

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В ИРЭ НАН УКРАИНЫ

В. К. Иванов, С. Е. Яцевич

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: ivanov@ire.kharkov.ua*

Рассмотрена история развития радиофизических методов и средств дистанционного зондирования поверхности Земли с аэрокосмических носителей в Институте радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины во второй половине XX века. Представлены основные характеристики космических и авиационных радиолокаторов бокового обзора. Обсуждаются полученные результаты и перспективы развития дистанционных методов. Ил. 11. Табл. 2. Библиогр.: 54 назв.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, радиолокация, обработка данных.

Предыстория. К середине XX в. был в основном изучен механизм рассеяния радиоволн коротко- и средневолнового диапазонов поверхностью моря, установлены общие закономерности и связи характеристик рассеянных сигналов с параметрами морской поверхности. Тем самым было сформировано новое научное направление «радиоокеанография», одними из основоположников которого являлись С. Я. Бра-де и И. Е. Островский [1]. И если в длинноволновом диапазоне (декаметры) на основе метода малых возмущений удалось рассчитать и описать энергетические, частотные и спектральные характеристики рассеяния, то проблема рассеяния СВЧ радиоволн морской поверхностью оставалась нерешенной.

Проведенные исследования позволили получить статистически представительные результаты, однако их обобщение и интерпретация долгие годы оказывались невозможными ввиду отсутствия корректных теоретических методов, что и является самым главным из-за неизвестной природы рассеяния СВЧ радиоволн поверхностью моря. Попытка создать феноменологические модели также не позволила обобщить основные результаты.

В начале 1960-х гг. в ИРЭ АН УССР под руководством зав. отделом распространения радиоволн профессора И. Е. Островского группа сотрудников (А. Д. Розенберг, В. И. Зельдис, Б. Д. Замираев, Ю. А. Смирнов, А. И. Калмыков, В. В. Пустовойтенко, А. С. Курекин, Ф. С. Санин и др., в теоретических разработках участвовали Ф. Г. Басс, И. М. Фукс) провела исследования, направленные на изучение механизма рассеяния. Основная задача этих экспериментов состояла в том, что природу отражателей СВЧ радиоволн на море можно определить из анализа доплеровского спектра сигнала, поскольку все элементы морской поверхности движутся. Затем после определения скорости этих элементов из дисперсионного соотношения можно найти характерные размеры отражателей (длины мор-

ских волн, ответственных за рассеяние).

Для измерения доплеровских спектров и изучения природы рассеяния во всем диапазоне СВЧ в ИРЭ АН УССР был создан комплекс когерентных радиолокаторов с длинами волн 8 мм, 3 см, 10 см, 50 см, 1,5 м и 4 м [2]. В течение 1961-1963 гг. в процессе экспериментов по изучению доплеровских спектров рассеянных морем сигналов был установлен ряд закономерностей при слабых волнениях на море.

Одновременно с экспериментами выполнены теоретические исследования, в рамках которых рассеивающая поверхность представлялась в виде неровностей двух масштабов: малых неровностей, к которым применим метод возмущений, и крупных, отражения от которых рассматриваются в приближении Кирхгофа. Разработанный для акустического случая метод был трансформирован и применен к расчету рассеяния радиоволн морской поверхностью [3]. Теоретические расчеты позволили связать основную энергетическую характеристику рассеяния, удельную ЭПР с параметрами волнения и условиями наблюдения.

Выполненные совместно теоретические и экспериментальные исследования привели к пониманию природы рассеяния и интерпретации основных экспериментальных данных. Принципиальными для проверки модели явились наблюдения эффектов модуляции рассеяния крупными волнами. Измерения пространственных корреляционных функций с моделированием процессов рассеяния в бассейне подтвердили особенности предложенных моделей и методов расчета.

По результатам этого этапа исследований опубликованы обзоры работ, выполненных в этом направлении [4]. В 1969 г. эти обзоры отмечены Дипломом Института радиоинженеров (IEEE) США.

Дальнейшие исследования в начале 1970-х гг. продолжались в двух направлениях. Основным явилось направление разработки методов дистанционного зондирования и создания

средств измерения параметров волнения. Методы основывались на измерениях эффектов амплитудно-частотной модуляции рассеянных сигналов. Были созданы две приставки к радиолокационным станциям: первая измеряла параметры крупных волн (высоту, распределение периодов, спектры) по амплитудным характеристикам, а вторая – по фазовым характеристикам рассеяния. При установке второй приставки на корабле требовался учет качки с использованием акселерометрического датчика. Приставки были внедрены в Гидрометслужбу СССР, использовались для измерения параметров волнения в океане в штормовых условиях.

Вторым развиваемым направлением явилось детальное изучение механизма рассеяния. Исследованы свойства двухпозиционного рассеяния, установлен его избирательный характер в широком диапазоне углов разнесения передатчика и приемника. Особое внимание было уделено экспериментальным наблюдениям на скользящих углах, где свойства рассеяния принципиально отличались от расчетных значений.

Специальные эксперименты, в которых имелась возможность детально наблюдать элементы крупных волн, позволили обнаружить всплески сигналов, создаваемые заостренными гребнями волн перед обрушиванием. Комплексный анализ доплеровских, пространственно-временных изменений сигналов на различных поляризациях позволил уточнить модель рассеяния на скользящих углах. Было определено, что отражения с горизонтальной поляризацией формируются рябью и заостренными гребнями волн, а учет этих факторов позволил интерпретировать экспериментально обнаруженные особенности. Отражения с вертикальной поляризацией связаны с рябью. Влияние брызг оказывается существенным в миллиметровом диапазоне волн. В трехсантиметровом и более длинноволновых диапазонах определяющим является рассеяние рябью.

В середине 1970-х гг. начинается разработка методов дистанционного зондирования морской поверхности с аэрокосмических носителей. Отработочным полигоном явился штормовой бассейн в Экспериментальном отделении Морского гидрофизического института (МГИ) АН УССР (пос. Качивели, Крым). Здесь же на берегу располагался многочастотный измерительный радиолокационный комплекс (рабочие диапазоны 8 мм, 3 см, 10 см и 50 см) с пунктом обработки информации. Одновременно с полигонными работами проводились исследования с борта самолета лаборатории ЛИ-2, ИЛ-14 и вертолета МИ-8. Работы на летательных аппаратах и в шторм-бассейне выполнялись А. И. Калмыковым, А. С. Курекиным, А. П. Пичугиным, Ю. М. Галаевым, В. Б. Ефимовым, В. Ю. Леван-

товским, А. Б. Фетисовым, В. В. Пустовойтенко.

В этих экспериментах изучались свойства рассеяния во всем диапазоне углов – от скользящих до вертикального зондирования. Одним из важных практических результатов явилось изучение свойств отражения морской поверхностью в присутствии различного вида неоднородностей. Так, было установлено, что радиолокационным методом контрастно обнаруживаются слики – разливы нефтепродуктов – во всем диапазоне углов вплоть до вертикальных даже при штормовых условиях. Чрезвычайно высокая чувствительность метода позволяла в диапазоне 3 см контрастно обнаруживать (> 10 дБ) разливы с толщиной пленки 0,1 мкм и менее.

