

Радиофизические исследования геокосмоса в РИ НАН Украины

Ю. М. Ямпольский

*Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: yampol@rian.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 3 июля 2005 г.

В статье представлен краткий исторический обзор развития радиофизических исследований геокосмоса в Радиоастрономическом институте НАН Украины. Перечислены основные научные результаты, полученные за последние двадцать лет, и приведена подробная библиография по этой тематике.

Возникновение научного направления “радиофизика геокосмоса” в Институте радиофизики и электроники (ИРЭ), а затем в Радиоастрономическом институте НАН Украины относится к 60-м годам прошлого, XX века. Примерно в это время один из двух теоретических отделов ИРЭ был назван “Теоретическим отделом распространения радиоволн и ионосферы” (ТОРРИ). Его создателем и бессменным руководителем на протяжении 20 лет был Павел Викторович Блюх (1922-2000 гг.), доктор физ.-мат. наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники Украины. Тематика отдела в основном была направлена на развитие теории распространения радиоволн в реальных средах в интересах радиолокации, связи и навигации с использованием наземных систем. Важно отметить, что теоретики были “приземлены” к конкретным задачам, которые решались в многочисленных в то время экспериментальных “распространенческих” отделах ИРЭ. Традиция тесной связи экспериментаторов с теоретиками зародилась еще в Харьковском физико-техническом институте. В какой-то мере она ограничивала полет фантазии “чистой теории”, но, с другой стороны, позволяла создавать целостные законченные научные работы, в которых строго интерпретировались новые экспери-

ментальные результаты либо подвергались реальной проверке оригинальные теоретические прогнозы.

В это время начали бурно развиваться спутниковые исследования околоземной плазмы – “среды обитания” большинства первых космических аппаратов. Трансионосферные линии распространения радиоволн стали “жизненными нитями”, связывающими бортовые системы спутников с наземными центрами управления и сбора информации. В первые годы космической эры существовала иллюзия, что с помощью контактных методов бортовыми датчиками удастся полностью восстановить морфологию плазмы, основных полевых характеристик геокосмоса и динамику их поведения. Однако быстро стало ясно, что измерения *in situ* имеют локальный, фрагментарный характер, а спутники приносят существенные возмущения в зондируемую среду вдоль орбиты в зоне действия самих контактных диагностических систем. Поэтому дистанционные радиофизические методы не только не были отвергнуты, но получили мощный импульс к развитию. Начали создаваться гигантские радары некогерентного рассеяния, позволяющие зондировать всю ионосферную толщу, повсеместно по земному шару размещаться ионозонды – радиолока-

торы КВ диапазона, развиваться методы радиопросвечивания ионосферы сигналами служебных и специальных спутниковых передатчиков. Появились идеи искусственной модификации ионосферы сверхмощным электромагнитным излучением с Земли, пучками заряженных частиц и различными химическими реагентами прямо из космоса. В частности, Павлу Викторовичу принадлежала идея создания гигантской искусственной ионосферной линзы за счет нагрева плазменного слоя мощным коротковолновым излучением [1]. Естественно, большинство задач о распространении радиоволн в ионосфере и магнитосфере Земли в те годы носило “прикладной”, т. е. оборонный характер. Ионосферная тематика ТОРРИ середины – конца шестидесятых годов в основном была сосредоточена на рассмотрении резонаторных и волноводных свойств полости Земля – нижняя ионосфера в сверхнизкочастотном (СНЧ) и сверхдлинноволновом (СДВ) диапазонах. В первом из них характерные длины волн были соизмеримы с длиной окружности земного шара (десятки тысяч километров), а во втором – сопоставимы с поперечным размером промежутка Земля–ионосфера (десятки километров). Выбор этой тематики был, с одной стороны, обусловлен прикладными задачами создания глобальных систем связи и навигации для погруженных объектов, а с другой – традиционным интересом Павла Викторовича к “красивым” природным структурам, способным фокусировать и канализировать электромагнитную энергию в окружающем пространстве. Оба направления сопровождались активными теоретическими и экспериментальными исследованиями. В отделе была создана экспериментальная лаборатория, которую возглавил В. Ф. Шульга (1929-1972 гг.). Развитие работ по этим направлениям естественным образом сопровождалось профессиональным ростом большой группы сотрудников, защитой кандидатских, а затем и докторских диссертаций. Логическим подведением итогов успешной многолетней работы отдела по ионосферной тематике явилась публи-

кация двух монографий [2, 3]. Наряду с прикладными аспектами ионосферных исследований Павел Викторович всегда акцентировал внимание учеников на возможности использования особенностей распространения радиоволн разных диапазонов для диагностики нижней ионосферы. Как это ни парадоксально, но до сих пор “подножье ионосферы”, D-область, остается наименее изученной. Плазма на высотах этой области является малой пассивной примесью к нейтральной компоненте атмосферного газа и трудно поддается контактной диагностике и радарным методам зондирования. Примерно к концу 70-х – середине 80-х годов XX-го века прикладной интерес к низкочастотным диапазонам стал спадать, а исследования стали носить геофизический ионосферный характер.

Павел Викторович примерно раз в десять лет сам менял научные интересы и призывал своих учеников следовать этому примеру, говорил, что ученый в своей творческой жизни может и должен сменить направление исследований как минимум два-три раза (такие традиции возникли в ИРЭ с легкой руки С. Я. Брауде, который был непрекращаемым авторитетом для П. В. Блюха). Дав возможность “опериться” своим ученикам в ионосферных исследованиях, Павел Викторович сам поменял тематику, сначала увлекшись гравитационными линзами [4], а затем проблемами пылевой плазмы [5]. В начале 80-х в ИРЭ по инициативе С. Я. Брауде и Л. Н. Литвиненко было организовано Отделение радиоастрономии, и ТОРРИ практически в полном составе во главе с заведующим перешел в Отделение. Расширилась сфера научных интересов, и отдел получил новое название “Отдел космической радиофизики”. К этому времени в полную силу заработал и прославился крупнейший в мире декаметровый радиотелескоп УТР-2, уникальный инструмент, который на долгие годы предопределил мировое лидерство Украины в низкочастотной радиоастрономии [6]. Поскольку основным мешающим фактором для радиоастрономических наблюдений в этой частот-

