

Исследования окружающей среды радиофизическими методами. История создания и становление направления «Радиофизические спутниковые исследования Земли»

М.Д. Раев, Е.А. Шарков

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: mraev@asp.iki.rssi.ru; e.sharkov@mail.ru*

Статья посвящена истории возникновения и эволюции отдела «Исследование Земли из космоса» (ИЗК) ИКИ РАН. В ней упоминаются сотрудники отдела, стоявшие у истоков создания и становления направления «Радиофизические спутниковые исследования Земли» не только в нашей стране, но и в мировой практике микроволнового зондирования. Кратко описаны события, обозначившие основные этапы развития отдела. Первые самолетные, а затем и спутниковые эксперименты по мультиспектрному микроволновому пассивному и активному зондированию земной поверхности и атмосферы планеты с высокочувствительной аппаратурой, созданной непосредственно в отделе, позволили получить целый спектр уникальных научных результатов. Эти результаты стали основой формирования целых направлений в изучении состояния морской поверхности, ледовых покровов в полярных зонах планеты, эволюции атмосферных катастроф и др. Кроме того, полученные материалы и развитые технологии позволили обеспечить решение ряда отраслевых и прикладных задач.

Ключевые слова: исследование Земли из космоса, микроволновое пассивное зондирование, радиолокатор с синтезированной апертурой, морская поверхность, внутренние волны, антропогенные и биогенные загрязнения, атмосферные катастрофы, климат планеты, лазерная плазма

Создание отдела «Исследование Земли из космоса» (современное наименование) и первые двадцать восемь лет его существования неразрывно связаны с именем крупного отечественного ученого доктора физико-математических наук, профессора Валентина Семеновича Эткина (1931–1995). Валентин Семенович основал в ИКИ АН СССР новое научное направление – аэрокосмическое зондирование поверхности и атмосферы Земли дистанционными радиофизическими методами. В ходе становления этого направления происходили изменения как по количеству участников работ, по составу научных групп и лабораторий, так и по названию отдела. Неизменным оставалось только одно – физическая суть нового научного направления. Многие сотрудники Валентина Семеновича продолжают и сейчас работать в ИКИ РАН в составе других подразделений, в том числе в составе отделов «Прикладной космической миллиметровой и субмиллиметровой астрономии» (до 2013 г.) и отдела «Космогеофизики».



Валентин Семенович Эткин
(1931–1995)

Основал в ИКИ АН СССР новое научное направление – аэрокосмическое зондирование поверхности и атмосферы Земли дистанционными радиофизическими методами.

В 1960-х гг. в рамках Проблемной радиофизической лаборатории (ПРФЛ) Московского государственного педагогического института (МГПИ) Эткин В.С. и его сотрудники проводили исследования по важному тогда научному направлению – разработка теоретических основ и создание малошумящих приемников сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона. Разработанные в ПРФЛ СВЧ-устройства – параметрические и туннельные усилители,

малолшумящие смесители и др. – позволили создать высокочувствительную измерительную аппаратуру, обладавшую рекордными в то время параметрами. Такая аппаратура была незаменима для использования в радиолокации и в радиоастрономии, в частности для проведения внеатмосферных (спутниковых) радиоастрономических наблюдений. Выдающиеся достижения Эткина В.С. и ряда его коллег из других организаций по разработке теоретических основ и по созданию параметрических СВЧ приемников впоследствии (в 1983 г.) были отмечены Государственной премией СССР.

Результаты, полученные Эткиным В.С. и его коллективом из ПРФЛ, вызвали большой интерес у ведущих советских астрофизиков и радиоастрономов, в частности, у сотрудников Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга (ГАИШ). В 1967 г., понимая важность создания малолшумящих приемников для развития радиоастрономии, Шкловский И.С. предложил Эткину В.С. продолжить его исследования в рамках недавно созданного Института космических исследований. Валентин Семенович принял это предложение и перевел часть своих сотрудников из ПРФЛ в ИКИ, сформировав самостоятельное научное подразделение – отдел «Радиофизических приборов». Задачей вновь созданного отдела было дальнейшее совершенствование высокочувствительных СВЧ-радиометров в широком диапазоне волн – от миллиметрового до дециметрового. Одним из научных направлений отдела стали первые шаги по разработке радиофизических дистанционных методов исследования поверхности Земли и других планет (кандидат физико-математических наук Крупенин Н.Н., доктор физико-математических наук профессор Шарков Е.А.).

Однако научные интересы Эткина В.С. не ограничивались созданием одних только приборов, хотя и уникальных по принципу действия и по параметрам. По мере совершенствования микроволновых приемников становилось ясно, что созданные коллективом Эткина В.С. высокочувствительные радиометры можно использовать не только для решения задач радиоастрономии, но и для детального исследования радиофизическими методами поверхности суши и океана из космоса. Это научное направление работ было поддержано Шкловским И.С. и новым руководством института во главе с академиком Сагдеевым Р.З.

В 1974 г. было принято решение о создании самостоятельного отдела «Прикладной космической физики» под руководством Эткина В.С. Основная задача отдела состояла в развитии микроволновых методов дистанционного аэрокосмического зондирования суши и океана в микроволновом диапазоне для решения прикладных задач и для фундаментальных исследований в интересах наук о Земле. Три лаборатории, вошедшие в отдел, возглавлялись Эткиным В.С., Смирновым Н.К. и Андрияновым В.В. Лаборатория Струкова И.А. осталась в составе радиоастрономического отдела и впоследствии выделилась в отдел «Прикладной космической миллиметровой и субмиллиметровой астрономии» (до 2014 г.).

Приоритетной задачей отдела стало изучение поверхности океана с целью выявления внутриокеанических процессов по их поверхностным проявлениям. Исследования океана потребовали создания уникальных комплексов аппаратуры дистанционного зондирования в оптическом и микроволновом диапазонах, специально предназначенных для использования на борту самолетов и научно-исследовательских судов. Такие комплексы нуждались также

в автоматизированных (в дальнейшем – компьютеризованных) системах регистрации, обработки и интерпретации огромных массивов экспериментальных данных.

Широкая программа фундаментальных и прикладных исследований, развернутая впервые в рамках АН СССР, предусматривала проведение ежегодных натурных экспериментов в различных районах Мирового океана – от Черного и Баренцева морей до Тихого океана – с одновременным оснащением принципиально новой аппаратурой самолетов-лабораторий, спутников и научно-исследовательских судов. Экспериментальные исследования сопровождались теоретическими, направленными, прежде всего, на создание радиофизических и гидрофизических моделей наблюдаемых в океане явлений. Все это требовало колоссальных усилий от коллектива отдела и прежде всего – от его руководителя Эткина В.С.