Практическая апробация метода проведена в Новороссийской бухте и подтверждена эффективность радиолокационного обнаружения разливов нефтепродуктов. Позже средства наблюдения были запатентованы в СССР [5] и США [6].

Изучение различных классов неоднородностей позволило распространить применимость избирательного рассеяния для случаев неоднородной морской поверхности. Возможности измерений параметров морского волнения были обобщены в обзорах [7, 8].

Разработанные методы дистанционного зондирования морской поверхности позволили перейти к новому качественному этапу развития тематики – космическому зондированию Мирового океана.

В конце 1970-х гг. МГИ АН УССР при участии ИРЭ АН УССР на базе объекта КБ «Южное» запустили ИСЗ «Космос-1151» со скаттерометром, предназначенным для определения параметров морского волнения, однако информация оказалась непригодной для практического использования. Первая космическая разработка скаттерометра выполнена А. И. Калмыковым, А. С. Курекиным, В. Ю. Левантовским, В. Б. Ефимовым, Г. Н. Левчуком, Ю. В. Захаровым.

1. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Для целевого продолжения работ 1 сентября 1979 г. в ИРЭ АН УССР был создан отдел дистанционных методов исследования природной среды для развития нового научного направления – космической радиоокеанографии и дистанционного зондирования Мирового океана и морских льдов по заказу МОМ СССР. Основой отдела стала группа А. И. Калмыкова, которая вплотную занималась дистанционными методами радиолокации моря в отделе распространения радиоволн И. Е. Островского (А. И. Калмыков, А. С. Курекин, В. Б. Ефимов, В. Ю. Левантовский, С. А. Шило, А. П. Пичугин, А. Б. Фетисов, С. Н. Диденко, Ю. В. Захаров, А. И. Губаренко), а также влившиеся в коллектив специалисты по

СВЧ радиометрии моря В. А. Комяк, А. С. Левда из лаборатории поглощения радиоволн И. Х. Ваксера, теоретик Ю. А. Сеницын). На момент создания общая численность отдела составляла 20 человек, из них 2 кандидата наук (А. И. Калмыков, Ю. А. Сеницын). Отдел возглавил А. И. Калмыков.

С начала 1980-х гг. в отделе начинается разработка космического радиолокатора бокового обзора и сканирующего радиометра для изучения океана и льдов.

Одновременно в отделе создается самолетный комплекс аппаратуры, состоящий из радиолокатора бокового обзора сантиметрового диапазона (РБО-3) и сканирующего восьмимиллиметрового радиометра (РМ-08) с оперативной обработкой информации на борту, аналог космической системы. В первых же экспериментах подтверждена эффективность предложенной в ИРЭ АН УССР системы для изучения океана и льдов [9].

Совместное использование информации РБО-3 и РМ-08 принципиально должно было обеспечить получение данных о состоянии морской поверхности и льдов, более глубоких, чем данные каждого отдельно взятого датчика. В ряде ситуаций эти возможности были проиллюстрированы, однако информативность радиометрических систем оказалась меньше, чем ожидалось. В этот период получены убедительные данные о возможностях радиолокационных наблюдений льдов. Результаты этих исследований убедили сотрудников отдела в перспективах радиолокационных наблюдений льдов из космоса. Предпринятые многочисленные попытки теоретически интерпретировать данные зондирования льдов, к сожалению, не привели к созданию адекватной модели и методов расчета. Явление рассеяния льдами оказалось намного сложнее, чем рассеяние морем. Вместе с тем выполненные исследования показали перспективы решения широкого круга задач по изучению океана и льдов из космоса.

В 1983 г. запущен ИСЗ «Космос-1500» (рис. 1) с первым отечественным оперативным РБО с полосой обзора около 500 км и разрешением 1-2 км [10]. Параметры РБО «Космос-1500» (см. табл. 1) выбраны оптимальными для изучения мезомасштабных процессов в океане и льдах, что обеспечивало возможность контроля основных взаимодействий в системе океан – атмосфера, основных процессов льдообразования и динамики ледовых покровов.

Высокая оперативность системы достигалась как выбором параметров, так и обработкой информации на борту и передачей ее в международном стандарте АРТ на широкую сеть потребителей (в том числе и на автономный пункт приема и обработки космической информации в ИРЭ).

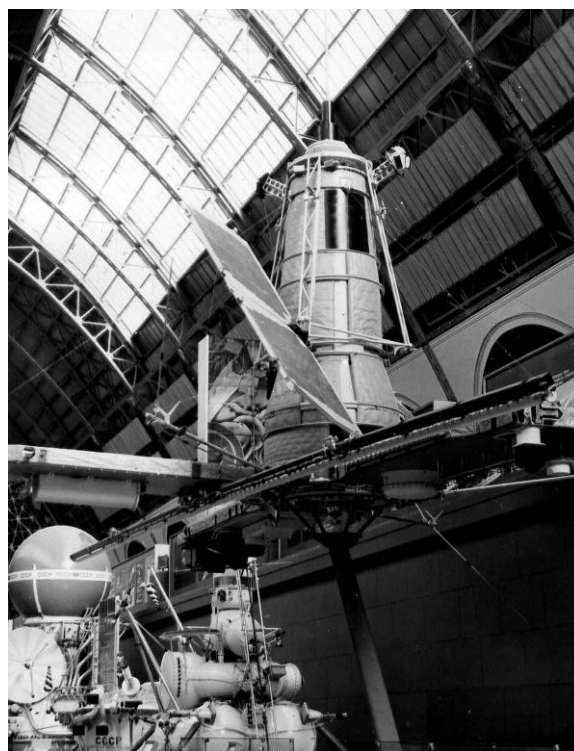


Рис. 1. Космический аппарат «Космос-1500» с радиофизической аппаратурой дистанционного зондирования Земли на борту (ВДНХ СССР 1985 г.)

Таблица 1

Параметры	РБО-3
Длина волны, см	3,1
Поляризация	ВВ
Диапазон углов наблюдения	20°-46°
Ширина ДН антенны: в азимутальной плоскости в угломестной плоскости	0,2° 42°
Пространственное разрешение, км: при передаче по М-линии при передаче по ДМ-линии	2×2,5 0,8×2,5
Чувствительность приемника, дБ/Вт	-140
Мощность передатчика	100 КВт
Длительность импульса, мкс	3
Частота повторения импульсов, Гц	100
Высота орбиты ИСЗ, км	650
Наклонение орбиты	82,6°
Полоса обзора, км	450

За выполнение цикла работ «Создание радиолокационных методов (дистанционного зондирования) природной среды Земли с аэрокосмических носителей и их внедрение», связанных с разработкой и внедрением в серийное производство аппаратуры дистанционного зондирования космического базирования, следующим сотрудникам отдела была присуждена Государственная премия Украины в области науки и техни-

ки за 1987 г.: А. И. Калмыков, В. Б. Ефимов, Ю. В. Захаров, В. И. Зельдис, В. В. Иголкин, В. А. Комяк, А. С. Курекин, А. П. Пичугин, П. М. Торчун, В. Н. Цымбал.