ной области является ионосфера, естественно было сосредоточить “распространенческие” усилия на исследованиях флуктуаций декаметровых радиоволн в околоземной плазме. С начала 80-х в отделе сложилась научная группа, которая стала активно работать в этом направлении. В это же время были сформулированы основные принципы экологически чистого многочастотного радиозондирования ионосферы с использованием сигналов не специального типа, а уже существующих видов электромагнитного излучения естественного и техногенного происхождения: излучение дискретных космических источников и космический фон, спорадическое излучение Солнца и Юпитера, сигналы радиовещательных станций и спутниковых передатчиков. Быстрый экспериментальный прогресс этой группы был обусловлен, прежде всего, режимом максимального благоприятства при работе на телескопе, уникальными свойствами самого УТР-2 и активной поддержкой теоретиков отдела. Прикладной интерес к задачам горизонтной радиолокации в КВ диапазоне давал возможность участвовать в крупных НИР и развивать экспериментальную базу исследований. К моменту создания Радиоастрономического института НАН Украины в 1985 г. ионосферные исследования стали заметной частью его тематики. В это время в группу входили Ю. М. Ямпольский, В. Г. Галушко, В. С. Белей, В. Г. Безродный, П. В. Пономаренко и несколько дипломников. Исследования проводились в широкой научной кооперации со многими коллегами из ИРЭ, ИЗМИРАН, ФИАН, НИРФИ, МИРЭА, ПГИ, ИПГ, МГУ и др. В 1986 г. Павел Викторович решил оставить заведование отделом, и эту должность занял профессор И. М. Фукс, многоплановый теоретик, известный классическими работами в области статистической теории дифракции, с большим опытом взаимодействия с экспериментаторами. В связи с этими административными переменами ионосферная группа получила еще большую самостоятельность, и директор, академик Л. Н. Литвиненко, неоднократно предла-

гал сформировать на ее базе структурную лабораторию. В этот период был создан первоклассный по тем временам многоканальный когерентный приемный комплекс КВ диапазона, который вместе с уникальными свойствами антенны УТР-2 дал значительную “фору” нашим экспериментальным исследованиям по сравнению с многочисленными “конкурентами” из других организаций. Появилось еще больше прикладных работ и соблазн создать межотраслевую структуру (отдел или лабораторию) с частичным штатным финансированием за счет ресурсов заказчика. Однако, увлеченно работая в классическом академическом отделе, сотрудники группы не поддались этому искушению в угоду бóльшим, как тогда казалось, финансовым возможностям. Роль мудрых советчиков в этой ситуации сыграли С. Я. Брауде и П. В. Блюх, которые не рекомендовали попадать в более жесткую зависимость от заказчика. Как показало ближайшее будущее, эти предостережения оказались полностью оправданными.

Продуктивность использования УТР-2 для задач распространения радиоволн и зондирования ионосферы превзошла все ожидания. Наиболее ярко преимущества остро направленной фазированной антенной решетки (ФАР) проявились при исследовании многолучевых КВ полей в окрестности пространственной каустики при отражении КВ сигналов от ионосферы на частоте, близкой к максимально применимой (МПЧ). Угловое разделение интерферирующих “нижнего” и “верхнего” лучей позволило сформулировать и решить модельную обратную задачу по восстановлению пространственно-временных характеристик ионосферного слоя [7-9]. Многочисленные измерения в прикаустической области и сотрудничество с теоретиками дали возможность разработать оригинальный метод дистанционного зондирования ионосферы на наклонных односкачковых КВ радиополосах [10-12]. Эффект фокусировки поля на каустике был чрезвычайно красив, наблюдая его многократно на различных радиотрассах, мы не переставали удивляться “правиль-

ности” и классическому виду дифракционной картины поля, которая порождалась отражением КВ сигнала от “эфемерного” плазменного слоя, расположенного в сотнях километрах от поверхности Земли. Время перехода рабочей частоты КВ сигнала через МПЧ на заходе Солнца и вид каустики хорошо характеризовали текущее состояние ионосферы и позволяли прогнозировать качество ночных радиоастрономических наблюдений на УТР-2 [13]. Вдали от каустики в радиоосвещенной области использование угловой селекции в сочетании с доплеровской фильтрацией сигналов позволили исследовать широкий класс перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), разработать метод их дистанционного зондирования и визуализации [14, 15]. Созданная теоретическая модель позволяла решать прямые и обратные задачи распространения радиоволн в динамической и статистической модельных постановках. Это в свою очередь дало возможность визуализировать ПИВ, восстанавливать в реальном времени пространственный спектр неоднородностей, направление и скорость их движения, идентифицировать источники самих волновых возмущений. Обобщением этих работ стал метод частотно-углового зондирования ионосферы, нашедший свое применение в Украине [16] и России [17], а в дальнейшем в США [18, 19] и в Антарктиде [20]. Основным вкладом в его развитие внес В. Г. Галушко. В настоящее время метод усовершенствован для вертикального импульсного зондирования ионосферы с применением модели ПИВ в виде объемных внутренних волн плотности [21]. В зоне радиотени на поверхности Земли использование УТР-2 позволило исследовать диаграммы резонансного рассеяния сигналов на естественных ионосферных неоднородностях и восстановить основные характеристики их пространственного спектра вблизи главного максимума ионизации [22, 23].