Широкомасштабные работы по дистанционному исследованию земных покровов развернулись к середине семидесятых годов прошлого века. Основное внимание уделялось исследованию поверхности океана в интересах экологического мониторинга, прогноза погоды и прикладных задач. Работы большей частью были ориентированы на комплексные аэрокосмические эксперименты. Сложность проведения натурных экспериментов требовала огромных усилий по предварительному планированию эксперимента. Для координации действий большого числа организаций – участников натурных испытаний, согласования действия морских, воздушных объектов и обеспечения синхронных космических съемок в отделе была создана отдельная группа во главе с Беспаловой Е.А. Слаженность действий всех участников достигалась благодаря тщательной подготовке и огромной организационной работе начальников экспедиций – Веселова В.М., Ленкова В.Д., Кулешова В.В. Так, в комплексных летно-морских натурных экспериментах 1979–1980 гг. одновременно принимало участие более тридцати организаций, было задействовано семь самолетов-лабораторий, оснащенных многоканальными поляризационными радиометрами, радиолокаторами и оптическими системами, восемь единиц средств обеспечения (научно-исследовательские суда – Тихоокеанский океанологический институт Дальневосточного научного центра Академии наук (ТОИ ДВЦ АН) и корабли военно-морского флота (ВМФ)). Радиотепловая аппаратура космической станции «Салют-6» космический радиотелескоп КРТ-10 (1979) обеспечивала синхронную микроволновую съемку района работ. Одновременно в экспедиции участвовало более 160 человек, не считая личного состава средств обеспечения.

Каждый год проводились испытания новых приборов, характеристики которых постоянно улучшались. Радиометры, радиометры-поляриметры, скаттерометры изготавливались не только в ИКИ и в ПРФЛ МГПИ, но и в специально созданном по инициативе заместителя директора доктора физико-математических наук Нариманова Г.С. и Эткина В.С. конструкторском бюро в городе Мирном. Работы ИКИ намного опережали аналогичные исследования, проводившиеся в США.

Первый этап (1974–1982) организации и проведения таких крупномасштабных летно-морских экспедиционных работ, которые выполнялись впервые в истории АН СССР, потребовали огромного количества научно-технических и административно-организационных мероприятий, выполненных специалистами различных специальностей (радиофизика,

оптика, метеорология, география, обработка данных, электроника). Первые комплексные полеты были выполнены (1975–1978) на самолете-лаборатории Ил-18 совместно с Главной геофизической обсерватории (ГГО) им. А.И. Воейкова (Ленинград) с высокочувствительным радиотепловым комплексом, включающим двухполяризационный радиометр Р-2 на длине волны 2 см (МГПИ), радиометр Р-0,8 на длине волны 0,8 см и радиометр Р-18 на длине волны 18 см (ИКИ АН СССР), для радиолокационной съемки морской поверхности был впервые привлечен самолет ледовой разведки Ан-24 с радиолокатором бокового обзора «Торос».

К несомненным достижениям отдела за этот период следует отнести получение впервые в мировой дистанционной практике целого спектра научных наблюдательных результатов, которые впоследствии стали фундаментальной основой для широкомасштабных дистанционных исследований, предпринятых как в отечественных, так и зарубежных научных организациях. К этим результатам относятся:

- обнаружение в 1976–1977 гг. детерминированного эффекта поляризационной анизотропии в поле радиотеплового излучения взволнованной морской поверхности (Беспалова и др., 1979);
- обнаружение в 1976–1977 гг. и исследование эволюции катастрофических нефтяных разливов на морской поверхности в акватории Каспийского моря на нефтепромысле Нефтяные камни (Беспалова и др., 1983);
- обнаружение (1975) и исследование состояния первичных эластичных ледовых форм, а также эволюции фронта замерзания, его пространственно-временной динамики в северной части акватории Каспийского моря (Беспалова Е.А., Шарков Е.А.);
- впервые в мировой практике был выполнен крупномасштабный мониторинг и детальное исследование пространственно-временной структуры влажности степных почв (Караганда, 1975 г.) (Шарков, 2014).

Следует отметить, принципиальная важность эффекта поляризационной анизотропии была осознана в ведущих лабораториях мира (Jet Propulsion Laboratory NASA, Environmental Research Laboratory NOAA, лаборатории ESA) лишь спустя двадцать лет, и эффект был переоткрыт американскими исследователями лишь в 1999 г. Приоритет этих работ коллектива отдела в этой области является общепризнанным.

Опыт, приобретенный при работе на самолете Ил-18, был использован при создании других самолетных лабораторий. В 1977 г. в отделе началось создание двух летающих лабораторий на базе самолетов типа Ил-14. Выбор носителя определялся способностью самолета находиться в воздухе течение 9–10 часов, взлетать и садиться в условиях плохой видимости и базироваться на аэродромах любого класса. К началу 1978 г. два самолета Ил-14 приняли участие в натурных экспериментах.

Один из самолетов-лабораторий был ориентирован преимущественно на проведение исследований атмосферы и морской поверхности методами СВЧ-радиометрии, а другой – волнографических исследований с помощью совместного использования активных приборов: СВЧ-скаттерометров и СВЧ-радиометров. В состав первой лаборатории вхо-

дили зенитный и надирный радиометрический комплексы 8-мм диапазона, а также скаттерометр 3-см диапазона волн. На борту второго самолета-лаборатории был установлен волнографический комплекс, в который входили приборы, разработанные, изготовленные и использованные для задач дистанционного зондирования: радиометр-скаттерометр 2-см диапазона, двухчастотный скаттерометр, многопозиционный радиометр-поляриметр 2-см диапазона.

Накопленный в полетах на Ил-14 опыт позволил создать постоянную самолетную лабораторию Ан-12 (научные руководители Трохимовский Ю.Г. и Кузьмин А.В.), которая давала возможность приступить к планомерным экспериментальным исследованиям с постоянным комплексом микроволновых и ИК-радиометров. Самолет-лаборатория Ан-12 был предназначен для радиометрических и скаттерометрических измерений. Здесь отработывалась методика проведения панорамных и сканирующих измерений, использовался большой набор радиометров-поляриметров, проводились атмосферные измерения.

Все самолетные комплексы были оснащены многоканальными системами сбора и обработки данных с использованием микроЭВМ. Приборы самолетных комплексов разрабатывались в лабораториях отдела, руководимых кандидатами физико-математических наук Булатовым М.Г., Милицким Ю.А., Раевым М.Д. и Хапиным Ю.Б.

Для радиолокационной съемки морской поверхности первоначально привлекались самолеты ледовой разведки Ан-24 и Ан-26 с двухполяризационными радиолокаторами бокового обзора «Нить» и «Торос». Результативность полученных данных привела Эткина В.С. к необходимости разработки комплексной летающей лаборатории, оснащенной как локаторам бокового обзора, так и оптической и радиофизической аппаратурой. Было разработано техническое задание, комплект компоновочных чертежей для КБ Туполева. На основе этого задания была выпущена серия самолетов-лабораторий Ту-134СХ, сочетавших в себе все преимущества самолетов ледовой разведки и специальных самолетов аэрофотосъемки. Впоследствии система регистрации радиолокатора «Нить» была усовершенствована силами отдела: вместо устаревшей фототелеграфной системы была установлена разработанная в отделе цифровая система регистрации, которая превратила радар «Нить» в современный физический прибор. Кроме того, самолет-лаборатория был оснащен многозональными фотокамерами МКФ-6 и МСК-4, обеспечивающими получение высококачественных изображений подстилающей поверхности в различных диапазонах оптического спектра.

