

В.В. Пустовойтенко, А.С. Запевалов, Ю.В. Терехин

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь

**СПУТНИКОВЫЕ СРЕДСТВА ОПЕРАТИВНОЙ
ОКЕАНОГРАФИИ:
РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ БОКОВОГО ОБЗОРА**

В последнее десятилетие в области морских наук и технологий возникло и продолжает развиваться новое направление – оперативная океанография, опирающееся на широкое использование информации, получаемой с помощью спутниковых наблюдательных систем: оптических – работающих в видимом и инфракрасном диапазонах, радиофизических – активных (радиолокационных) и пассивных (радиометрических) и др.

В статье в сжатой форме рассматриваются основные моменты возникновения и эволюции океанографических радиолокационных станций бокового обзора космического базирования и прослеживаются тенденции их развития на современном этапе.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *космический аппарат, морская поверхность, мониторинг, океанография, радиолокация, радиолокационная система, радиолокационная станция.*

Введение. В XXI столетии жизнь человечества немыслима без широкого использования спутниковых методов, средств и технологий как в сфере науки и техники, так и в повседневной жизни. В области наук о Земле их использование позволило перейти от эпизодического наблюдения фрагментов процессов, протекающих в земной атмосфере, на земной поверхности и на поверхности (в глубине) морей и океанов, к их наблюдению и изучению как единого целого в глобальных масштабах практически в реальном времени. Спутниковые технологии плотно окружают нас и в повседневной жизни – это спутниковое телевидение и связь, спутниковая навигация (использование *GPS*-навигаторов, например, позволяет ориентироваться в незнакомой местности с точностью до нескольких метров) и т.д. И этот список можно было бы продолжать и продолжать.

В последнее десятилетие в области морских наук и технологий возникло и продолжает развиваться новое направление – оперативная океанография [1, 2], опирающееся на широкое использование информации, получаемой с помощью спутниковых наблюдательных систем: оптических – работающих в видимом и ИК-диапазонах, радиофизических – активных (РЛ-) и пассивных (радиометрических) и др.

В настоящее время сформировалось три класса РЛ-систем космического базирования, информация которых широко используется при мониторинге морских акваторий: радиолокационные скаттерометры – используются для получения информации о параметрах крупномасштабных полей ветра в приводном слое атмосферы (скорость и направление ветра); радиолокаци-

онные альтиметры (высотомеры) – используются для получения данных о реальной топографии морской поверхности и о характеристиках волнения (значимая высота морских волн) и приводной атмосферы (скорость ветра); РЛС БО – информация в виде РЛ-снимков (изображений) разной степени детализации, зависящей от величины их пространственной разрешающей способности, широко используется для контроля состояния ледовых полей, для выявления областей морских акваторий, загрязненных поверхностно-активными веществами, в том числе – содержащими нефтепродукты, для обнаружения зон, опасных для мореплавания и т.д.

В статье в сжатой форме рассматриваются основные моменты возникновения и эволюции океанографических РЛС БО космического базирования и прослеживаются тенденции их развития на современном этапе.

Экспериментальные и теоретические исследования рассеяния радиоволн взволнованной морской поверхностью. Радиоокеанография. Полученный в годы Второй мировой войны опыт использования РЛС показал, что задача обнаружения морских целей значительно сложнее задачи обнаружения воздушных целей, особенно, когда речь идет о работе на предельных дальностях: к удивлению специалистов, морская поверхность, на которой, как в то время представлялось, отсутствовали какие-либо видимые отражатели, создавала интенсивный РЛ-сигнал, маскирующий сигналы, формируемые надводными целями (кораблями). Это стимулировало постановку экспериментальных и теоретических работ, направленных на изучение явления рассеяния радиоволн взволнованной морской поверхностью.

Для экономии места и времени мы не будем здесь детально рассматривать историю развития этих исследований и останавливаться на полученных при этом результатах – читатель без труда может ознакомиться с ними в монографии Д.Е. Керра, вышедшей на английском языке в США в 1951 г. [3] и в переводе на русский язык в 1954 г. [4]. Некоторые из этих результатов представлены также в «Справочнике по радиолокации» [5]. Интересен в этом плане и обзор Р.К. Мура (*R.K. Moore*) и А.К. Фэна (*A.K. Fung*), обобщивший результаты более поздних исследований [6, 7].