В начале 80-х годов коллеги из НИРФИ (г. Горький) предложили нам включиться в эксперименты по радарной диагностике искусственной ионосферной турбулентно-

сти (ИИТ), возбуждаемой сверхмощным КВ передатчиком с поверхности Земли. Ими был создан нагревный стенд (НС) “Сура”, обладавший по тем временам рекордными параметрами. Идеальное взаимное расположение “Суры” и УТР-2 позволило использовать эффект ракурсного рассеяния пробных КВ сигналов на сильно вытянутых вдоль магнитного поля Земли искусственных ионосферных неоднородностях. Роль сигналов “подсветки” выполняли многочисленные вещательные КВ радиостанции, расположенные в европейской части СССР. В дополнение совместно с коллегами из Харьковского государственного университета был создан специальный пробный импульсный передатчик для исследования пространственно-временного поведения ИИТ. Высокая пространственная избирательность ФАР УТР-2 и когерентный многоканальный приемник позволили обнаружить много новых динамических свойств стимулированных неоднородностей, ряд из которых стал классическими и до сих пор цитируется в современной научной периодике. Впервые были исследованы трехмерные пространственные характеристики возмущенной области [24, 25], обнаружен эффект “эхо-рассеяния” – повторных периодических всплесков рассеяния пробного сигнала на стадии релаксации ИИТ, предложена модель, поясняющая их возникновение [26]. Было исследовано взаимодействие мелкомасштабных искусственных плазменных неоднородностей с крупномасштабными природными магнитогидродинамическими (МГД) процессами [27, 28], обнаружен обмен энергией между крупномасштабными МГД процессами и мелкомасштабной плазменной турбулентностью [29]. Впервые была высказана и подтверждена гипотеза о радикальном дрейфе неоднородностей от центра к периферии возмущенной области [30]. Детально изучены времена релаксации мелкомасштабной турбулентности и механизмы ее диссипации [31].

Наряду с изучением искусственных возмущений ионосферной плазмы в отделе была предпринята попытка обнаружения

природных нелинейностей в геокосмосе. Исходная предпосылка заключалась в том, что процесс распространения радиоволн в плазме всегда носит нелинейный характер, вопрос состоит лишь в пороговых уровнях чувствительности регистрирующих сенсоров и способах обнаружения нелинейности. Наглядней всего нелинейное взаимодействие должно проявляться в частотной области, сопровождаясь появлением в априорно известном спектре “пробной” радиоволны спектральных составляющих “греющего” воздействия. Руководствуясь этими соображениями, сотрудники отдела провели успешный эксперимент по поиску взаимодействия полей шумановских резонансов (ШР) и кругосветных КВ сигналов [32]. Спектр монохроматического пробного КВ сигнала на кругосветной радиолинии оказался обогащен тремя максимумами ШР. Роль “опорного греющего” источника выполняет поле ясной погоды, которое создает в нижней ионосфере слабо нелинейное взаимодействие между СНЧ и КВ полями. Затухание декаметрового кругосветного радиоволны модулируется мощностью шумановских сигналов. Еще более тонкий эффект естественной нелинейности был обнаружен при поиске кросс-модуляции самих ШР [33]. Оказалось, что при детальном биспектральном анализе в спектрах ШР при больших временах усреднения наряду с основными спектральными максимумами в резонаторе проявляются их слабые комбинационные сумма-разностные компоненты.

К началу 90-х годов по ионосферной тематике было опубликовано свыше 40 научных работ, защищено две докторские диссертации (В. Г. Безродным, Ю. М. Ямпольским) и несколько кандидатских диссертаций (В. Г. Галушко, В. С. Белеем, А. Ф. Беленовым, С. Б. Кашеевым). Группа пополнилась новыми молодыми сотрудниками, аспирантами и дипломниками. Директор РИ НАНУ академик Л. Н. Литвиненко поставил вопрос о целесообразности создания нового отдела. Отдел был организован в июле 1993 г. и получил название “Отдел ионосферного распространения радиоволн”. Оп-

ределяющую роль в принятии такого решения сыграла готовность ведущих теоретиков В. Г. Сеницына и В. Г. Безродного перейти в новое подразделение. Это позволило сохранить традиции ТОРРИ – тесное взаимодействие теории и эксперимента. К этому же периоду относится начало активного международного сотрудничества, появились первые зарубежные гранты и проекты, которые позволили выжить отделу, пожалуй, в самое тяжелое время – в период становления независимости Украины. Важнейший вклад в успешное развитие международного сотрудничества внес В. Г. Сеницын, блестящий знаток английского языка, обладающий высочайшей научной квалификацией. Результаты первых международных исследований в области двухпозиционной локализации ионосферы и магнитосферы с использованием уникальных систем УТР-2 и “Сура” [34] были доложены на заседаниях Бюро Отделения физики и астрономии и Президиума НАН Украины и получили высокую оценку в виде специального постановления Президиума НАН Украины. Такая официальная поддержка молодого отдела на самом высоком национальном научном уровне была очень важна и престижна. Отдел продолжал активные исследования по ионосферной тематике, еще трое сотрудников стали кандидатами наук (Г. В. Литвиненко, П. В. Пономаренко, А. В. Колосков). Однако к середине 90-х ситуация в экономике страны значительно ухудшилась, что незамедлительно сказалось и на научных исследованиях. Особенно страдали институты, имеющие мощные экспериментальные установки, требовавшие систематического регламентного обслуживания и постоянных капиталовложений для обеспечения их работоспособности. Несмотря на поистине героические усилия радиоастрономических отделов, направленные на поддержание работоспособности УТР-2, систематические отключения электроэнергии лихорадили обсерваторию, срывая программы традиционных исследований и ставя под угрозу взятые международные обязательства. Возникли и другие, финансовые трудности, связанные с работой на УТР-2.