Ряд сотрудников отдела за создание аппаратного комплекса ИСЗ «Космос-1500» был отмечен высокими правительственными наградами:

– орден «Дружбы народов»: А. И. Калмыков, В. Н. Цымбал;

– орден «Знак Почета»: А. С. Курекин, Ю. В. Захаров, С. Н. Диденко, В. В. Иголкин;

– медаль «За трудовую доблесть»: В. Ю. Левантовский, П. М. Торчун.

За проведение цикла работ по дистанционному зондированию Земли на лаборатории ИЛ-18 «Аналог» молодым ученым была присуждена премия им. Ленинского комсомола в области науки и техники за 1985 г.: А. С. Гавриленко, В. В. Крыжановский, С. А. Провалов, Ю. А. Кулешов, Г. А. Торопов, С. Е. Яцевич, А. Б. Фетисов, С. А. Шило.

Техническая разработка аппаратного комплекса РФА «Космос-1500» была удостоена высоких наград Всесоюзных и республиканских выставок достижения народного хозяйства (1985, 1987 гг.). Золотыми наградами ВДНХ СССР были награждены: А. И. Калмыков, А. П. Пичугин, Ю. В. Захаров, П. М. Торчун; серебрянными – А. С. Курекин, А. П. Пичугин, В. Ю. Левантовский, В. Н. Цымбал; бронзовыми – В. А. Комяк, А. Б. Фетисов, П. М. Торчун.

Разработка РБО и сканирующего радиометра была передана НИИ «Радиоизмерения» для промышленного изготовления. НИИ РИ изготовил системы ИСЗ «Космос-1766», «Космос-1899», «Океан», первых Украинских Национальных спутников ДЗЗ «Січ-1», «Січ-1м».

Начиная с середины 1980-х гг., отдел приступил к разработке концепции построения многоцелевых аэрокосмических оперативных радиолокационных систем (МРЛК), обеспечивающих наблюдение океана, льдов и суши. Эта концепция основывалась на совместном учете физических свойств рассеяния различными объектами природной среды, тактических требований по оптимизации соотношений полосы обзора, разрешения при обработке информации на борту и информационных возможностей различных систем.

С этих позиций разработан вариант построения перспективной космической системы дистанционного зондирования, сочетающей возможности РБО и РСА. Эта система планировалась к установке на ДОС «Мир» [11].

Позже было предложено решение и выполнена оценка информативности различных радиолокационных систем дистанционного зондирования. Было показано, что максимальной информативностью обладает комплекс, состоя-

щий из РБО, РСА и скаттерометра. В соответствии с предложенной в период 1987-1990 гг. отделом совместно с ЦСКБ (Самара) и КБ «Южное» концепцией были выполнены разработки перспективного варианта многоцелевого радиолокационного комплекса. Не вдаваясь в детальный анализ и обоснование выбора параметров, следует отметить, что этот вариант прошел экспертизу в НАСА, получил высокую оценку ведущих специалистов США, был предложен к установке на национальный спутник дистанционного зондирования.

2. Многоцелевой авиационный радиолокационный комплекс. Параллельно с разработкой космического варианта создавался самолетный многоцелевой авиационный радиолокационный комплекс (МРЛК-«МАРС») [12]. Он был предназначен как для обеспечения научных исследований, так и для выполнения эксплуатационных работ. Состав и параметры комплекса выбирались также на основе предложенной концепции (рис. 2, табл. 2).



Рис. 2. Самолет-лаборатория МРЛК ИЛ-18Д

При разработке МРЛК был решен ряд сложных задач. Так, в то время обработка информации РСА на борту оставалась проблематичной из-за влияния траекторных эволюций носителя. Для их учета в различных частях антенны устанавливались акселерометры, с использованием которых производилась обработка на Земле. Реализация активной фазированной решетки (АФАР) позволила решить комплекс проблем: компенсация эволюции носителя; высокий энергетический потенциал РСА; оперативная обработка информации на борту. Предложенное решение исключило необходимость управления спутником для компенсации траекторных искажений.

Необходимо отметить, что примененные решения позволили достигнуть полосы обзора, превышающих полосы большинства космических РСА, существующих на тот момент.

Таблица 2

№ п/п	Параметры	РБО-0,8	РБО-3	РСА-23	РСА-180
1	Длина волны, см	0,8	3	23	180
2	Длительность импульса, мкс сжатого ЛЧМ импульса растянутого ЛЧМ импульса	0,15	0,15	0,15 7	0,25 28
3	Мощность излучения имп, квт	50	100	1,5	0,3
4	Ширина спектра, МГц	6,5	6,5	12	6,5
5	Частота повторения имп., Гц	1000	1000	1000	1000
6	Чувствительность приемника, Вт	10^{-12}	10^{-13}	10^{-14}	5×10^{-14}
7	Коэффициент усиления ант., дБ	33	30	19,4	11
8	Ширина ДН антенны, град: в азимутальной плоскости в угломестной плоскости	0,3 50	0,6 42	3,6 63	35 70
9	Тип антенны	АДИ	ВЦ	АФАР	ФАР
10	Поляризация	ВВ, ГГ, ВГ	ВВ	ВВ, ГГ, ВГ, ГВ	ВВ, ГГ, ВГ, ГВ
11	Полоса обзора, км	15	2×45	15, 30	30, 60
12	Начальный угол обзора, град	20	20	20	20
13	Разрешение, м	30...50*	20...50*	25...50* 2,5...25**	50...100* 10...50**

* цифровая бортовая обработка,

**цифровая наземная обработка

Применение оригинальных систем калибровки потенциала РБО и РСА с использованием линий задержек на СВЧ позволило достигнуть точности измерений до 2 дБ, что обеспечивало потребности большинства измерений параметров объектов природной среды [13].

В рамках настоящего обзора трудно изложить все технические особенности систем, однако опыт длительной эксплуатации в различных условиях подтверждает их эффективность.

Создание конформных антенн для всех систем, включая РСА 1,8 м, позволило сохранить летные качества самолета, что имеет принципиальное значение для изучения труднодоступных районов.

На борту самолета был установлен пункт приема космической информации и создан радиоканал для оперативной передачи получаемой информации на Землю потребителям.

Многоцелевой самолетный радиолокационный комплекс разработан А. И. Калмыковым, В. Н. Цымбалом, А. С. Курекиным, А. Я. Матвеевым, В. В. Иголкиным, М. В. Васильевым, Г. И. Ключко, В. И. Зельдисом, А. С. Левдой, С. А. Шилов, В. Ю. Левантовским, А. И. Логвиненко, В. Б. Ефимовым, А. С. Гавриленко, Л. В. Еленским, С. Е. Яцевичем и др.

3. Практическое использование аэрокосмической информации. По своим техническим характеристикам космический РБО-3 не имел аналогов при практическом изучении океана и льдов. Хотя системы *Seasat*, *Shuttle*, впоследствии *ERS-1*, *Radarsat* и др. имели высокие потенциальные характеристики, практическое исполь-

зование их информации оказалось эффективным лишь для суши. Эффективность РБО «Космос-1500» основывалась, прежде всего, на использовании результатов фундаментальных исследований и подтверждена на практике.