Весомым вкладом в изучение природы рассеяния радиоволн морской поверхностью стала фундаментальная работа Д.Д. Кромби (*D.D. Crombie*) [8], пролившая свет на физический механизм это явления – на существование *резонансного* рассеяния радиоволн (автор использовал РЛС с длиной волны около 22 м)¹. К концу 60-х – началу 70-х годов в радиофизике (в значительной степени благодаря усилиям специалистов ИРЭ АН УССР) в основном была завершена разработка физических основ теории рассеяния радиоволн взволнованной морской поверхностью, что позволило с единых позиций объяснить основные закономерности этого явления, наблюдаемые в широком частотном диапазоне – от радиоволн гектометровых до радиоволн миллиметровых [9, 10], создана двухмасштабная электродинамическая модель рассеивающей поверхности² [10, 11]. Отметим также, что подобные работы проводились не только в СССР, но и в других странах мира – в США в частности (см., например³, [12]).

По мере накопления знаний о физике формирования РЛ-сигнала взволнованной морской поверхностью пришло понимание того, что она, в РЛ-смысле, является не только источником мощных помех, существенно ус-

ложняющих решение основной задачи – задачи обнаружения и сопровождения надводных целей, но также является и источником сигналов, несущих информацию непосредственно о характеристиках и параметрах как самой поверхности, так и поля ветра вблизи нее. Примечательно, что одними из первых взглянули на РЛ-сигнал с этой точки зрения именно украинские ученые-радиофизики, заложившие основы для возникновения на стыке радиофизики и физики моря нового научного направления – «радиоокеанографии» [10, 13 – 17], развившегося в последующем в «спутниковую гидрофизику» [18 – 20] и «оперативную океанографию» [1, 2].

В конце 70-х – начале 80-х годов арсенал космических средств дистанционного зондирования Земли пополнился радиофизическими системами: пассивными (радиометрическими) и активными (радиолокационными). Это, в свою очередь, стимулировало дальнейшие исследования особенностей структуры морской поверхности и влияния ее изменчивости на характеристики РЛ-сигнала, формируемого ею в различных гидрометеорологических условиях. Работы этой направленности ведутся и в настоящее время – среди множества экспериментальных и теоретических работ, опубликованных за последние три-четыре десятилетия, не претендуя на полноту⁴, отметим, например, работы [21 – 29].

Бортовые авиационные системы РЛ-мониторинга морских акваторий. Первые попытки наблюдения земной поверхности (включая морскую) и обнаружения на ней различных объектов с помощью бортовых РЛС были предприняты еще в годы Второй мировой войны. Однако, вследствие малой пространственной разрешающей способности РЛ-средств тех лет, получаемые с их помощью изображения существенно уступали по информативности и детализации оптическим (фотографическим). В послевоенные годы проблема повышения разрешающей способности бортовых РЛС решалась путем:

– физического увеличения линейных размеров антенных систем, что стало основой для создания некогерентных РЛС БО, (в зарубежной литературе – *SLAR*) с длинными вдольфюзеляжными антеннами (улучшение разрешающей способности систем в азимутальной плоскости, в направлении полета);

– использования когерентных сигналов с последующей их специальной обработкой, что стало основой для создания РЛС, получивших название РЛС БО с синтезируемой апертурой приемной антенны (РСА, в зарубежной литературе – *SAR*) (улучшение разрешающей способности систем в азимутальной плоскости, в направлении полета);

– использования широкополосных зондирующих сигналов (например – с ЛЧМ с последующей их специальной обработкой), что стало основой для развития методов сжатия импульсов (улучшение разрешающей способности системы в угломестной плоскости, в направлении зондирования)⁵, нашедших свое широкое применение как при построении видовых, ориентированных на получение изображений поверхности, РЛ-систем мониторинга, так и при создании прецизионных спутниковых альтиметрических систем.