В это время отделом был взят новый курс – антарктические исследования. В начале 90-х годов учеными и энтузиастами-полярниками в Киеве был поднят вопрос о предоставлении Украине права использования одной из советских антарктических станций, которые перешли в собственность России. Эта инициатива была поддержана в Украине на официальном государственном уровне, однако не увенчалась успехом, поскольку Россия отказалась создавать прецедент передачи какого-либо имущества за рубежом бывшим республикам Советского Союза. Тем не менее в Киеве при Институте геологических наук НАН Украины был создан Антарктический центр, который практически на общественных началах продолжал поиски возможностей интеграции украинских ученых в антарктические исследования. Центр разослал многим организациям призывы формулировать научные предложения для исследования Антарктики. Соответствующие предложения были сформулированы и в РИ НАНУ, большинство из них касалось электромагнитных и ионосферных исследований на шестом континенте, многие носили приоритетный оригинальный характер. В это же время Великобритания объявила международному сообществу о готовности передать одну из своих первых “зимующих” антарктических баз, “Майкл Фарадей”, “неантарктической” стране. В условиях серьезной международной конкуренции Украина стала победительницей конкурса, и официально с февраля 1996 года база “Майкл Фарадей” перешла под юрисдикцию нашей страны. Станция получила имя выдающегося ученого, первого президента Академии наук Украины – “Академик Вернадский”. Наши научные предложения по исследованию электромагнитных эффектов и ближнего космоса на шестом континенте были замечены и в Украине, и в Великобритании, и уже в 1998 г. первый представитель РИ НАНУ был включен в состав зимовщиков третьей Украинской антарктической экспедиции (УАЭ). С этого времени институт и отдел тесно сотрудничают с Национальным ан-

тарктическим научным центром (НАНЦ) МОН Украины, при поддержке которого реализованы многие оригинальные эксперименты и систематические исследования геокосмоса в Антарктиде. Забегая вперед, отметим, что на сегодня институт не “пропустил” ни одной зимовки. 12 сотрудников РИ НАНУ (10 из отдела) работали в антарктических экспедициях, пятеро из них зимовали на станции (четверо – дважды, один – трижды), пятеро участвовали в двух морских походах из Севастополя в Антарктиду и назад в Украину. Первая в Украине кандидатская диссертация по антарктической тематике была подготовлена в РИ НАНУ (А. В. Зализовским). Сегодня двое ученых из института, А. В. Колосков и В. Н. Лисаченко, зимуют в юбилейной десятой УАЭ. По инициативе отдела в Низкочастотной обсерватории РИ НАНУ в с. Мартовое при поддержке НАНЦ МОН Украины была организована учебно-тренировочная база зимовщиков, на которой созданы условия, максимально приближенные к реальным, существующим на Украинской антарктической станции (УАС). Пять экипажей последних антарктических экспедиций успешно прошли тренировочные сборы на этой базе.

Британцы не зря дали своей станции имя основоположника электромагнетизма Майкла Фарадея, их основные научные исследования были посвящены изучению электродинамических эффектов в верхней атмосфере и геомагнитной активности. С 1998 г. РИ НАНУ возглавил научное направление “физика верхней атмосферы и ближнего космоса” в Государственной программе исследований Украины в Антарктике. Этот раздел Программы включает стратегический план исследования геокосмоса и космической погоды в Антарктике, оснащение УАС новыми устройствами дистанционного зондирования верхней атмосферы и мониторинга электромагнитного климата шестого континента. Уже сегодня станция дооснащена двумя коротковолновыми когерентными комплексами, разработанными в РИ НАНУ, для диагностики

ионосферы и тремя магнитометрическими станциями (созданы Львовским центром Института космических исследований (ЛЦИКИ) НАНУ-НКАУ) для изучения глобальных резонансных систем в околоземном пространстве – магнитосферного, альфвеновского ионосферного и шумановского резонаторов. Сегодня УАС является самой широкополосной магнитной обсерваторией в Антарктике, позволяющей исследовать природные и техногенные шумы в УНЧ и СНЧ диапазонах [35]. Следует отметить тесное сотрудничество института с НАНЦ, благодаря поддержке которого реализовано большинство инициатив РИ НАНУ. Расширение научной проблематики отдела стимулировало изменение его названия, в 2004 году он был переименован в “Отдел радиофизики геокосмоса”.

Участие в антарктической тематике позволило проводить радиофизические исследования не только на шестом континенте, но и в морских экспедициях. По ходу движения экспедиционного судна из Севастополя в Антарктику было осуществлено двухпозиционное дистанционное зондирование морской поверхности, роль сигналов ионосферной “подсветки” выполняли не специальные передатчики, а широкоэмиттерные станции КВ диапазона, находящиеся на большом удалении от диагностируемых акваторий. Тонкий спектральный анализ КВ сигналов, отраженных от ионосферы, обнаружил вблизи несущей частоты береговые спектральные составляющие, обусловленные рассеянием сигнала “подсветки” взволнованной морской поверхностью [36]. Натурные эксперименты стимулировали разработку теоретической модели рассеяния [37], что в свою очередь дало возможность предложить новый метод дистанционного зондирования состояния мирового океана [38].

Высокая чувствительность КВ приемных устройств и низкий уровень шумов в Антарктике позволили исследовать эффекты сверхдальнего распространения декаметровых сигналов, включая кругосветные радиолонии. Впервые был обнаружен доплеровский сдвиг частоты прямого и кругосветного сиг-

налов и предложена модель, интерпретирующая этот эффект [39]. Измерения на сверхдальних радиолониях, выполненные совместно с российскими коллегами из Института солнечно-земной физики СО РАН (г. Иркутск), позволили диагностировать эффекты солнечного затмения над Антарктидой и восстановить глобальные изменения в ионосфере во время этого геофизического события [40]. В Антарктиде, наряду с природными ионосферными возмущениями, впервые удалось зарегистрировать эффекты рассеяния КВ сигналов искусственными плазменными неоднородностями, создаваемыми мощными НС, расположенными в Северном Приполярье. Одновременные регистрации излучения НС EISCAT (Тромсё, Норвегия) в Санкт-Петербурге (АА НИИ, Россия), в Радиоастрономической обсерватории (РИ НАНУ, Харьков, Украина) и в Антарктиде на УАС показали высокую корреляцию поведения интенсивностей и доплеровских спектров сигналов в периоды существования ИИТ. Это позволило предположить, что формирование сигнала НС на всех трех сильно отличающихся радиолониях обусловлено новым эффектом “саморассеяния” мощного радиоизлучения на им же созданных плазменных неоднородностях [41]. Эта гипотеза была подтверждена в ходе другой специальной нагревной кампании с использованием НС “Сура” (Нижний Новгород, Россия), и эффект “саморассеяния” получил международное признание [42]. Планируется в дальнейшем его использование для “самодиагностики” ИИТ без привлечения дополнительных пробных передатчиков.