Так, в 1983 г. по данным РБО «Космос-1500» спасен из кризисного положения в тяжелых льдах караван судов (Арктика, пролив Лонга) – рис. 3.

В 1984 г. обнаружен ураган *Diana* на побережье США, проведены синхронные самолетные (США) и космические (СССР) эксперименты, определены точностные возможности измерения параметров ветра (рис. 4).

В 1985 г. проведена операция по спасению судна «Михаил Сомов», затертого во льдах Антарктики – рис. 5.

В 1986 г. патрулировался откол шельфового ледника в Антарктиде со станцией «Дружная-1».

В 1988 г. по данным РБО «Космос-1766» патрулировался процесс таяния снегов в Днепровском каскаде. Обилие снегов грозило катастрофическим наводнением, и опасаясь его, административные органы собирались спустить водохранилища на Восточной Украине. Был бы нанесен огромный материальный и экологический урон. Опасность наводнения усугублялась Чернобыльской катастрофой. Информация РБО оперативно использовалась в штабе паводковой ситуации и позволила избежать подобных потерь в Днепровском каскаде водохранилищ (рис. 5).

В процессе исследований с космическими РБО получен ряд фундаментальных результа-

тов. Совместные синхронные наблюдения облачных структур с помощью оптического сканера и поверхности океана с помощью информации РБО позволили установить, что все основные процессы в системе океан – атмосфера проявляются на поверхности океана в изменении структуры поля волнения (ветра). Именно этим методом идентифицированы серпообразные структуры в радиолокационных изображениях океана, которые оказались проявлением конвективных ячеек. Одним из ярких результатов явилась разработка методики измерения энергетических параметров вихреобразных структур в системе океан – атмосфера, в частности, измерения мощности тропических циклонов (ураганов, тайфунов). Это позволяет задолго до выхода ураганов на сушу измерить их мощность и оценить их опасность, принять необходимые меры. На основании проведенных исследований появилась принципиальная возможность обнаружения зарождения ураганов и их развития.

Впоследствии совместно со специалистами НАСА (США) предложено комплексировать информацию РБО ИСЗ типа «Космос-1500/Океан», которая позволяет оценивать параметры ураганов в океане, с данными спутника *TRMM*, измеряющего интенсивность ливневых дождей после выхода урагана на сушу. Совместные оптические и радиолокационные наблюдения позволили обнаружить весьма интересные кольцевые подповерхностные структуры в ледниках Антарктиды и в Сахаре.

Радиолокационные изображения РБО ИСЗ «Космос-1500» использованы для составления первой радиолокационной карты Антарктиды, на которой обнаруживаются отколы ледников, айсберги, разломы, подповерхностные геологические структуры. Это направление представляет собой интерес в связи с участием Украины в освоении Антарктиды.

С целью широкомасштабного использования информации радиолокаторов типа «Космос-1500/Океан» были подготовлены методические материалы по дешифрированию информации по морю и льдам, а также методическое пособие для стран-участниц программы «Интеркосмос», а все материалы, касающиеся как создания радиолокатора, так и его эксплуатации и обработки данных, были обобщены в монографии [14].

Использование радиолокаторов различных диапазонов позволяло решать широкий круг научных и практических задач. В изучении моря это позволило одновременно анализировать состояние капиллярных, гравитационно-капиллярных и гравитационных волн, на основании чего в сантиметровом диапазоне измерялось поле приводного ветра, а в дециметровом – пространственный спектр волнения. Многочас-

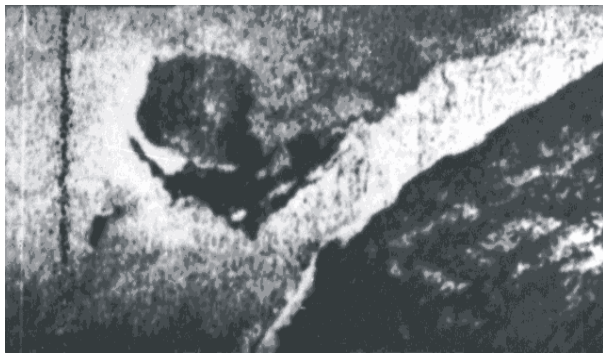
точное зондирование позволило по-новому решать экологические задачи. Например, в предложенной и испытанной технологии информация трехсантиметрового диапазона РБО используется для обнаружения факта разлива нефти, а дециметровый РСА позволяет выделять наиболее опасные участки толстых пленок (рис. 7).

Задачи диагностики льдов также эффективно решались МРЛК. С помощью дециметрового и метрового РСА обнаруживаются айсберги, определяется состояние льдов в летний период, что в сантиметровом диапазоне оказывается затруднительным. При изучении ледников многочастотное зондирование позволяет произвести послойную диагностику их структуры до глубин в несколько километров. Это позволяет обнаруживать трещины, разломы, геологические структуры.

Что касается наблюдений суши, то многочастотное зондирование позволяет разделить вклад в обратное рассеяние, вносимый растительностью и почвой. Так, отражения на 8 мм формируются верхней границей растительности. На 3 см (рис. 8) – слоем растительности и иногда даже верхним слоем почвы. На 23 см – слоем почвы толщиной до нескольких метров. На 1,8 м – слоем глубиной от нескольких до сотни метров. Такое послойное наблюдение позволяет разделить поверхностные и подповерхностные отражения, что обеспечивает возможности решения задач подповерхностного зондирования. При этом глубина наблюдения составляет от нескольких до сотни метров в зависимости от влажности почвы (рис. 9).

Самолет Ил-18Д, оборудованный МРЛК, неоднократно обеспечивал навигацию в Арктике, с его помощью контролировались месторождения нефти и газа на шельфе, обнаружены газоносные соляные купола в Харьковской области, выполнялось экологическое патрулирование морской экономической зоны и др. Круг задач, решаемых МРЛК, весьма широк, что делает рациональным его использование в интересах Украины и международного сотрудничества.

Объектами съемки являлись различные подстилающие поверхности в лесостепной и степной зонах Украины, таежные зоны Забайкалья, некоторые районы Дальнего Востока, пески Кара-Кумов, горы Кавказа, Памира и предгорья Капет-Дага, поймы больших и малых рек, внутренние водоемы, оросительные каналы, заболоченная местность, заснеженные районы Заполярья, тундра, геологические объекты. Получены материалы по районам экологических катастроф в районе Чернобыльской АЭС, Аральского моря, залива Кара-Богазгол. Проводились съемки загрязнений нефтепродуктами в районе Баку («Нефтяные камни») с различными толщинами нефтяных пленок. На морях Тихого и Северного

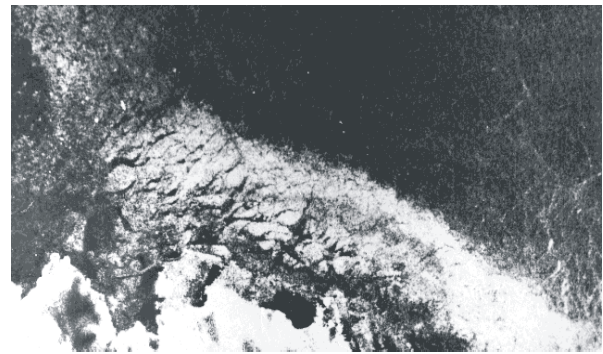


а)



б)

Рис. 3. Спасение каравана судов в проливе Лонга (1983 г.). Радиолокационное а) изображение и тематическая карта б), на которой указано местоположение судов и путь их выхода из ледового плена.