География проведения комплексных радиофизических исследований морской поверхности охватывала практически все окраинные и внутренние моря России. Если в первые годы работы проводились в основном на Баренцевом, Каспийском и Черном морях, то затем они переместились на Дальний Восток: сначала в Японское море, а затем на Камчатку. Начиная с 1979 г. Петропавловск-Камчатский стал основным местом проведения экспедиций.

Исследования велись главным образом в северо-западной части Тихого океана, а также в Охотском море и в Курильских проливах. Особенную ценность представляли измерения в открытом океане за пределами Курило-Камчатского желоба. В этих экспериментах были получены уникальные данные. Например, удалось наблюдать поверхност-

ные проявления течений, обтекающих подводную гору, вершина которой находилась на глубине четырех километров под поверхностью океана! Был накоплен обширный архив радиолокационных и оптических изображений шельфовых внутренних волн, границ течений, поверхностных проявлений различных неустойчивостей и волновых процессов в приводном слое атмосферы (Шарков, 2009).

Обработка и систематизация результатов наблюдений потребовала создания и непрерывного совершенствования вычислительной базы отдела. Такая база, включая гибридные аналого-цифровые вычислительные комплексы на основе лазерных фурье-анализаторов и самостоятельных видеоинформационных терминалов, была создана в отделе под руководством научного сотрудника Сулова А.И. Большой объем работ выполнялся и по созданию специализированных программ обработки (кандидат физико-математических наук Раев М.Д.).

Натурные эксперименты сопровождались лабораторными и теоретическими исследованиями особенностей радиотеплового излучения водной поверхности при наличии волнения. На базе анализа материалов экспериментов по изучению поляризационной анизотропии в радиотепловом излучении взволнованной морской поверхности в конце семидесятых Эткиным В.С. была выдвинута гипотеза о том, что в тепловом излучении шероховатой поверхности должны существовать резонансные эффекты при характерных масштабах неровностей, сравнимых с длиной волны электромагнитного излучения. Предположение Эткина В.С. блестяще подтвердилось сначала теоретически, в рамках метода малых возмущений (Ирисов и др., 1987), а затем и в лабораторном эксперименте. Обнаруженные в этих работах так называемые «критические» явления, аналогичные, в сущности, оптическим аномалиям Вуда, дают увеличение радиояркостной температуры на вертикальной поляризации до 3...5 К, что легко обнаруживается современными радиометрами с флуктуационной чувствительностью 0,1 К.

Критические явления позволяют определять как величину, так и направление приповерхностного ветра. Измерения скорости ветра оказалось целесообразным проводить при помощи радиометров-поляриметров. В отделе впервые разработан многопозиционный радиометр-поляриметр (Дзюра М.С.), было изготовлено и испытано несколько таких приборов. Впоследствии теория критических явлений была развита для произвольной ориентации гармоник относительно направления наблюдения и для произвольных значений диэлектрической проницаемости среды. Разработанные позднее численные подходы дали возможность оценить область применимости результатов, основанных на методе малых возмущений. Понимание резонансного характера радиотеплового излучения моря позволило правильно интерпретировать данные самолетных измерений и перейти от радиояркостных контрастов к характеристикам поверхностного волнения. Метод, который естественно называть радиотепловой спектроскопией, активно был развит кандидатом физико-математических наук Трохимовским Ю.Г. и его группой. Этот метод практически не имеет конкурентов в исследованиях спектра волн в гравитационно-капиллярном интервале.

В тоже время в отделе проводились работы по космической гидрографии, заказчиком которых выступало Главное гидрографическое управление ВМФ. Ценность такого

сотрудничества была несомненной. Оно позволяло широко привлекать для подтрассовых контактных измерений средства гидрографического флота в больших масштабах. Эти работы впоследствии породили новое направление исследований – экологический мониторинг Мирового океана.

Теоретические исследования по гидрофизике, необходимые для адекватной интерпретации экспериментальных данных, сначала проводила небольшая группа в составе кандидатов физико-математических наук Суязова Н.В. и Пунгина В.Г. Необходимость усиления теоретической поддержки нового важного направления нашла поддержку у руководства института. В 1981 году в отделе по предложению академика Сагдеева Р.З. был создан теоретический сектор под руководством доктора физико-математических наук Моисеева С.С. Экспериментальный материал, накопленный в экспедициях ИКИ, послужил мощным катализатором многих теоретических разработок, в частности, по теории волн отрицательной энергии и по возникновению когерентных структур в мелкомасштабной турбулентности. Впоследствии эти теоретические разработки были использованы для моделирования и при обработке радиофизических данных при спутниковом зондировании тропических циклонов. После реорганизации ИКИ в 1983 г. коллектив Моисеева С.С., а также ряд сотрудников, занимавшихся обработкой и интерпретацией наблюдательных радиофизических данных, были выделены в самостоятельный отдел «Космогеофизики».

Важным этапом в развитии радиогидрофизических исследований стало использование космического радиолокатора с синтезированной апертурой (длина волны 9,6 см, разрешение 25×25 м), установленного на орбитальных станциях «Космос-1870» («Алмаз-0») и «Алмаз-1». Эткин В.С. приложил немало усилий, чтобы разъяснить уникальность этих аппаратов как широкой научной общественности, так и директивным органам. ИКИ возглавил программу исследования океана с аппарата «Алмаз-1» (программа ОКЕАН-И), которая была успешно выполнена. Анализ радиолокационных изображений, полученных со спутников «Космос-1870» и «Алмаз-1», позволил детально исследовать разнообразные процессы в Мировом океане, в частности, характеристики крупномасштабной (от 50 м) части спектра поверхностного волнения, следы разливов нефтепродуктов, сигнатуры крупных течений. Ценно, что в ряде случаев наблюдения из космоса сопровождались подспутниковыми контактными и самолетными измерениями. Наибольшее же внимание было уделено изучению внутренних волн в различных районах Мирового океана. При помощи космических снимков удалось выявить механизмы генерации внутренних волн под действием как океанических процессов (течения, апвеллинг, приливы), так и процессов в атмосфере.

В начале 1990-х гг. существенной ступенью в жизни отдела стала подготовка и проведение совместного российско-американского эксперимента Joint US/Russia Internal Waves Remote Sensing Experiment (JUSREX'92) по исследованию внутренних волн в океане методами дистанционного зондирования, который проводился у восточного побережья Северной Америки. С российской стороны в эксперименте участвовал самолет-лаборатория Ту-134СХ, научно-исследовательское судно «Академик Иоффе» и космический радиолокатор высокого разрешения (15...30 м) на спутнике «Алмаз-1». Американская сторо-

на предоставила аэродром базирования на базе Испытательного центра на о-ве Уоллопс (Wallops Island Test Center, VA), два самолета-лаборатории DC-8 и P-3 с трехчастотными радиолокатором с синтезированной апертурой (РСА) на борту, спутниковые данные с космического РСА ERS-1.