Важной особенностью расположения УАС является ее магнитное сопряжение с одним из наиболее промышленно развитых регионов земного шара – Северо-Восточным побережьем США. По нашей инициативе коллеги из США организовали магнитометрические измерения вблизи г. Бостона, во многом аналогичные тем, что ведутся на УАС. Это дало возможность осуществить согласованные исследования магнитосферного резонатора и разработать

методику восстановления поперечных проводимостей ионосферы в обоих полушариях. Поляризационный анализ резонансных геомагнитных пульсаций выявил две характерные ранее не известные особенности их суточного поведения. В первом случае эллипс поляризации “отслеживал” движение Солнца по небесной сфере подобно головке подсолнуха – “эффект подсолнуха” [43]. Во втором – позиционный угол симметрично изменялся вблизи местного полудня – “эффект арки” [44]. Оригинальная теоретическая модель, разработанная в отделе, позволила идентифицировать источники возбуждения магнитосферного резонатора и восстановить суточные вариации поперечных проводимостей ионосферы [45].

Еще одна отличительная черта местоположения УАС состоит в непосредственном соседстве с одним из наиболее активных метеорологических регионов Земли – проливом Дрейка. Она находится на тихоокеанском побережье Антарктического полуострова. Многолетние метеонаблюдения показали, что в среднем за год над станцией проходит 50–60 мощных атмосферных фронтов, преимущественно циклонической природы. Нами было высказано предположение, что их прохождение должно сопровождаться возбуждением крупномасштабных атмосферных гравитационных волн (АГВ), которые могут распространяться на ионосферные высоты и приводить к модуляции электродинамических параметров динамо-области. Это в свою очередь должно стимулировать вариации магнитного поля на самой УАС и в магнитосопреженном регионе северного полушария [46]. Экспериментальная проверка этой гипотезы была проведена по семилетнему массиву данных одновременных регистраций вариаций давления и магнитного поля. Кросс-корреляционный анализ показал, что спустя 30–40 мин после прохождения циклонического фронта над станцией и возбуждения квазипериодических вариаций приземного давления АГВ были зарегистрированы вариации магнитного поля в обоих полушариях с такими же временными периодами.

Можно с уверенностью говорить о переносе атмосферных возмущений на высоты геокосмоса и связи двух погодных систем – “атмосферной” и “космической” [47]. Мощные возмущения в приземной атмосфере вызывают повышенную турбулизацию ионосферной плазмы на высотах главного максимума ионизации, приводя к образованию так называемого эффекта F-рассеяния. Совместный анализ семилетнего массива ионосферных, магнитных и метеорологических данных, полученных на УАС, позволил установить причины развития плазменной турбулентности в верхней ионосфере [48].

Антарктида является идеальным местом для наблюдения глобальной грозовой активности в СНЧ диапазоне, которая формируется преимущественно тремя приэкваториальными мировыми грозowymi центрами, расположенными в Юго-Восточной Азии, Африке и Латинской Америке. На УАС организован непрерывный поляризационный мониторинг полей шумановского резонатора, позволяющий отслеживать интенсивность “работы” грозowych центров и определять местоположение сверхмощных грозowych разрядов. Для интерпретации данных наблюдений разработана оригинальная аналитическая модель шумановского резонатора, приближенно учитывающая анизотропные свойства ионосферной границы резонатора [49]. Учет анизотропии, в частности, приводит к кажущемуся смещению источника излучения в этом диапазоне. Наблюдения грозовой активности проводятся в тесном сотрудничестве с японскими коллегами, которые имеют аналогичные установки на своей антарктической станции “Сёва” и в Японии. Такая кооперация позволила осуществить трехпунктовую поляризационную локацию сверхмощных молниевых разрядов, получить их пространственно-временное распределение по земному шару. Сопоставление восстановленных в СНЧ диапазоне координат сверхмощных молний с синхронным оптическим спутниковым мониторингом грозowych очагов показало хорошее соответствие [50]. Многолетние (с 2001 г.) непрерывные наблюдения поляризационных ха-

рактистик трех первых ШР позволили проследить сезонные и годовые тенденции в поведении глобальной грозовой активности, в частности, восстановить поведение средних интенсивностей в каждом из трех мировых грозовых центров [51]. Широкополосные систематические СНЧ измерения в Антарктиде дают возможность исследовать “паразитные” излучения линий электропередач в северном полушарии. На станции уверенно наблюдаются сигналы на частоте 60 Гц, излучаемые энергосистемами США, отчетливо регистрируются суточные, недельные (“уикенд” эффект) и сезонные вариации мощности энергопотребления. По данным этих измерений была восстановлена динамика крупной аварии системы электроснабжения на северо-востоке США в августе 2003 г. [52].

Активные и успешные работы отдела и РИ НАНУ в Антарктике были замечены на академическом уровне. В 2002 г. состоялась презентация результатов исследований на заседании Бюро Отделения физики и астрономии, которое рекомендовало их представление на Президиуме НАН Украины. Доклад в Президиуме прошел успешно, вызвав неподдельный интерес у президента НАНУ Б. Е. Патона и многих присутствовавших академиков. В очередной раз исследования, проводимые в отделе и в институте, были позитивно оценены на высшем академическом уровне специальным постановлением Президиума. За РИ НАНУ была закреплена роль головной организации по проблеме антарктических исследований физики верхней ионосферы и ближнего космоса, была поддержана инициатива института и НАНЦ по созданию совместной учебно-тренировочной базы для подготовки зимовщиков. За годы участия в антарктических исследованиях отделом опубликовано более 30 научных статей и монография “Электромагнитные проявления геофизических эффектов в Антарктике” под редакцией Л. Н. Литвиненко и Ю. М. Ямпольского [53], представлено около 60 докладов на различных конференциях, защищена одна кандидатская диссертация.