а)



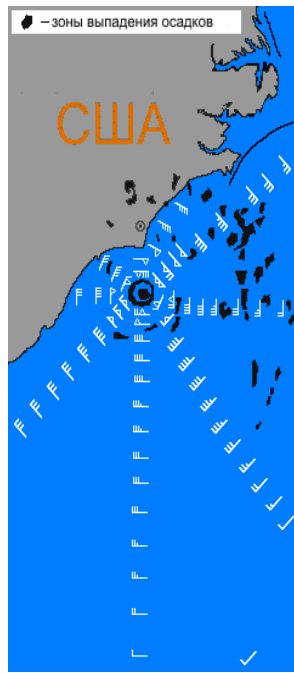
б)

Рис. 5. Спасение судна «Михаил Сомов» (1985 г.), затертого во льдах Антарктики. Радиолокационное а) изображение и тематическая карта б) на которой указано местоположение судна и путь ледокола «Владивосток» при выводе его по трещинам во льду на чистую воду

Условные обозначения к рис. 3, рис. 5: – молодой тонкий лед; – однолетний лед; – толстый многолетний лед; – ледники; – каналы во льдах; – путь спасения судов



а)

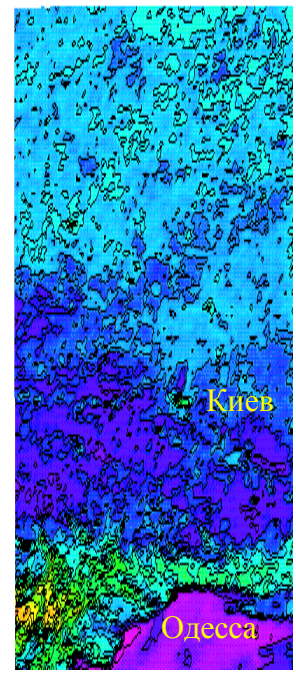


б)

Рис. 4. Радиолокационное а) изображение тропического циклона и тематическая карта б) с изображением «глаза тайфуна» и условными обозначениями скоростей ветра с дискретом 10 м/с.



а)



б)

Рис. 6. Распределение снежного покрова на территории Украины по данным ИСЗ «Сич-1» а) – радиолокационное изображение, б) – тематическая карта



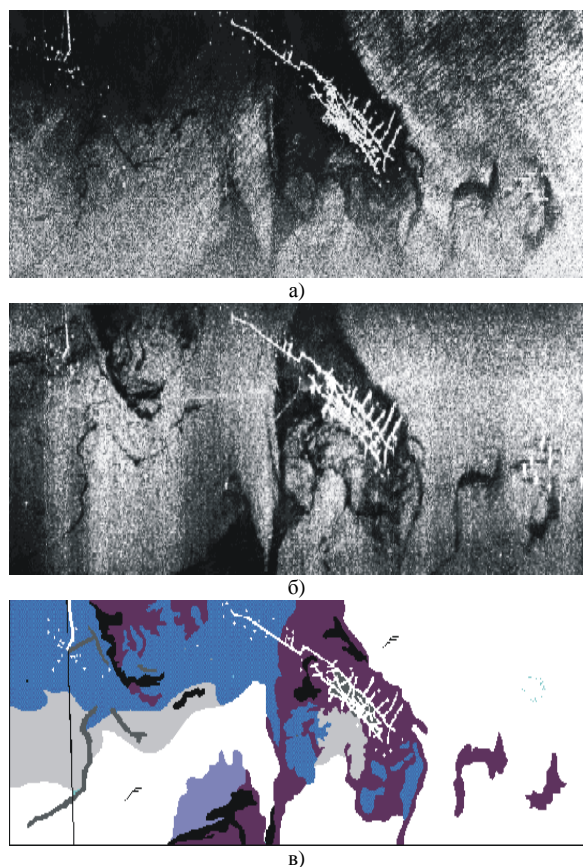


Рис. 7. Контроль загрязнений морской поверхности нефтепродуктами на Каспийском море в районе «Нефтяные камни». РБО 3 – а); PCA 23 – б); тематическая карта – в)

Толщина нефтяной пленки на поверхности моря:
 <math><0,001</math> $0,001 \div 0,05$ $0,05 \div 0,1$ $0,1 \div 0,5$ $>0,5$ мм

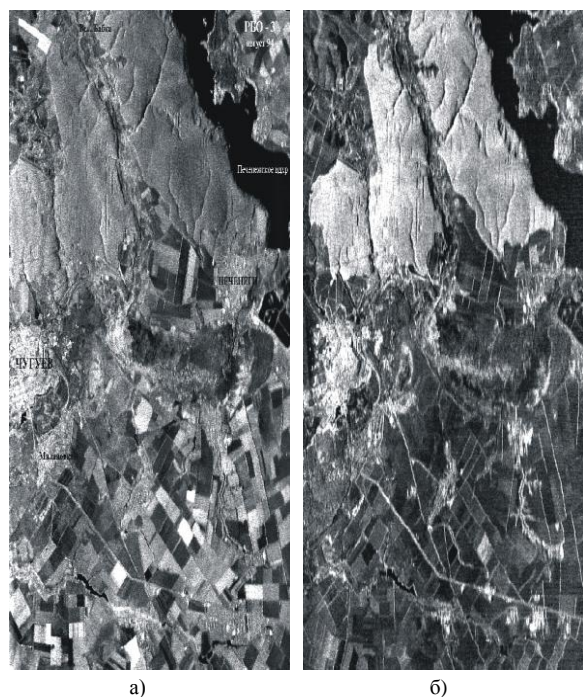


Рис. 8. Сезонные радиоизображения сельскохозяйственных территорий в Харьковской области, полученные РБО 3 в августе а) и октябре б)