В целом эксперимент JUSREX'92 прошел очень плодотворно. Он показал, что научные исследования не имеют границ, и есть чему поучиться каждой стороне друг у друга. По итогам эксперимента было написано множество совместных статей, которые были опубликованы в ведущих научных журналах. Одним из главных выводов этого эксперимента заключался в важности развития космических средств наблюдения морской поверхности, особенно с использованием РСА. Это направление исследований в дальнейшем заняло в отделе важное место.

В 1991–1994 гг. в связи с известными политическими трансформациями в стране и резким уменьшением финансирования фундаментальных и экспедиционных исследований, центр тяжести деятельности отдела переместился на исследования окружающей среды. Отдел принимал деятельное участие в международной программе ПРИРОДА, которая привела к созданию одноименного природно-исследовательского модуля в составе космической станции «Мир». Было предложено установить на модуле «Природа» радиометр-поляриметр для измерения скорости ветра над поверхностью океана. Этот новый прибор подтвердил возможность поляризационных радиометрических измерений скорости приводного ветра со спутников и тем самым ликвидировал монополию скаттерометрического метода на такие измерения. По своей точности поляризационный радиометрический метод не уступает скаттерометрическому, тогда как по массово-габаритным, стоимостным и энергетическим характеристикам радиометр-поляриметр имеет заметное (в два-три раза) преимущество перед скаттерометром.

В 1994 г. Эткин В.С. предложил новое название для своего отдела: «Космические исследования Земли как экологической системы». Это название, одобренное ученым советом ИКИ, отразило резкую смену приоритетов в исследованиях в последующие годы, уже после кончины Эткина В.С. в 1995 г.

В 1993 г. Эткин В.С. пригласил в отдел известного радиофизика профессора Юрия Александровича Кравцова, автора 11 монографий по теории волн, по статистической радиофизике и по нелинейным процессам. С Кравцовым Ю.А. его связывали долгие годы неформального сотрудничества по проблемам параметрических усилителей, резонансным механизмам теплового излучения океана («критические явления»), теории ветрово-

го волнения, предсказуемости хаоса. Будучи избранным по предложению Эткина В.С. заведующим отделом (1994), Кравцов Ю.А. продолжил традиции, заложенные основателем отдела.



Юрий Александрович Кравцов

Известный радиофизик, профессор, автор 11 монографий по теории волн, статистической радиофизике и нелинейным процессам.

На рубеже 1990–2000-х гг. в отделе продолжается анализ и интерпретация ценных экспериментальных данных, полученных в предыдущие годы под руководством Эткина В.С. В рамках двух последовательных международных проектов Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF) проводятся исследования нерезонансных механизмов рассеяния электромагнитных волн на мезомасштабной (дециметровой) компоненте волнения и разрабатывается трехмасштабная модель рассеяния с учетом переотражений на крутых обрушивающихся волнах (Кравцов Ю.А.). Проводились исследования по механизмам воздействия атмосферы на характеристики рассеянного и радиотеплового излучения, по влиянию дождей на характеристики теплового излучения океана (Булатов М.Г., Скворцов Е.А.), по рассеянию электромагнитных волн на морской поверхности в присутствии покрывающей ее пленки (Митягина М.И.), продолжаются исследования нелинейных взаимодействий внутренних волн в океане по их поверхностным проявлениям (Лаврова О.Ю). При поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) велись работы по систематизации уникальных экспериментальных данных, накопленных за время проведения натурных экспериментальных работ (с 1973 по 1992 г.), и составление электронного банка данных по поверхностным проявлениям внутренних волн (Раев М.Д.). Стимулирующую роль в этих исследованиях сыграл приход в отдел в 1994 г. на условиях совместительства доктора физико-математических наук Сабина К.Д., видного отечественного океанолога мирового уровня. Совместно с Институтом океанологии (ИО РАН), Институтом радиотехники и электроники (ИРЭ РАН) и Научно-исследовательским центром изучения природных ресурсов (НИЦ ИПР) велась разработка проекта концепции Российской океанологической системы спутников (РОСС) и поиски путей реализации этого проекта. Перспективные предложения ИКИ по микроволновым методам дистанционного зондирования Земли были включены в проект международной космической станции «Альфа». Усилиями Трохимовского Ю.Г. и – в последующее время – Кузьмина А.В. была развита и усовершенствована идея Эткина В.С. о радиометрической спектрометрии волнения на поверхности океана. Речь идет об измерении мелкомасштабной части спектра поверхностного волнения при помощи радиометрических наблюдений океана на разных волнах и под разными углами. В основе радиометрической спектроскопии океана лежит резонансный механизм теплового излучения.

В основе своей отдел всегда был экспериментальным и без эксперимента он жить не мог. За 1990-е гг. накопилось множество идей и проектов, которые требовали своей проверки и воплощения. Экспериментальные работы возобновились летом 1999 года. Но это уже были береговые измерения на Черном море с пирса Южного отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова (ЮО ИО РАН) в Голубой (Рыбацкой) бухте близ Геленджика.

Как и ранее, океан и атмосфера, их взаимосвязь и влияние на климат остаются важнейшей темой, но кроме них сотрудники отдела исследуют снеговые и ледовые покровы, степень человеческого воздействия на окружающую среду. А жизнь – меняющийся климат Земли, все большая антропогенная нагрузка на природу – ставила перед сотрудниками новые интересные задачи.

В 2002 г. отдел возглавил доктор физико-математических наук, профессор Шарков Евгений Александрович – крупный специалист в области наук о Земле и аэрокосмического зондирования.

По его предложению стало развиваться новое для отдела направление работ – дистанционные радиофизические исследования по изучению климатических процессов на



Евгений Александрович Шарков

*Доктор физико-математических наук,
профессор, крупный специалист в области
наук о Земле и аэрокосмического зондирования.*

Земле, а также изучение влияния на взаимодействие океан-атмосфера мультимасштабных атмосферных катастроф при помощи радиофизических спутниковых пассивно-активных методов и средств.

В результате масштабных реконструкций научных подразделений ИКИ РАН в 2002 г. отдел получил новое название – «Исследование Земли из космоса» (ИЗК), и были созданы три новых лаборатории – аэрокосмической радиолокации, климатических исследований и микроволновой радиометрии, а в 2014 г. в отдел влились лаборатория лазерных методов зондирования из отдела «Космогеофизики» и сотрудники самостоятельной лаборатории информационно-методического обеспечения целевых проектов зондирования Земли. Таким образом, в настоящее время (2015) в состав отдела входят пять научных лабораторий и один сектор. Краткая характеристика структуры и научной работы этих подразделений отдела представлены ниже. Детально научная работа подразделений отдела ИЗК и основные научные результаты рассмотрены в данном юбилейном сборнике в ряде отдельных статей.