Готовясь к Международному полярному году 2007/8, отдел инициировал ряд антарктических проектов, которые нашли поддержку коллег из разных стран. В частности, предполагается разместить сеть мобильных автоматических метео-магнитных станций вблизи Антарктического полуострова для изучения пространственно-временной структуры атмосферных фронтов и стимулированных ими магнитных возмущений. Совместно со Стенфордским университетом (США) планируется создать СДВ интерферометр (Американская антарктическая станция “Палмер” – УАС “Академик Вернадский”), который позволит исследовать эффекты магнитосферного распространения “свистов” и стимулированных ими высыпаний частиц из радиационных поясов Земли.

Все годы своего существования отдел активно работал в интересах НКАУ. В середине 90-х под руководством РИ НАНУ были разработаны научные концепция и программа спутникового проекта “Предупреждения”, направленного на поиск сейсмо-ионосферных предвестников землетрясений. В рамках проекта была предложена система подспутникового ионосферного зондирования, один из элементов которой реализован сегодня на УАС “Академик Вернадский”. Отдел принял активное участие в обобщении научных предложений по исследованию геокосмоса с борта МКС, было проанализировано свыше пятидесяти научных проектов от различных организаций Украины и разработана концепция по созданию исследовательской лаборатории на борту МКС. Совместно с ИКИ РАН и ЛЦ ИКИ НАНУ-НКАУ отдел принимает участие в реализации уникального космического проекта “Резонанс”, в ходе которого по нашему предложению предполагается на высокоорбитальной спутниковой группировке в геокосмосе создать интерферометр МГД волн. В 2004 г. по заданию НКАУ институт и отдел выступили в роли головной организации по выработке научно-организационных предложений

по созданию Национальной программы “Космическая погода”. Эти предложения получили высокую оценку, и в настоящее время НКАУ предпринимает конкретные шаги по их реализации.

За годы своего существования отдел радиофизики геокосмоса инициировал множество международных научных проектов и программ, часть из которых была реализована в рамках двух ISF и трех NSF (США) грантов, трех регулярных и одного партнерского проекта УНТЦ, трех прямых договоров с исследовательскими организациями США и Канады; украинско-российского договора по линии МОН Украины. В настоящее время в отделе выполняется INTAS проект в содружестве с девятью группами из шести европейских стран. Многие сотрудники отдела командировались в ведущие исследовательские лаборатории, университеты и научные центры США, Великобритании, Германии, Швеции, Австрии, Канады, Австралии, Норвегии, Венгрии и др. Некоторые из них в настоящее время стажировались и работают в этих странах.

Подводя итог этого обзора, посвященного двадцатилетию создания РИ НАНУ, можно констатировать, что, несмотря на трудности с финансированием науки в Украине в целом, в институте и в отделе, в частности, радиофизические исследования геокосмоса поддерживаются на достаточно высоком современном уровне, признаны международным научным сообществом и имеют хорошие перспективы. С удовлетворением следует отметить, что большинство научных инициатив и идей, родившихся в отделе, поддерживались бессменным директором Отделения радиоастрономии, а затем Института академиком Л. Н. Литвиненко. Ряд научных проектов и программ выполнялись под его руководством и при непосредственном участии. Многие оригинальные результаты, полученные в отделе, неоднократно цитировались в ежегодных отчетах Национальной академии наук. Таким образом, можно утверждать, что сотрудники отдела вносят свою лепту в дело поддержания высокого реноме РИ НАН Украины в научном мире.

Литература

1. Блюх П. В., Брюховецкий А. С. Фокусировка радиоволн искусственно созданной ионосферной линзой // Геомагнетизм и аэронавигация. – 1969. – Т. 9, №3. – С. 545-549.
2. Блюх П. В., Николаенко А. П., Филиппов Ю. Ф. Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля–ионосфера. – Киев: Наукова думка, 1977. – 199 с.
3. Безродный В. Г., Блюх П. В., Шубова Р. С., Ямпольский Ю. М. Флуктуации сверхдлинных радиоволн в волноводе Земля–ионосфера. – М.: Наука, 1984. – 234 с.
4. Блюх П. В., Минаков А. А. Гравитационные линзы. – Киев: Наукова думка, 1989. – 240 с.
5. Bliokh P. V., Sinitin V. G., Yaroshenko V. V. Dusty and self-gravitational plasmas in space. – Cluver Academic Publ., 1995. – 256 p.
6. Брауде С. Я., Мень А. В., Содин Л. Г. Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УТР-2. В сб. Антенны. – М.: Связь. – 1978. – Вып. 26. – С. 12-35.
7. Блюх П. В., Галушко В. Г., Ямпольский Ю. М. О восстановлении профиля электронной концентрации F-области ионосферы по измерениям поля КВ сигналов вблизи каустики. В сб. “Распространение радиоволн в ионосфере”. – М.: ИЗМИРАН. – 1983. – С. 34-37.
8. Блюх П. В., Галушко В. Г., Ямпольский Ю. М. Определение параметров параболической модели ионосферы по измерениям КВ сигналов вблизи каустики. В сб. “Проблемы дифракции и распространения волн”. – Л.: Изд. ЛГУ. – 1986. – С. 46-53.
9. Блюх П. В., Галушко В. Г., Минаков А. А., Ямпольский Ю. М. Флуктуации интерференционной структуры поля вблизи границы мертвой зоны // Известия вузов. Радиофизика. – 1988. – №6. – С. 475-483.
10. Аютин А. П., Галушко В. Г., Ямпольский Ю. М. О возможности определения поглощения в отклоняющей области ионосферы по измерению поля вблизи границы мертвой зоны // Известия вузов. Радиофизика. – 1985. – №2. – С. 134-139.
11. Аютин А. П., Галушко В. Г., Порохов. И. В., Ямпольский Ю. М. О восстановлении модельного профиля электронной концентрации F-слоя ионосферы по огибающей прикаустического поля // Геомагнетизм и аэронавигация. – 1990. – №1. – С. 23-29.
12. Galushko V. G., Yampolski Yu. M. Ionospheric diagnostics using wave field diffraction near the

