Впоследствии курс лекций по статистической радиофизике перешел “по наследству” сотруднику ОКР И. М. Фуксу, а с 1998 г. читается А. А. Минаковым. Заложенные П. В. Блюхом основы и традиции продолжают свою жизнь и поныне, помогая в преподавательской деятельности его ученикам и коллегам. В 2003 г. существенно переработанный и дополненный курс по статистической радиофизике был издан учениками Павла Викторовича А. А. Минаковым и профессором Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина О. Ф. Тырновым в виде первого не только на Украине, а и на всем бывшем постсоветском пространстве учебника для высших учебных заведений [28]. В 2005 г. по решению Ученых советов Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина и РИ НАНУ учебник “Статистическая радиофизика” был выдвинут на соискание Государственной премии Украины в области науки и техники.

Павел Викторович был активнейшим ученым, пропагандирующим достижения науки и техники, и привлекал к этой деятельности своих учеников – сотрудников ОКР. В различное время в ведущих научно-популярных изданиях “Наука”, “Природа”, “Знание”, “Квант”, “Наука і суспільство” была опубликована серия статей по актуальным проблемам радиофизики. Статьи и обзорные работы всегда отличались интригующей “завязкой”, захватывающим “действием” и, наконец, успешным заключительным “финалом” спектакля под названием “решение научно-технической проблемы”.

Литература

1. Блюх П. В., Николаенко А. П., Филиппов Ю. Ф. Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля–ионосфера. – Киев: Наукова думка, 1977. – 198 с.
2. Bliokh P., Nikolaenko A., Filippov Y. Schumann Resonances in the Earth-Ionosphere Cavity. – London: Peter Peregrines Ltd, 1980. – 166 p.
3. Безродный В. Г., Блюх П. В., Шубова Р. С., Ямпольский Ю. М. Флуктуации сверхдлинных волн в волноводе Земля–ионосфера. – М.: Наука, 1984. – 144 с.
4. Bliokh K. Yu. Instability of Oscillations in the Flow Moving Through a Random Medium as the Counterpart of the Localization of Waves in a Passive Random Medium // *Waves Random Media*. – 2003. – Vol. 13. – P. 1-8.
5. Bliokh K. Yu. Generalized geometric phase of a classical oscillator // *J. Phys. A: Math. Gen.* – 2003. – Vol. 36. – P. 1705-1710.
6. Блюх К. Ю., Степановский Ю. П. Об изменении поляризации электромагнитной волны в плавной одномерно неоднородной среде // *ЖЭТФ*. – 2003. – Т. 124. – С. 529-535.
7. Усиков А. Я., Блюх П. В. Линзовый эффект атмосферы Земли // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 1962. – Т. 11, №2. – С. 293-304.
8. Блюх П. В., Брюховецкий А. С. Фокусировка радиоволн искусственно созданной ионосферной линзой // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 1969. – Т. 9, №3. – С. 545-549.
9. Блюх П. В., Синицын В. Г., Фукс И. М. Рефракция и рассеяние в солнечной короне при затменных наблюдениях космических источников // *Астрономический журнал*. – 1969. – Т. 46, №2. – С. 348-358.
10. Блюх П. В., Шубова Р. С. О возможности фокусировки СДВ во время солнечного затмения // *Известия вузов. Радиофизика*. – 1979. – Т. 22, №6. – С. 682-689.
11. Colley W., Schild R., Dudinov V., et al. Around the Clock Observations of the Q0957+561 A, B Gravitationally Lensed Quasar II: Results for the Second Observing Season // *Astrophys. J.* – 2003. – Vol. 587. – P. 71-79.
12. Schild R. & Vakulik V. Microlensing of a Ring Model for Quasar Structure // *Astron. J.* – 2003. – Vol. 126, No. 2. – P. 689-695.
13. Vakulik V., Schild R., Dudinov V., Minakov A., et al. Color Effects Associated with the 1999 Microlensing Brightness Peaks in Gravitationally Lensed Quasar Q2237+0305. // *Astron. Astrophys.* – 2004. – Vol. 420. – P. 447-457.