В качестве примеров отечественных⁶ РЛС БО с реальной апертурой приемных антенн, применяемых для РЛ-мониторинга морских акваторий и поверхности суши, назовем РЛС БО «Игла» (1968 г.), «Торос» (1968 г.), «Нить» (1978 г.), «Нить-К» (1980 г.) и созданную в последние годы РЛС БО

«Айсберг-Разрез», которые устанавливаются на борту самолетов Ил-20, Ил-24Н, Ан-24, Ту-134 [30 – 34].

Развитие авиационной техники, радиотехники и электроники позволило создать в 60-х годах системы дальнего радиолокационного обнаружения и управления – ДРЛОиУ, AWACS. Поскольку доступ к получаемой с их помощью информации в целях оперативного мониторинга морских акваторий практически не возможен, мы не будем рассматривать характеристики этих систем. Укажем только, что первым отечественным самолетом этого класса стал Ту-126 (оснащен РЛ-системой «Лиана», принят в эксплуатацию в начале 60-х годов, эксплуатировался вплоть до начала 90-х годов, заменен авиационным комплексом А-50, созданным на основе самолета Ил-76МА [35, 36]). Существовали разработки систем AWACS на основе и других самолетов – в том числе, на основе самолетов, созданных в АНТК им. О.К. Антонова.

Комплекс АКДЗ-30 МЧС Украины. В плане мониторинга морских акваторий бóльший интерес представляют самолеты-лаборатории, оснащенные многофункциональными комплексами ДЗЗ, способными решать широкий круг задач морской тематики. В качестве примера назовем авиационный комплекс дистанционного зондирования природной среды АКДЗ-30, созданный усилиями специалистов ЦРЗЗ им. А.И. Калмыкова в содружестве со специалистами ЦАКИЗ ИГН НАН Украины и АНТК им. О.К. Антонова при организационно-финансовом содействии ООО «Экомон» [37 – 40] на основе самолета МЧС Украины Ан-30. Комплекс состоит из согласованных по своим технико-информационным характеристикам систем ДЗЗ: двухчастотной радиолокационной (РЛС БО 8-мм диапазона и РСА 23-см диапазона) системы, сканера ИК-диапазона, многоканального видеоспектрометра, аэрофотоаппарата, приемника системы GPS, комплексов бортовой и наземной обработки и интерпретации данных и предназначен для решения широкого круга практических и научных задач, включая задачи оперативной океанографии. Его внешний вид показан на рис. 1.

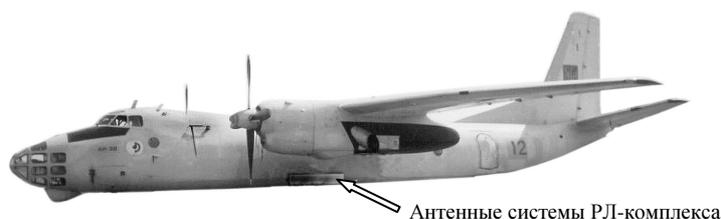


Рис. 1. Самолет МЧС Украины Ан-30 с комплексом аппаратуры ДЗЗ на борту.

К сожалению, современная экономическая ситуация не позволяет финансировать работу комплекса АКДЗ-30, несмотря на то, что, как нам представляется, его использование в акватории Черного и Азовского морей позволило бы повысить эффективность и, что весьма важно, оперативность проводимых природоохранных работ. Обнадеживающие примеры использования этого комплекса для выявления областей морской поверхности, покрытых пленками ПАВ – и прежде всего пленками, содержащими в своем составе нефтепродукты, приведены, например, в [39 – 41].

Комплекс экологического патрулирования Do-228. Подобные комплексы ДЗЗ широко используются для мониторинга морских акваторий странами Европейского сообщества, входящими в Хельсинскую комиссию (Хелком) ⁷: Германией, Финляндией, Данией, Швецией и др. В качестве примера назовем многоцелевой самолет экологического патрулирования *Dornier Do-228*, созданный немецкой фирмой *Dornier* (см., например, [42]), внешний вид которого показан на рис. 2.



Рис. 2. Самолет экологического патрулирования *Dornier Do-228 LM* (Германия) [42]. Цифрой 1 обозначена антенна РЛС БО.