С момента создания отдела исследования проводились в рамках базовых Программ Министерства образования и науки России: с 2002 г. темы ОКЕАН – «Физические основы космического дистанционного зондирования поверхности Мирового океана в микроволновом диапазоне»; государственная регистрация № 01.20.02 00163; научный руководитель – Шарков Е.А.; и КЛИМАТ – «Изучение изменчивости климатических параметров и природные катастрофы разных масштабов: развитие и анализ физических механизмов, разработка современных методов обработки данных космического мониторинга климатических и экологических процессов»; государственная регистрация № 01.20.03 03440; научный руководитель – Шарков Е.А. С 2013 г. исследования проводились в рамках базовой Программы Федерального агентства научных организаций (ФАНО России) по теме МОНИТОРИНГ – «Разработка методов и технологий спутникового мониторинга для научных исследований глобальных изменений и обеспечения безопасности»; государственная регистрация № 01.20.02 00164; научный руководитель – доктор технических наук Лупян Е.А.

За последний период (2005–2015) сотрудники отдела приняли самое активное участие в целом спектре научных программ и грантов отечественных и зарубежных фондов. Ниже приведены наиболее актуальные проекты и программы, в которых научные сотрудники отдела выступали в качестве научных руководителей, а также международные космические миссии, в которых сотрудники отдела приняли непосредственное участие:

- 2 гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых – кандидатов наук (2009–2013);
- Программа фундаментальных исследований РАН «Проблемы радиофизики» по Отделению физических наук РАН (2004–2014 гг., ежегодно);
- 36 грантов Российского фонда фундаментальных исследований;
- 2 гранта Российского научного фонда;
- Государственный контракт Минобрнауки РФ (2011–2012);
- международный проект в рамках программы «Глобальный мониторинг окружающей среды и безопасность (GMES)» Европейского космического агентства и Международного фонда астронавтики;
- 2 международных проекта INTAS (2004–2009);
- международный проект Black Sea Scene, финансируемый Европейской комиссией в рамках Шестой рамочной программы (2006–2008);
- международный проект UPGRADE Black Sea Scene, финансируемый Европейской комиссией в рамках Седьмой рамочной программы (2009–2011);
- участие в проектах ФОБОС (1986), MAPC-94/96 (1996), Mars Surveyor '98 Program (NASA, 1998 г.);
- участие в разработке прибора ПМЛ (пылевой мониторинг Луны) (проекты ЛУНА-ГЛОБ и ЛУНА-РЕСУРС);
- участие в разработке Пылевого комплекса (ПК) проекта ЭКЗОМАРС.

Лаборатория моделирования и автоматизации

С момента создания по настоящее время лабораторию возглавляет кандидат физико-математических наук Раев Михаил Дмитриевич. Сотрудники лаборатории принимают участие как в проведении теоретических исследований по всем нижеприведенным направлениям, так и активно участвуют в экспериментальных работах, проводимых в отделе ИЗК. До 1993 г. экспериментальные работы с участием комплексов приборов дистанционного зондирования – радиометров и скаттерометров – проводились в основном в акваториях морей Северного ледовитого океана и Тихого океана. Начиная с 1999 г. район экспериментальных работ был перенесен в акваторию Черного моря – Голубую бухту (Геленджик), база ЮО ИО РАН.

Первым направлением исследований стала разработка методов дистанционного зондирования в задачах изучения поверхностных проявлений океанических процессов. Работы ведутся по модернизации используемой аппаратуры – улучшение параметров радиолокатора (РЛС), повышение чувствительности и применение цифровых методов регистрации данных скаттерометров и радиолокаторов. Главный упор при этом сделан на разработке цифровых методов анализа различного типа данных дистанционного зондирования, в том числе и при обработке изображений – радиолокационных и оптических.

Второе направление работ лаборатории – использование данных приборов космического базирования для исследования поверхности Земли. В лаборатории были накоплены данные микроволновых приборов космической системы DMSP (Defense Meteorological Satellite System) за период с 1987 по 2014 г. и создана база данных многоканальных радиометров космического базирования типа SSM/I, SSMIS и AMSRE, разработаны специализированные программы обработки этих данных с целью изучения процессов энергообмена и массопереноса в системе океан – атмосфера, происходящих в широком диапазоне интенсивности и с разными пространственными и временными масштабами. Накопленные данные, вошедшие в созданную в ИКИ базу данных GLOBAL-RT, позволили разработать и реализовать в специализированных программах методику пространственно-временного формирования радиотепловых полей для изучения пространственно-временной динамики различного рода климатических процессов.

Созданная в отделе база многоканальных радиотепловых данных была использована в работах по построению и исследованию физических моделей снежных и ледовых покровов, проводимых в лаборатории под руководством старшего научного сотрудника, кандидата физико-математических наук Тихонова В.В. В области исследования снежных покровов выполненные исследования позволили детально проанализировать и выявить особенности пространственно-временной изменчивости залегания снежного покрова в отдельных регионах, в том числе Восточно-Европейской равнины и Сибири. В ходе исследований в этом направлении были разработана модель эффективной диэлектрической проницаемости сухого и влажного снега, учитывающая физические и структурные параметры среды, а также рассеяния излучения на неоднородностях среды, и разработана модель излучения слоистого снежного покрова. Сотрудниками лаборатории написан обширный цикл работ по исследованию ледяных покровов полярных регионов (Арктика и Антарктика) методами спутниковой микроволновой радиометрии. На базе разработанной модели эффективной диэлектрической проницаемости морского льда, учитывающей рассеяние излучения в среде, а также модели излучения системы морская поверхность – ледяной покров – снежный покров – атмосфера разработан уникальный комплексный алгоритм определения ледовой обстановки полярных регионов по данным спутниковой микроволновой радиометрии – VariationArctic/AntarcticSeaIceAlgorithm 2 (VASIA2). В отличие от общепринятого алгоритма NASA Team 2 (США), разработанный алгоритм позволил определить не только сплоченность ледяного покрова, но и экспериментально доказать присутствие снежниц (талых озер), образующихся на поверхности морского льда в летний период.

Лаборатория подспутниковых экспериментов

До реорганизации 2013 г. лаборатория имела название комплексных экспериментов и возглавлял ее кандидат физико-математических наук Булатов Михаил Григорьевич (1937–2007), определивший и руководивший рядом приоритетных направлений ее научной и ап-

паратурной деятельности. С 2007 г. лабораторией руководит соратник Булатова М.Г. – кандидат физико-математических наук Скворцов Евгений Иванович. Решением дирекции ИКИ РАН в 2014 г. в лабораторию были введены сотрудники лаборатории информационно-методического обеспечения целевых проектов зондирования Земли.