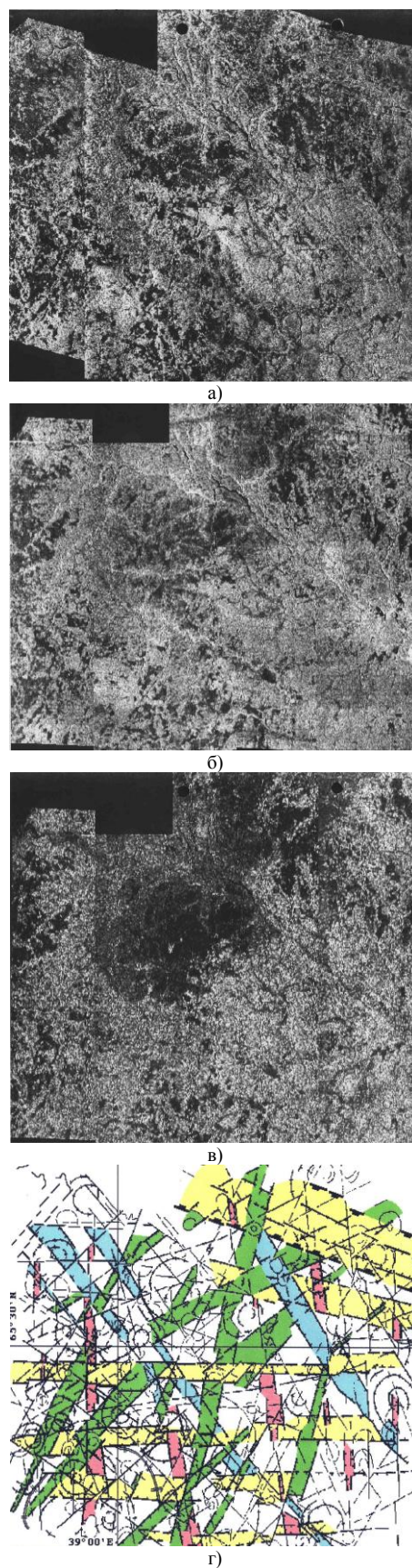


Рис. 9. Многочастотное изображение а) – РБО 3; б) – PCA 23; в) – PCA 180 и тематическая карта г) алмазоносного района в Архангельской области

Ледовитого океанов (Японское, Охотское моря с островами, Баренцево, Карское, Лаптевых и др.) проводились измерения параметров морского волнения и ледовая обстановка (рис. 10). Получены материалы по ледникам на Новой Земле и Земле Франца-Иосифа и ряда других (рис. 11).

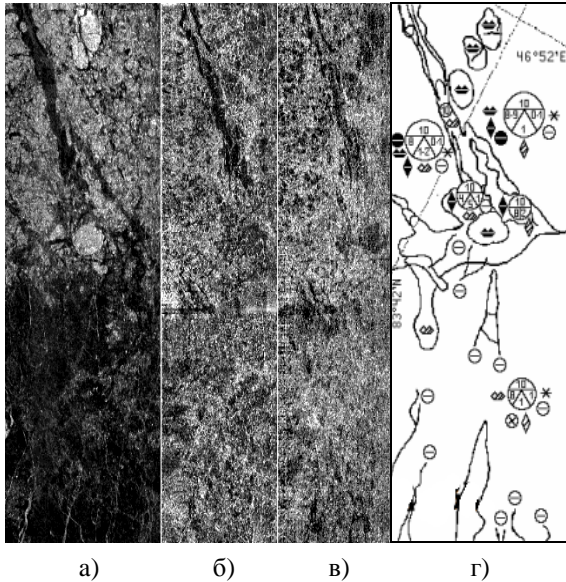


Рис. 10. Многочастотные изображения морских льдов разного возраста: а) – РБО 3; б) – РСА 23; в) – РСА 180; г) – тематическая карта возраста льда, выполненная по международным гляциологическим стандартам

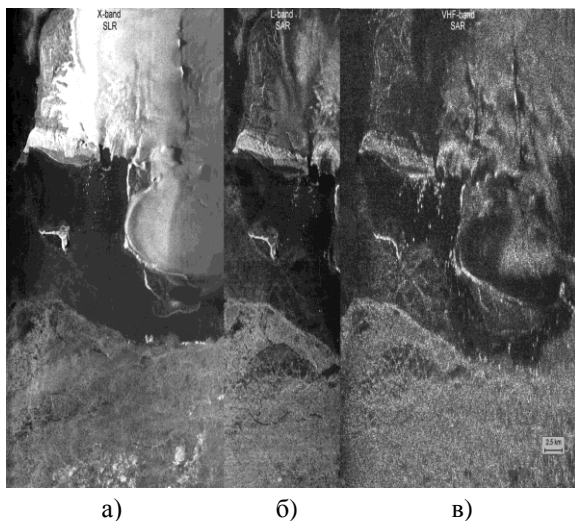


Рис. 11. Многочастотные изображения ледников на земле Франца-Иосифа: а) – РБО 3; б) – РСА 23; в) – РСА 180

Кроме этого, для ряда тестовых полигонов была получена гидрометеорологическая информация и наземные данные, полученные синхронно со съемкой с самолета. Отбирались пробы грунта и растительности с целью получения данных о физико-химических и геометрических параметрах подстилающей поверхности. Эти до-

полнительные данные позволили по-новому подойти к созданию эмпирических и теоретических моделей отражения от различных типов подстилающих поверхностей.

Самолетные исследования, обеспечивая научные потребности, послужили и для отработки методик обработки и дешифрирования информации потребителями, позволили решать различные народно-хозяйственные задачи.

Исследования с борта самолета-лаборатории продолжались до 1995 г. и были свернуты по причинам прекращения финансирования.

Основные научные результаты, полученные сотрудниками Института в процессе работы над аппаратными комплексами, в области теоретических исследований, обработки результатов, внедрения полученных данных потребителю представлены в работах [15-54].

Выводы. Таким образом, начатые более 30 лет назад изучения физической природы рассеяния СВЧ радиоволн морской поверхностью, послужили основой нового научного направления в Академии наук Украины – радиофизических исследований природной среды Земли с аэрокосмических носителей. Отличительной особенностью работ в этом направлении явилось сочетание фундаментальных исследований с разработкой на основе их результатов новой аппаратуры дистанционного зондирования.

Широкий круг научных и практических задач решен с использованием разработанного первого отечественного космического радиолокатора бокового обзора ИСЗ «Космос-1500», внедренного впоследствии в Государственную космическую оперативную эксплуатационную систему «Океан». Позже эту систему предложено использовать для обнаружения критических ситуаций и природных катастроф в интересах мирового сообщества.

Большие перспективы у разработок многоцелевых радиолокационных систем. Самолетный МРЛК, обладая высокими тактико-техническими параметрами, позволяет расширить круг решаемых задач в области дистанционного зондирования и экологического мониторинга; с использованием его данных будут подготовлены потребители на Украине и за рубежом к использованию информации перспективного космического комплекса. Предложенный вариант перспективной космической системы дистанционного зондирования, включающий скаттерометр, РБО и РСА, может быть реализован в дальнейшем в национальной космической программе Украины.

По результатам работ, выполненных с борта самолета лаборатории на протяжении всего времени ее существования, сформирован банк радиолокационных отражений и данных контактных

измерений в самых различных широтных поясах, на основе которого проводятся дальнейшие исследования по установлению взаимосвязи радиолокационных отражений в широком диапазоне частот с широким спектром характеристик самых разнообразных подстилающих поверхностей.