- caustic // *Radio Science*. – 1996. – Vol. 31, No. 5. – P.1109-1118.
13. Галушко В. Г., Соколов К. П., Ямпольский Ю. М. Наблюдаемость дискретных космических источников и условия распространения КВ // В сб. Распространение радиоволн в ионосфере – М.: ИЗМИРАН. – 1983. – С.131-135.
 14. Белей В. С., Галушко В. Г., Ямпольский Ю. М. Об одном способе определения формы отражающей поверхности // *Известия вузов. Радиофизика*. – 1986. – №3. – С. 212-216.
 15. Beley V. S., Galushko V. G., Yampolski Yu. M. Traveling Ionospheric Disturbance Diagnostics Using HF Signal Trajectory Parameter Variations // *Radio Science*. – 1995. – Vol. 30, No. 6. – P. 1739-1752.
 16. Галушко В. Г. О возможности частотно-углового зондирования ионосферы // *Известия вузов. Радиофизика*. – 1991. – Т. 34, №7. – С. 850-853.
 17. Галушко В. Г., Егорова В. Н., Кольцов В. В., Литвиненко Г. В., Пикулик И. И., Ямпольский Ю. М. Восстановление профиля электронной концентрации ионосферы по данным частотно-углового зондирования: Препр. / РИ АН Украины; № 59. – Харьков: 1992. – 20 с.
 18. Galushko V. G., Paznukhov V. V., Yampolski Y. M. and Foster J. C. Incoherent scatter radar observations of AGV/TID events generated by the moving solar terminator // *Ann. Geophysicae*. – 1998. – Vol. 16, No. 23. – P. 821- 827.
 19. Galushko V. G., Beley V. S., Koloskov A. V., Yampolski Yu. M., Reinisch B. W., Paznukhov V. V., Foster J. C. and Erickson P. J. Frequency-and-Angular HF Sounding and VHF ISR Diagnostics of TIDs // *Radio Science*. – 2003. – Vol. 38, No. 6. – P. 1102-1115.
 20. Пикулик И. И., Кашеев С. Б., Галушко В. Г., Ямпольский Ю. М. Приемный КВ комплекс для частотно-углового зондирования ионосферных возмущений в Антарктиде // *Украинский антарктический журнал*. – 2003. – №1. – С. 61-69.
 21. Галушко В. Г., Литвиненко Г. В. Восстановление трехмерно-неоднородной структуры электронной концентрации ионосферы методом частотно-углового зондирования // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2001. – Т. 6, №3. – С. 222-229.
 22. Безродный В. Г., Пономаренко П. В., Ямпольский Ю. М. Рассеяние декаметровых радиоволн ионосферными неоднородностями на частотах выше МПЧ // *Ионосферные исследования*. – 1989. – С. 111-125.
 23. Bezrodny V. G., Ponomarenko P. V., Yampolski Y. M. Application of Polarimetric sounding to HF ionospheric remote sensing // *Radio Science*. – 1997. – Vol. 32, No. 1. – P. 219-229.
 24. Беленов А. Ф., Пономаренко П. В., Синицын В. Г., Ямпольский Ю. М. О природе квазипериодических вариаций доплеровского смещения частоты КВ радиосигналов, рассеянных областью ИИТ // *Известия вузов. Радиофизика*. – 1992. – №3. – С. 234-243.
 25. Yampolski Yu. M., Beley V. S., Kascheev S. B., Koloskov A. V., Somov V. G., Hysell D. L., Isham B. and Kelley M. C. Bistatic HF radar diagnostics induced field-aligned irregularities // *J. Geophys. Res.* – 1997. – Vol. 102, No. A4. – P. 7461-7467.
 26. Ямпольский Ю. М. Эхо-рассеяние КВ сигналов на искусственной ионосферной турбулентности // *Известия вузов. Радиофизика*. – 1989. – №6. – С. 457-461.
 27. Belenov A. F., Erukhimov, Ponomarenko P. V., and Yampolski Yu. M. Interaction between artificial Ionospheric turbulence and geomagnetic pulsations // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* – 1997. – Vol. 59, No. 18. – P. 2367-2372.
 28. Sinitsin V. G., Kelley M. C., Yampolski Yu. M., Hysell B., Isham D. L., Zalozovski A. V., and Ponomarenko P. V. Ionospheric conductivities according to Doppler radar observations of stimulated turbulence // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* – 1997. – Vol. 61, No. 11. – P. 903-912.
 29. Ponomarenko P. V., Zalozovski A. V., Yampolski Yu. M., Hysell D. L. Interaction between artificial ionospheric irregularities and natural MHD waves // *J. Geophys. Res.* – 2000. – Vol. 105, No. A1, January 1. – P. 171-181.
 30. Koloskov A. V., Leiser T. B., Yampolski Yu. M., and Beley V. S. HF pump – induced scale radial drift of small scale magnetic field-aligned density striation // *J. Geophys. Res.* – 2002. – Vol. 107, No. A7. – P. 1726-1735.
 31. Hysell D. L., Kelley M. S., Yampolski Yu. M., Beley V. S., Koloskov A. V., Ponomarenko P. V., and Tyrnov O. F. HF Radar observations of decaying artificial field-aligned irregularities // *J. Geophys. Res.* – 1996. – Vol. 101, No. A12. – P. 1654-1668.
 32. Yampolski Yu. M., Bliokh P. V., Beley V. S., Galushko V. G., and Kascheev S. B. Non-Linear Interaction between Schumann Resonances and HF Signals // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* – 1997. – Vol. 59, No. 3. – P. 335-342.
 33. Yampolski Y. M., Beley V. S., Kascheev S. B., Lazebny B. V., Paznukhov V. E., Rokhman A. G. Cross – mode modulation effect in Schumann resonances // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* – 1999. – Vol. 61, No. 6. – P. 693-699.
 34. Hysell D. L., Kelley M. C., Gurevich A. V., Karash-tin A. N., Babichenko A. M., Yampolski Y. M.,