Основные направления научных исследований лаборатории – разработка современных радиофизических средств и методов дистанционного зондирования для исследования тонких характеристик морской поверхности методами микроволнового зондирования на специализированных морских полигонах с целью верификации синхронно получаемых спутниковых данных. К основным достижениям последних десяти лет можно отнести дистанционное обнаружение аварийных участков подводных газовых трубопроводов. Для решения задачи проводились натурные эксперименты, в ходе которых имитировались повреждения подводных газопроводов, а «отклик» поверхности наблюдался с помощью радиолокационно-радиометрического комплекса. Было показано, что с помощью аэрокосмических средств дистанционного зондирования можно надежно обнаруживать разрушения подводных газопроводов и, что особенно интересно, – подводные природные газовых факелы, которые обычно указывает на газовые и нефтяные месторождения на морском шельфе.

Параллельно с этими исследованиями в 2002–2008 гг. проходили натурные эксперименты по исследованию нелинейного взаимодействия систем ветровых волн и обрушения ветровых волн – одного из наиболее важных и наименее изученных (в статистическом и динамическом смысле) процессов в верхнем слое океана. Наблюдения проводились с помощью специализированного локатора ИКИ-2М. По радиоизображениям морской поверхности, представленным в координатах время-дальность, были определены геометрические характеристики (линейные и площадные размеры) обрушений поверхностных волн, время жизни и скорость распространения обрушающихся волновых гребней. Все эти величины были впервые измерены микроволновыми дистанционными методами. Эти же параметры стали основой для разрабатываемого в настоящее время нового комбинированного метода радиолокационных измерений параметров поверхностных течений и топографии дна в прибрежной зоне. Его отличия от тех методик, которые применяются сегодня, – более высокая точность определения скорости и направления течений. Повышение точности таких измерений важно для обеспечения безопасности судоходства, при строительстве портовых сооружений, для охраны окружающей среды, а также при верификации спутниковых данных.

Исследования собственного и рассеянного излучения органических пленок на водной поверхности, образованных всплывающими газовыми пузырьками, – новое направление работы лаборатории. В ходе исследований экспериментально показано, что поток всплывающих газовых пузырьков увеличивает концентрацию клеток фитопланктона в поверхностном микрослое воды. С помощью скаттерометра 8-миллиметрового диапазона впервые в контролируемых условиях установлена связь величины радиолокационных контрастов со сдвигом доплеровских частот с физическими параметрами биологи-

ческих пленок различного видового состава фитопланктона. Таким образом, речь идет о формировании принципиально нового направления при изучении биологии океана – биоскаттерометрии.

Лаборатория микроволновой радиометрии

Лаборатория была образована в 2002 г. и возглавлял ее Трохимовский Юрий Гаврилович (1957–2002), определивший ряд приоритетных направлений научной деятельности подразделения. С 2002 г. лабораторией руководит соратник Трохимовского Ю.Г. – Кузьмин Алексей Владимирович. Основная задача лаборатории – разработка методик дистанционного зондирования океана и атмосферы Земли с помощью микроволновых радиометров. Для решения этой задачи необходимы как разработка новой радиометрической аппаратуры, так и проведение исследований в области физики океана и атмосферы, распространения электромагнитного излучения через атмосферу и рассеяния его на шероховатой поверхности.

К основным достижениям последних десяти лет можно отнести разработку уникального метода дистанционного определения параметров спектра гравитационно-капиллярных волн (ГКВ) – метода нелинейной радиотепловой резонансной спектроскопии (НРПС). Определение этой части спектра поверхностного волнения стало очень сложной задачей, которая, однако, необходима для решения фундаментальных задач, связанных с механизмами накачки и диссипации энергии от ветрового потока к поверхностному волнению как части механизма взаимодействия океана и атмосферы. Экспериментальные исследования с помощью метода НРПС проводились в рамках международных экспедиций CAPMOS'05 и CAPMOS'07 (в рамках гранта INTAS No. 03-51-4789 “Combined Active/Passive Microwave Measurements of Wind Waves for Global Ocean Salinity Monitoring”) и подспутниковых экспериментов на Черном море (полигон ЮО ИО РАН, Геленджик, Россия; океанографическая платформа Морского гидрофизического института (МГИ), п. Кацивели, Крым) в рамках грантов РФФИ. Разработка прецизионных радиометров-поляриметров для проведения подспутниковых измерений завершилась созданием двух новых современных радиометров-поляриметров 8-мм диапазона и калиброванных широкоугольных излучателей к ним. Радиометры прошли успешные испытания на полигоне ЮО ИО РАН.

В теоретических разработках развивалась теория взаимодействия плоско-поляризованной монохроматической электромагнитной волны с синусоидальной морской поверхностью. Получено точное решение волнового уравнения на синусоидальной границе вода-воздух для произвольной поляризации.

Разработан и введен в Долгосрочную программу космических экспериментов проект космического эксперимента (КЭ) «Конвергенция» («Определение детальных профилей температуры и влажности атмосферы при исследовании генезиса атмосферных

катастроф»), целью которого является исследование основ зарождения и эволюции крупномасштабных кризисных атмосферных процессов типа тайфунов и тропических циклонов как одних из основных элементов в формировании глобального массо- и влагообмена в системе океан-атмосфера. Эксперимент планируется осуществить на российском сегменте Международной космической станции (МКС). Научный руководитель Шарков Е.А., ответственный исполнитель Кузьмин А.В. Задачами КЭ «Конвергенция» являются проведение измерений абсолютных радиоярких температур системы атмосфера-океан тропиков в диапазоне 6...220 ГГц, определение детальных профилей температуры и влажности атмосферы, проведение исследований по круглосуточному обнаружению вспышек молний, определение энергетических, пространственных и временных характеристик вспышек молний, определение зон грозовой деятельности.

Лаборатория аэрокосмической радиолокации

Лаборатория была образована в 2002 г. С момента создания до настоящего времени руководителем лаборатории является кандидат физико-математических наук, доцент Лаврова Ольга Юрьевна. Основные научные направления деятельности лаборатории – теоретическое и экспериментальное исследование динамических и волновых процессов в верхнем слое океана и в приземной атмосфере на основе данных микроволнового спутникового дистанционного зондирования. Основу исследований составляют изображения морской поверхности, полученные при помощи радиолокаторов с синтезированной апертурой, а для их уверенной и надежной интерпретации в лаборатории разрабатываются методики анализа всей совокупности информации, полученной с помощью приборов дистанционной диагностики, установленных на различных спутниках, специализированных на дистанционном зондировании Земли.

К основным научным достижениям последних лет можно отнести результаты исследований сотрудников лаборатории по следующим двум основным направлениям:

1. Исследование циркуляционных и динамических процессов во внутренних морях России на основе комплексного использования спутниковой информации. Использование данных спутникового дистанционного зондирования морской поверхности существенно расширило наше представление о таком важном явлении, как внутренние волны в океане.