1. Радиоокеанографические исследования морского волнения / Под ред. С. Я. Брауде. – Киев: АН УССР, 1962. – 116 с.
2. Розенберг А. Д., Зельдис В. И., Калмыков А. И. Радиолокационный импульсный когерентный фазометр на волнах 50, 10, 3 и 0,8 см // Тр. Ин-та радиофизики и электроники. – 1962. – 2, № 10. – С.25-38.
3. Басс Ф. Г., Фукс И. М. Рассеяние радиоволн на статистически неровной поверхности. – М: Наука, 1972. – 424 с.
4. Bass F. G., Fuks I. M., Kalmykov A. I., Ostrovsky I. M. Very high frequency radiowaves scattering by a disturbed sea surface. P.1 // IEEE Trans. Antennas and Propag. – 1968. – 16, No. 5. – P. 554-568.
5. А.с 1187119 СССР 22.06.85 г., МКИ⁴G01S 13/89. Радиолокационное устройство обнаружения и измерения параметров нефтяных пленок на водной поверхности / С. А. Величко, А. И. Калмыков, А. П. Пичугин и др.
6. Патент 4.918.456 США, МКИ⁴G01S 13/95. Устройство для определения неравномерностей на водной поверхности / В. А. Дружинин, А. Р. Павленко, А. И. Калмыков, А. П. Пичугин, А. Б. Фетисов // ИСМ. – 1991. – вып. 88, № 13. – С. 32.
7. Bass F. G., Braude S. Ya., Fuks I. M. Radiophysical investigations of sea roughness (radiooceanography) at the Ukrainian Academy of Sciences // IEEE Trans. On Antennas and Propag. – 1977. – 25, No. 1. – P. 43-52.
8. Kalmykov A. I., Pichugin A. P., Sinitsin Yu. A. et. al. Some features of radar monitoring of the oceanic surface from aerospace platform // Int. J. remote sensing. – 1982. – 3, No. 3. – P. 311-325.
9. Шестопалов В. П., Хмыров Б. Е., Калмыков А. И. Комплексные радиофизические исследования ледовых покровов // Докл. АН СССР. – 1983. – 272, № 3. – С. 598-600.
10. Калмыков А. И., Ефимов В. Б., Кавелин С. С. и др. Радиолокационная система ИСЗ «Космос-1500» // Исслед. Земли из космоса. – 1984. – № 5. – С. 84-93.
11. Калмыков А. И., Цымбал В. Н., Ведешин Л. А. и др. Многоцелевая система радиолокационного зондирования природной среды Земли из космоса. Обоснование, выбор параметров и предложения по созданию. – М.: ВИНТИ, 1988. – 99 с.
12. Калмыков А. И., Цымбал В. Н., Курекин А. С. и др. Многоцелевой радиолокационный комплекс исследования Земли «МАРС» // Радиофизика и радиоастрономия. – 1998. – 3, № 2. – С. 119-129.
13. Яцевич С. Е., Курекин А. С., Уваров В. Н. и др. Автоматическая внутренняя калибровка радиолокационных систем дистанционного зондирования // Космічна наука і технологія. – 1991. – 4, № 3. – С. 34-39.
14. Радиолокация поверхности Земли из космоса. Исследования морской поверхности, ледяного и ледникового покровов с помощью спутниковой радиолокационной станции бокового обзора / Под ред. Л. М. Митника, С. В. Викторова. – Л.: Гидрометеоздат, 1990. – 200 с.
15. Басс Ф. Г., Синицын Ю. А. О рассеянии радиоволн ледовыми покровами // Изв. вузов. Радиофизика. – 1983. – 26, № 6. – С. 746-755.
16. Синицын Ю. А. К теории рассеяния волн неоднородной слоистой средой со статистически неровными границами // Изв. вузов. Радиофизика. – 1984. – 27, № 10. – С. 1256-1266.
17. Тимченко А. И., Синицын Ю. А., Ефимов В. Б. Моделирование процессов рассеяния радиоволн ледовыми покровами // Изв. вузов. Радиофизика. – 1985. – 28, № 7. – С. 816-822.
18. Тимченко А. И. Рассеяние электромагнитного излучения в неоднородном ледовом слое с шероховатыми границами // Изв. вузов. Радиофизика. – 1986. – 29, № 1. – С. 55-61.
19. Kulemin G. R., Shcherbinin I. V., Yatsевич S. E. et. al. Physical Principles of Microwave Remote Sensing of Terrains // Proc. of the 6th physics international school «Microwave physics and technique» – Varna (Bulgaria). – World Scientific Publ.Co. Singapore, Utopia Press. – 1989. – P. 16-33.
20. Калмыков А. И., Фукс И. М. Модели рассеяния радиоволн подстилающей поверхностью и их учет в системах радиолокационного зондирования // Радиофизика и радиоастрономия. – 1996. – 1, № 1. – С. 31-41.
21. Калмыков А. И., Тимченко А. И., Щербинин И. В. Возможности исследования подповерхностных объектов с помощью радиолокационного зондирования. – Харьков, 1990. – 26 с. – (Препр. / АН УССР. Ин-т радиофизики и электрон.; № 90-13).
22. Кулемин Г. П., Харченко Т. Н., Яцевич С. Е. Дистанционное зондирование снега радиолокационными методами. – Харьков, 1992. – 36 с. – (Препр. / НАН Украины, Ин-т радиофизики и электрон.; № 92-80).
23. Калмыков А. И., Фукс И. М., Цымбал В. Н. и др. Радиолокационные наблюдения сильных отражателей, расположенных под слоем почвы. Модель подповерхностных отражений. – Харьков, 1993. – 30 с. – (Препр. / АН УССР. Ин-т радиофизики и электрон.; № 93-6).
24. Калмыков А. И., Курекин А. С., Ефимов В. Б. и др. Радиолокатор бокового обзора ИСЗ «Космос-1500» // Исслед. Земли из космоса. – 1985. – № 3. – С. 150-83.
25. Гавриленко А. С., Крижановский В. В., Кулешиов Ю. А. и др. Комплекс радиофизической аппаратуры для дистанционного зондирования природной среды. – Харьков, 1986. – 39 с. – (Препр. / АН УССР. Ин-т радиофизики и электрон.; № 321).
26. Калмыков А. И., Пичугин А. П., Синицын Ю. А. и др. Особенности обработки радиолокационной информации о земной поверхности с аэрокосмический носителей // Исслед. Земли из космоса. – 1983. – № 6. – С. 91-96.
27. Kalmykov A. I., Tsymbal V. N., Matveev A. Ya. et al. The Two-Frequency Multipolarisation L/VHF Airborne SAR for Sub-surface Sensing // AE International Journal of Electronics and Communications. Archiv Electronik und bertragungstechnik. – 1996. – 50, No. 2. – P. 145-149.
28. Kalmyko A. I., Blinkov A. N., Sytnik O. V. et al. A multi-purpose radar system for remote sensing of the Earth: General concept // Proc. of the 6th physics international school «Microwave physics and technique». – Varna (Bulgaria). – World Scientific Publ. Co. Singapore, Utopia Press. – 1989. – P. 34-50.
29. Калмыков А. И., Синицын Ю. А., Сытник О. В., Цымбал В. Н. Информативность радиолокационных систем зондирования Земли из космоса // Изв. вузов СССР. Радиофизика. – 1989. – 32, № 9. – С. 1055-1062.
30. Калмыков А. И., Сытник О. В., Цымбал В. Н. Анализ возможностей многоцелевых радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли из космоса // Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника. – 1992. – 35, № 4. – С. 18-25.
31. Кулемин Г. П., Курекин А. С. Влияние условий распространения на точность калибровки РЛС дистанционного зондирования // Радиолокационные системы летательных аппаратов. – Харьков: ХАИ, 1991. – С. 86-95.
32. Пичугин А. П., Пустовойтенко В. В., Фетисов А. Б. и др. Оперативная обработка радиолокационной информации на борту ИСЗ «Космос-1500» // Исслед. Земли из космоса. – 1985. – № 3. – С. 93-102.
33. Калмыков А. И., Пичугин А. П., Цымбал В. Н. Определение поля приводного ветра радиолокационной системой бокового обзора ИСЗ «Космос-1500» // Исслед. Земли из космоса. – 1985. – № 4. – С. 65-77.
34. Калмыков А. И., Пичугин А. П., Цымбал В. Н., Шестопалов В. П. Радиофизические наблюдения из космоса мезомасштабных образований на поверхности океана // Докл. АН СССР. – 1984. – 279, № 4. – С. 860-862.