14. Блюх П. В., Минаков А. А. Гравитационные линзы. – Киев: Наукова думка, 1989. – 240 с.
15. Bliokh P., Sinitsin V., Yaroshenko V. Dusty and Self-Gravitational Plasmas in Space. – Dordrecht Netherlands: Kluwer Acad. Publishers, 1995. – 250 p.
16. Блюх П. В., Ярошенко В. В. Затухание электростатических волн в пылевой плазме // Физика плазмы. – 1996. – Т. 22, №5. – С. 452-457.
17. Yaroshenko V. and Verheest F. Nonlinear Low-Frequency Waves in Dusty Self-Gravitating Plasmas // J. Plasma Phys. – 2001. – Vol. 64, part 4. – P. 359-370.
18. Yaroshenko V., Morfill G., and Vladimirov S. Vibrational Modes in the Plasma Crystal due to Nonlinear Temperature Distribution in Gas Discharge Plasmas // Phys. Rev. E. – 2002. – Vol. 66.
19. Verheest F., Yaroshenko V., and Hellberg M. Dust Distribution in Self-Gravitating Dusty Plasmas // Phys. Plasmas. – 2002. – Vol. 9, No. 6. – P. 2479-2485.
20. Yaroshenko V., Annaratone B., Khrapak S., et al. Electrostatic Modes in Collisional Complex Plasmas under Microgravity Conditions // Phys. Rev. E. – 2004. – Vol. 69.
21. Горбач Н. В., Шарапов Л. И., Гутник В. Г. Особенности статистических характеристик радиоволн трехмиллиметрового диапазона при распространении над взволнованной морской поверхностью // Радиофизика и радиоастрономия. – 2002. – Т. 7, №1. – С. 5-10.
22. Гутник В. Г., Кулемин Г. П., Шарапов Л. И. Связь скорости ветра и интенсивности обратного рассеяния от моря в миллиметровом диапазоне при скользящих углах // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2003. – Т. 8, №11/12. – С. 101-108.
23. Шарапов Л. И., Брюховецкий А. С., Ваксер И. Х., Комяк В. А. О влиянии полосы поглощения молекулярного кислорода на амплитудные флуктуации радиоволн миллиметрового диапазона // Известия вузов. Радиофизика. – 1973. – Т. 16, №10. – С. 1505-1509.
24. Горбач Н. В., Михайловский А. И., Фукс И. М., Шарапов Л. И. Спектр интерференционного шума над взволнованной поверхностью моря при малых углах скольжения // Известия вузов. Радиофизика. – 1994. – Т. 36, №11. – С. 1294-1305.
25. Backscattering Effects for Discrete Random Media: Theoretical Results. In: Photopolarimetry in Remote Sensing / V. Tishkovets, P. Litvinov, E. Petrova, K. Jockers, and M. Mishchenko / Eds: G. Videen, Y. Yatskiv and M. Mishchenko. – Kluwer Academic Publisher, 2004. – P. 221-242.
26. Tishkovets V. P. and Mishchenko M. I. Coherent Backscattering of Light by a Layer of Discrete Random Medium // J. Quant. Spectros. Radiat. Transfer. – 2004. – Vol. 86, Issue 2. – P. 161-180.
27. Tishkovets V. P., Petrova E. V. and Jockers K. Optical Properties of Aggregate Particles Comparable in Size to the Wavelength // J. Quant. Spectros. Radiat. Transfer. – 2004. – Vol. 86, Issue 3. – P. 241-265.
28. Минаков А. А., Тырнов О. Ф. Статистическая радиофизика. – Харьков: Факт, 2003. – 540 с.

**Відділ космічної радіофізики
Радіоастрономічного інституту
Національної академії наук України**

А. О. Минаков

Подано коротку історію Відділу космічної радіофізики РІ НАНУ, наукові напрямки досліджень, що проводилися в межах державних та міжнародних програм; основні результати та досягнення, отримані співробітниками відділу за час його існування.

**The Space Radio Physics Department
of the National Academy of Sciences
of Ukraine**

A. O. Minakov

The history of the Space Radio Physics Department of the IRA NASU is overviewed, as well as the lines of research activities carried out within the governmental and international programs, also the principal research results and achievements the Department have obtained for the years of its existence.