В последнее время удалось выявить поверхностные проявления внутренних волн не только в хорошо изученных и подробно описанных в научной литературе районах Мирового океана, но и в замкнутых бассейнах: морях и больших озерах. Было выявлено, что механизмом генерации цугов интенсивных внутренних волн в бесприливном море могут служить выходы на шельф длинных внутренних волн – внутренних сейш и квазиинерционных внутренних волн, появляющихся, как правило, в послештормовую погоду. Сотрудниками лаборатории на основе спутниковых данных был выявлен еще один новый механизм генерации внутренних волн в бесприливных морях, а именно, генерация волн нестационарным фронтом (движущимся и/или подверженным инерционным колебаниям),

связанным с прохождением холодного вихря. В последние годы большое внимание уделяется исследованию субмезомасштабных вихревых структур Черного, Балтийского и Каспийского морей, размеры которых составляют от нескольких сот метров до нескольких километров. Был разработан метод реконструкции реальных полей поверхностных течений, позволяющий выявлять мезо- и мелкомасштабной структуры: вихри, диполи и мультиполюсы, струи, филаменты и проводить оценки влияния динамических структур в прибрежной зоне моря на пространственно-временное распределение основных параметров загрязнения морской среды.

2. Разработка методики выявления антропогенных и естественных загрязнений морской поверхности и прогноза их распространения на основе данных спутникового зондирования. На основе архива спутниковых данных за более чем 10-летний период было оценено экологическое состояние акваторий Черного, Каспийского и Балтийского морей, которые наиболее подвержены нефтяному загрязнению из-за широкомасштабного освоения запасов нефти и газа на морском шельфе, сопровождаемого строительством и эксплуатацией морских стационарных платформ, береговых терминалов, хранилищ углеводородов, прокладкой подводных трубопроводов, сейсмическими и буровыми работами, ростом судоходства и пр. Одна из важнейших задач, которая стоит перед спутниковой океанологией – это определение масштаба бедствия и прогнозирование последствий в случае природных и антропогенных катастроф. Сотрудники лаборатории принимали активное участие в проведении оперативных спутниковых мониторингов при катастрофических разливах нефтепродуктов: в Керченском проливе, при аварии танкера «Волгонепфть-139» (11 ноября 2007 г.); в Мексиканском заливе, вследствие разрушения нефтяной платформы Deepwater Horizon (21 апреля 2010 г.), в Гвинейском заливе, при аварии на морской нефтяной платформе Bonga (21 декабря 2011 г.). На основе всей совокупности доступных спутниковых данных проводился ежедневный мониторинг распространения нефтяной пленки, оценивались площадь загрязненной акватории, изучалась гидродинамическая обстановка в районе бедствия и делался прогноз дальнейшего распространения загрязнения.

Полученные сотрудниками лаборатории результаты мониторинга нефтяных катастроф были опубликованы в шести российских и зарубежных монографиях. Коллектив лаборатории имеет широкие международные контакты. Сотрудники лаборатории внесли существенный вклад как в научном, так и в организационном плане, в подготовку и исполнение целого ряда международных проектов совместно с ведущими научно-исследовательскими организациями США, Великобритании, Германии, Франции, Португалии, Нидерландов, стран Черноморского региона и т.д.

Лаборатория климатических исследований

Лаборатория была образована в 2002 г. Руководитель – Шарков Евгений Александрович. Деятельность лаборатории развивает научное направление, предложенное ее руководителем, – разработка научных основ и методов анализа глобальных спутниковых

наблюдений радиофизическими методами для объективной оценки изменений окружающей среды и климата планеты (Шарков, 2014; Sharkov, 2012). Основные направления научных исследований:

- формирование научной многолетней базы данных глобального тропического циклогенеза GLOBAL-TC (1983–2014 гг.) на основе детального реанализа данных спутникового и контактного зондирования;
- развитие анимационных методов изучения циркуляционных и миграционных свойств глобальных полей водяного пара в атмосфере Земли на основе данных спутникового радиотеплового зондирования (радиотепловидение);
- создание научной основы организации дистанционного мониторинга природных атмосферных катастроф, риска их генезиса и их последствий на основе данных спутникового микроволнового зондирования.

Разработаны научные основы изучения изменчивости климатических глобальных параметров Земли и характеристик природных катастрофических атмосферных вихрей и явлений, происходящих в системе океан – атмосфера и оказывающих влияние на формирование климата планеты.

Созданы научные основы проведения мониторинга и изучения глобального тропического циклогенеза как одного из климатообразующих факторов. В частности показано, что:

- необходимое условие генезиса тропического циклона (ТЦ) – наличие поля интегрального водяного пара выше 60 кг/кв. м. Иными словами, для того, чтобы циклон зародился, в атмосфере должно быть достаточного количество водяного пара;
- необходимое условие существования и интенсификации (усиления) ТЦ – наличие джетового моста с экваториальным материнским полем интегрального водяного пара;
- разрыв джетового моста приводит к немедленной диссипации ТЦ.

Определена роль тропических циклонов в полярном переносе скрытой теплоты на планете. Анализ глобальных радиотепловых полей Земли из электронной коллекции GLOBAL-Field показал, что водяной пар и тепло переносится из приэкваториальной атмосферы планеты в более высокие широты («полярный перенос») не меридиональной циркуляцией, а интенсивными горизонтальными движениями, вызванными тропическими циклонами, и атмосферными фронтами, имеющими большую горизонтальную протяженность

Создана методика спутникового радиотепловидения, состоящая в пространственно-временной интерполяции и анализе измеренных с полярно-орбитальных спутников радиотепловых полей Земли и восстановленных по ним полей геофизических характеристик. Методика позволяет получать динамическое описание эволюции рассматриваемых полей с рекордными параметрами на сегодняшний день: временной пиксел с шагом до 1,5 часов на глобальной регулярной географической сетке с шагом до 0,125 градуса, что дает возможность прямого расчета физических величин, характеризующих аспекты массо- и энергопереноса в атмосферных системах с горизонтальными размерами от 100 км, развивающихся на суточных и более длительных интервалах времени.

Совместный анализ синхронных пар полей водяного пара W и скорости ветра V позволяет выполнить расчет адвективных потоков скрытого тепла Q через произвольно заданные границы (контуры), т.е. получить в замкнутой относительно входных радиотепловых данных расчетной схеме важную интегральную характеристику массо- и энергообмена процессов, наблюдаемых в системе океан-атмосфера. Таким образом, экспериментально доказано, что фазы интенсификации и диссипации ТЦ жестко привязаны к изменению величины и знака потоков Q : интенсификация соответствует конвергентному (положительному, внутрь контура) потоку, а диссипация – дивергентному (отрицательному).