35. Калмыков А. И., Назиров М., Никитин П. А., Спиридонов Ю. Г. Об упорядоченных мезомасштабных структурах на поверхности океана, выявленных по данным радиолокационных съемок из космоса // Исслед. Земли из космоса. – 1985. – № 3. – С. 41-47.
36. Величко С. А., Калмыков А. И., Синицын Ю. А. и др. Радиолокационные исследования мезомасштабных процессов взаимодействия океана и атмосферы с аэрокосмическими носителями // Докл. АН СССР. – 1989. – 308, № 2. – С. 353-357.
37. Kalmykov A. I., Velichko S. A., Tsybmal V. N. et al. Observations of the Marine Environment from Spaceborne Side-Looking Real Aperture Radars // Remote sens. Envir. – 1993. – 45. – P. 193-208.
38. Калмыков А. И., Цымбал В. Н. Использование радиолокационной спутниковой информации для изучения поля приводного ветра // В кн.: Методические указания по комплексному использованию спутниковой информации для изучения морей. – Л.: Гидрометеоздат, 1987. – С. 100-136.
39. Уткин В. Ф., Шестопалов В. П., Калмыков А. И. и др. Возможности определения параметров тропических циклонов по радиолокационным изображениям из космоса // Докл. АН СССР. – 1986. – 301, № 2. – С. 331-333.
40. Калмыков А. И., Пичугин А. П. Особенности обнаружения неоднородностей морской поверхности радиолокационным методом // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1981. – 17, № 7. – С. 754-761.
41. Ефимов В. Б., Калмыков А. И., Комяк В. А. и др. Исследование ледовых покровов радиофизическими средствами с аэрокосмических носителей // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1985. – 21, № 5. – С. 512-520.
42. Ефимов В. Б., Комяк В. А., Курекин А. С. и др. Исследование состояния ледниковых покровов Антарктиды с помощью радиофизической аппаратуры // Исслед. Земли из космоса. – 1990. – № 4. – С. 3-11.
43. Yefimov V. B., Kalmykov I. A., Timchenko A. I., Yacevich S. E. The features of radar observation of snow cover from the satellite «Sith-1» // Proc. 27th International Symposium on Remote Sensing of Environment, June 8-12, 1998, Tromso (Norway). – 1995. – P. 338-342.
44. Ефимов В. Б., Комяк В. А., Курекин А. С. и др. Применение радиолокации Земли из космоса в гидрометеорологии // Космічна наука та технологія. – 2000. – 6, № 5. – С. 16-28.
45. Boyev A. G., Karvitsky G. E., Matveyev A. Ya. Tsybmal V. N. Evaluation of Oil Film Parameters on the Sea Surface Using Multifrequency Radar Data // Telecommunications and Radio Engineering. – 1997. – 51, No. 8. – P. 4-12.
46. Белоброва М. В., Боев А. Г., Иванов В. К. и др. Результаты многочастотного радиолокационного мониторинга неоднородностей волнения морской поверхности // Космічна наука і технологія. – 2002. – 8, № 2. – С. 275-278.
47. Belobrova M. V., Boyev A. G., Ivanov V. K. et al. Experimental Multifrequency Investigations into the Sea Surface Roughness Inhomogeneities through the Use of the «MARS» Radar System // Proc. 4th European Conf. on Synthetic Aperture Radar, EUSAR 2002 Cologne (Germany). – 2002. – P. 733-736.
48. Боев Г. А., Матвеев А. Я. Оценка количества разлитой нефти на акватории каспийского промысла «Нефтяные камни» по данным многочастотного радиолокационного зондирования // Радиофизика и радиоастрономия. – 2005. – 10, № 2. – С. 178-188.
49. Белоброва М. В., Иванов В. К., Калмыков И. А. и др. Экспериментальное изучение пространственных неоднородностей рассеяния радиоволн в зоне течения Гольфстрим // Изв. вузов. Радиофизика. – 2001. – XLIV, № 12. – С. 1031-1038.
50. Иванов В. К., Пащенко Р. Э., Стадник А. М., Яцевич С. Е. Фрактальный анализ изображений лесных массивов // Успехи совр. радиоэлектрон. – 2005. – № 12. – С. 55-62.
51. Иванов В. К., Пащенко Р. Э., Стадник А. М., Яцевич С. Е. Применение фрактального анализа при обработке радиолокационных изображений сельскохозяйственных полей // Успехи совр. радиоэлектрон. – 2007. – № 5. – С. 48-55.
52. Кулемин Г. П., Яцевич С. Е. Взаимосвязь обратного рассеяния радиоволн СВЧ диапазона с параметрами растительного покрова и открытых почв при дистанционных методах зондирования // Успехи совр. радиоэлектрон. – 2004. – № 3. – С. 24-34.
53. Фрактальный анализ процессов, структур и сигналов / Под ред. Р. Э. Пащенко. – Харьков: ХОО «НЭО «Эко-Перспектива», 2006. – 348 с.
54. Радиолокационные методы и средства оперативного дистанционного зондирования Земли с аэрокосмических носителей / Под ред. С. Н. Конюхова, В. И. Драновского, В. Н. Цымбала. – Киев: ООО НТЦ «Авиадиагностика», изд. «Джулия принт», 2007. – 439 с.

DEVELOPMENT OF METHODS OF REMOTE SENSING OF THE EARTH AT THE IRE NAS OF UKRAINE

V. K. Ivanov, S. Ye. Yatsevich

History of development of radiophysical methods of the remote sensing of terrain from aerospace facilities in A. Ya. Usikov Institute of Radiophysics and Electronics of NAS of Ukraine in the second half of 20th century is considered. Main features of spaceborn and airborne side-looking radars are presented. Obtained results and prospects of development of remote sensing methods are discussed.

Key words: remote sensing, radar, processing of data.

РОЗВИТОК МЕТОДІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ В ІРЕ НАН УКРАЇНИ

В. К. Иванов, С. Є. Яцевич

Розглянуто історію розвитку радіофізичних методів та засобів дистанційного зондування поверхні Землі з аерокосмічних носіїв в Інституті радіофізики і електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України в другій половині ХХ-го століття. Надано основні характеристики космічних і авіаційних радіолокаторів бічного огляду. Обговорюються отримані результати і перспективи розвитку дистанційних методів.

Ключові слова: дистанційне зондування, радіолокація, обробка даних.

Рукопись поступила 23 апреля 2008 г.