- Beley V. S., and Providakes J. F. HF radar probing of the lower magnetosphere // *J. Geophys. Res.* – 1997. – Vol. 102, No. A3. – P. 4865-4873.
35. Корепанов В., Литвиненко Л., Литвинов В., Міліневський Г., Ямпольський Ю. Электромагнітний полігон наземної підтримки супутникових експериментів на українській антарктичній станції // *Космічна наука і технологія.* – 2004. – Т. 10, №2/3. – С. 74-80.
36. Кащеев С. Б., Ямпольский Ю. М., Зализовский А. В. Двухпозиционное зондирование взволнованной морской поверхности сигналами КВ широкоэвещательных станций // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2001. – Т. 6, №2. – С. 79-88.
37. Брюховецкий А. С., Кащеев А. С., Кащеев С. Б., Ямпольский Ю. М. Двухпозиционное рассеяние взволнованной морской поверхностью. I. Теория // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2003. – Т. 8, №3. – С. 235-241.
38. Кащеев А. С., Кащеев С. Б., Ямпольский Ю. М., Колосков А. В., Пикулик И. И., Брюховецкий А. С. Двухпозиционное рассеяние взволнованной морской поверхностью. II. Эксперимент // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2003. – Т. 8, №3. – С. 242-252.
39. Зализовский А. В., Галушко В. Г., Кащеев А. С., Ямпольский Ю. М., Егоров И. Б., Попов А. В. Доплеровская селекция путей распространения КВ радиосигнала на сверхдальней трассе // В сб.: *Распространение радиоволн, 21-я Всеросс. научная конференция.* Т. 2. – РАН, МОН РФ, Йошкар-Ола. – 2005. – С. 68-72.
40. Kascheev S. B., Kascheev A. S., Kurkin V. I., Yampolski Yu. M., Zalizovsky A. V. Effects of very long-range HF propagation along the Irkutsk-“Akademik Vernadsky” link. Abstracts // *Second Ukrainian Antarctic Meeting.* – Kiev. – 2004. – С.73.
41. Зализовский А. В., Кащеев С. Б., Ямпольский Ю. М., Галушко В. Г., Белей В. С., Айшем Б., Ритвелд М., Ла Хоз С., Брекке А., Благовещенская Н. Ф., Корниенко В. А. Спектральные особенности КВ сигнала нагревного стенда EISCAT в Европе и Антарктике // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2004. – Т. 9, №3. – С. 261-273.
42. Yampolski Yu. M., Zalizovski A. V., Galushko V. G., Koloskov A. V., Kascheev S. B. Self scattering effect of powerful HF radiation as observed in europe and antarctica // *RF Ionospheric Interactions Workshop. Book of Abstracts.* – Santa Fe. – 2005. – P. 78-81.
43. Зализовский А. В., Ямпольский Ю. М., Корепанов В. Е., Доценко И. Ф. Поляризационные исследования пульсаций Pс3, Pс4 на антарктической станции “Академик Вернадский” (“эффект подсолнуха”) // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2001. – Т. 5, №2. – С. 118-124.
44. Зализовский А. В., Сеницын В. Г., Ямпольский Ю. М. Поляризация геомагнитных пульсаций Pс3/Pс4 в Северном и Южном полушариях: экспериментальные данные и численное моделирование // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2001. – Т. 6, №4. – С.302-309.
45. Sinitin V. G., Yampolski Y. M., Zalizovski A. V., Groves K. M., Moldwin M. B. Spatial field structure and polarization of geomagnetic pulsations in conjugate areas // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* – 2003, No. 65. – P. 1161-1167.
46. Yampolski Yu., Korepanov V. Antarctic peninsula troposphere-stratosphere-ionosphere coupling and conjugate events investigation // *Workshop for Planning the SCAR Scientific Program, ICESTAR: April 22-23. Book of Abstracts.* – Nice, (France). – 2004. – P. 43-45.
47. Ямпольский Ю. М., Зализовский А. В., Литвиненко Л. Н., Лизунов Г. В., Гровс К., Молдвин М. Вариации магнитного поля в Антарктике и сопряженном регионе (Новая Англия), стимулированные циклонической активностью // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2004. – Т. 9, №2. – С.130-151.
48. Силин П. В., Зализовский А. В., Ямпольский Ю.М. Эффекты ионосферного F-рассеяния на антарктической станции “Академик Вернадский” // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2005. – Т. 10, № 1. – С.30-37.
49. Безродный В. Г. Асимптотическая теория полей шумановских резонансов в гиротропной полости Земля-ионосфера // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2004. – Т. 9, №4. – С. 375-390.
50. Колосков А. В., Буданов О. В., Безродный В. Г., Ямпольский Ю. М. Определение местоположений сверхмощных молниевых разрядов на основе поляризационных магнитных измерений в диапазоне шумановских резонансов // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2004. – Т. 9, №4. – С. 391-403.
51. Колосков А. В., Безродный В. Г., Буданов О. В., Пазнухов В. Е., Ямпольский Ю. М. Поляризационный мониторинг шумановских резонансов в Антарктике и восстановление характеристик мировой грозовой активности // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2005. – Т. 10, №1. – С. 11-29.
52. Безродный В. Г., Буданов О. В., Колосков А. В., Ямпольский Ю. М. Электромагнитное окружение Земли в СНЧ – диапазоне // *Космічна наука і технологія.* – 2003. – Т. 9, №5/6. – С. 117-123.
53. Электромагнитные проявления геофизических эффектов в Антарктике / Под ред. Л. Н. Литвиненко, Ю. М. Ямпольского. – Харьков: РИ НАНУ; НАНЦ МОНУ, 2005. – 342 с.

**Радіофізичні дослідження геокосмосу
в РІ НАН України**

Ю. М. Ямпольський

У статті надається короткий історичний огляд розвитку радіофізичних досліджень геокосмосу в Радіоастрономічному інституті НАН України. Перелічені основні наукові результати, отримані впродовж останніх двадцяти років, та надається детальна бібліографія за цією тематикою.

**Radio Science of the Geospace: Research
at the Institute of Radio Astronomy,
NAS-Ukraine**

Yu. M. Yampolski

A brief history of the research activity at the Institute of Radio Astronomy NAS-Ukraine in the field of radiophysical geospace exploration is suggested. The principal results obtained over the last two decades and a detailed bibliography are listed.