Сектор оптического зондирования

Руководитель сектора – кандидат физико-математических наук Георгий Петрович Арумов. Методы лазерного зондирования, которые развивают сотрудники сектора, используются в изучении не только Земли, но и других планет Солнечной системы. Исследования ведутся, в основном, по двум направлениям. Первое – анализ элементного состава вещества по спектрам излучения лазерной плазмы, образующейся при воздействии лазерных импульсов на поверхность исследуемых образцов. Второе направление связано с разработкой миниатюрных лидаров для исследования атмосферы. В ИКИ АН СССР эти методы получили развитие в научной группе Арумова Г.П. в отделе Эткина В.С., преобразованной затем в лабораторию в отделе Моисеева С.С., трансформированную в настоящее время в сектор оптического зондирования в отделе ИЗК. Лаборатория, совместно с другими подразделениями Института, принимала участие в проектах ФОБОС (1986), МАРС-94/96 (1996), Mars Surveyor'98 Program (NASA, 1998 г.). В рамках институтских научных групп сотрудники сектора участвуют в разработках приборов для новых космических миссий, в частности, прибора ПмЛ, предназначенного для исследования плазменно-пылевой компоненты у поверхности Луны в проектах ЛУНА-ГЛОБ и ЛУНА-РЕСУРС, и Пылевого комплекса посадочного аппарата проекта ЭКЗОМАРС, предназначенного для изучения динамики пыли и аэрозоля в приповерхностном слое атмосферы Марса.

Наряду с участием в этих проектах, разрабатываются предложения по оптическим датчикам для исследования аэрозоля в атмосфере Венеры с помощью спускаемого аппарата перспективного проекта ВЕНЕРА-Д (приборы НЕФАС и НЕЛИДА).

Заключение

История исследований, связанных с радиофизическими методами изучения Земли, на этом, разумеется, не заканчивается. В любом потенциальном спутниковом комплексе для исследования Земли микроволновые аппаратные сегменты занимают ведущее положение. Потребность в использовании радиофизических космических методов для изучения

глобального термомассообмена, состояния поверхности Мирового океана и континентов, несомненно, будет расти. Интересные фундаментальные научные результаты, полученные сотрудниками отдела исследования Земли из космоса ИКИ РАН за его историю и, особенно, в последнее время, позволяют надеяться на их дальнейшие успехи в развитии радиофизических средств и методов исследования Земли из космоса.

В связи с 50-летним юбилеем ИКИ РАН хочется пожелать отделу исследования Земли из космоса свежих научных идей и творческих достижений на следующем отрезке времени той же продолжительности.

Литература

1. Беспалова Е.А., Веселов В.М., Глотов А.А., Милицкий Ю.А., Мировский В.Г., Покровская И.В., Попов А.Е., Раев М.Д., Шарков Е.А., Эткин В.С. Исследования анизотропии ветрового волнения по вариациям теплового излучения // Докл. АН СССР. 1979. Т. 246. № 6. С. 1482–1485.
2. Беспалова Е.А., Веселов В.М., Воляк К.И., Милицкий Ю.А., Мировский В.Г., Покровская И.В., Попов А.Е., Раев М.Д., Шарков Е.А., Эткин В.С. Экспериментальные исследования загрязненной морской поверхности нефтепродуктами с помощью активной и пассивной СВЧ-локации // Водные ресурсы. 1983. № 1. С. 154–162.
3. Ирисов В.Г., Трохимовский Ю.Г., Эткин В.С. Радиотепловая спектроскопия морской поверхности // Докл. АН СССР. 1987. Т. 297. № 3. С. 587–589.
4. Лаврова О.Ю., Костяной Ф.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург Ф.И., Шеремет Н.А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 480 с.
5. Шарков Е.А. Обрушающиеся морские волны: структура, геометрия, электродинамика. М.: Науч. мир, 2009. 340 с.
6. Шарков Е.А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы. В 2-х т. Т. 1. М.: ИКИ РАН, 2014. 552 с.
7. Sharkov E.A. Global Tropical Cyclogenesis. 2nd Ed. Springer/PRAXIS. Berlin. Heidelberg. Dordrecht. London. New York, 2012. 604 p.

Environmental studies by radiophysical methods. Creation and history of science direction «Radiophysical satellite investigations of the Earth»

M.D. Raev, E.A. Sharkov

*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia,
E-mails: mraev@mx.iki.rssi.ru, e.sharkov@mail.ru*

The paper is devoted to the history of creation and evolution of the Earth Research from Space Department (ERS) of Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IKI RAS). We pay tribute to researchers of ERS who were founders and leaders of radiophysical satellite investigations of the Earth both in our country and in the world practice of microwave remote sensing. The most important events and achievements in the history of ERS are briefly described. At first aircraft, and later satellite experiments in multichannel microwave passive and active remote sensing of the Earth's surface and atmosphere using high-sensitive instruments, developed by ERS scientists, yielded a diversity of unique scientific results. These results became a basis for the development of a whole variety of research directions in studies of ocean surface, ice covers in polar regions, atmospheric catastrophes and others. Information products and techniques developed were used in a number of industrial and environmental applications.

Keywords: Earth research from space, microwave passive remote sensing, synthetic aperture radar, sea surface, internal waves; anthropogenic and biogenic pollution, atmospheric catastrophe, planet climate, laser plasma

References

1. Bespalova E.A., Veselov V.M., Glotov A.A., Militskii Yu.A., Mirovskii V.G., Pokrovskaya I.V., Popov A.E., Raev M.D., Sharkov E.A., Etkin V.S. Issledovaniya anizotropii vetrovogo volneniya po variatsiyam teplovogo izlucheniya (Investigation of wind sea roughness anisotropy from thermal emission variation), *Dokl. AN SSSR*, 1979. Vol. 246, No. 6, pp. 1482–1485.
2. Bespalova E.A., Veselov V.M., Volyak K.I., Militskii Yu.A., Mirovskii V.G., Pokrovskaya I.V., Popov A.E., Raev M.D., Sharkov E.A., Etkin V.S. Eksperimental'nye issledovaniya zagryaznennoi morskoi poverkhnosti nefteproduktami s pomoshch'yu aktivnoi i passivnoi SVCh-lokatsii (Experimental detection of oil pollution on sea surface by passive and active microwave remote sensing), *Vodnye resursy*, 1983, No. 1, pp. 154–162.
3. Irisov V.G., Trokhimovskii Yu.G., Etkin V.S. Radioteplovaya spektroskopiya morskoi poverkhnosti (Radiothermal spectroscopy of sea surface), *Dokl. AN SSSR*, 1987, Vol. 297, No. 3, pp. 587–589.
4. Lavrova O.Yu., Kostyanoi F.G., Lebedev S.A., Mityagina M.I., Ginzburg F.I., Sheremet N.A. *Kompleksnyi sputnikovyi monitoring morei Rossii* (Integrated satellite monitoring of Russian seas), Moscow: IKI RAN, 2011, 480 p.
5. Sharkov E.A. *Obrushayushchiesya morskoe volny: struktura, geometriya, elektrodinamika* (Breaking sea waves: structure, geometry, electrodynamics), Moscow: Nauchny mir, 2009, 340 p.
6. Sharkov E.A. *Radioteplovoe distantsionnoe zondirovanie Zemli: fizicheskie osnovy* (Radiothermal remote sensing of the Earth: physical foundations), Vol. 1, Moscow: IKI RAN, 2014, 552 p.
7. Sharkov E.A. *Global Tropical Cyclogenesis*, Springer/PRAXIS. Berlin. Heidelberg. Dordrecht. London. New York, 2012, 604 p.