На его борту установлен многофункциональный комплекс аппаратуры ДЗЗ, в состав которого входят: обзорная радиолокационная станция, РЛС БО с реальной апертурой антенны, два СВЧ-радиометра («морской» и «атмосферный»), сканеры, работающие в ИК- и УФ-диапазонах, телевизионная камера (видеокамера), работающая в видимом диапазоне и лазерный флуориметр. Комплекс способен обнаруживать и *распознавать* на морской поверхности пленки нефтепродуктов толщиной от (0,1 – 20) мкм до 2,5 мм.

Работа системы состоит из двух фаз: поиск и распознавание. В поиске задействованы радиофизические и оптические средства. После обнаружения объектов система переводится в режим распознавания, в котором основными средствами измерения являются лазерный флуориметр и СВЧ-радиометры. Методология распознавания основана на различии между собой спектров флуоресценции пленок, содержащих нефтепродукты и не содержащих их (см., например [43]). К сожалению, нам не удалось найти данных, характеризующих эффективность названных систем именно как средств распознавания: вероятность правильного распознавания, вероятность ошибки распознавания (ложной тревоги) и др.

Начало космической радиоокеанографии. Спутниковые РЛ-системы мониторинга морских акваторий «УС-А», «Skylab», «Seasat», «Lacrosse». Успехи в развитии радиофизики и космической техники позволили приступить в 60-х годах прошлого столетия к созданию спутниковых радиофизических систем мониторинга морских акваторий. Напомним читателю, что исторически первыми такими системами стали радиометрические комплексы, работавшие на борту КА «Космос-243» (запущен 23 сентября 1968 г.) и «Космос-384» (запущен 10 декабря 1970 г.) – см., например, [44 – 46].

В 60-х – 70-х гг. начато создание спутниковых РЛ-систем мониторинга морских акваторий. Первым в их семействе стал КА УС-А (управляемый спутник, активный), входивший в состав системы МКРЦ «Легенда». [47, 48]. Целевым назначением КА являлось решение «классической» радиолокационной задачи – обнаружение и определение координат кораблей. КА был

принят в штатную эксплуатацию в 1975 г. и эксплуатировался до 1988 г., получая при запуске имя «Космос» с очередным порядковым номером. Общее представление о КА дает рис. 3, заимствованный из [48].

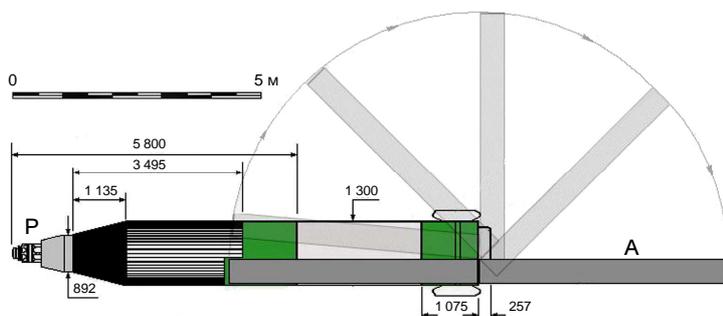


Рис. 3. КА типа «УС-А» [48]: P – реакторный отсек; A – антенна РЛС БО.

Обратим внимание читателя на антенну РЛС БО: она имела длину около 10 м и состояла из двух разворачиваемых в космосе секций. РЛС БО работала в частотном диапазоне 8,2 ГГц (длина волны ~ 3,6 см) и, по имеющейся в разрозненных источниках информации, была способна различать на фоне морской поверхности при умеренном волнении корабли класса фрегат. Более детальной информации о характеристиках РЛС БО нам найти не удалось.

КА запускались на низкие орбиты, что обеспечивало наиболее оптимальные условия работы РЛС БО, но эффективность солнечных батарей того времени на этих высотах оказывалась недостаточной для обеспечения электропитания РЛС БО. Поэтому специально для этого КА была создана бортовая ядерная энергетическая установка. Время от времени при эксплуатации КА возникали нештатные ситуации – наибольший резонанс получило падение 24 января 1978 г. КА «Космос-954» на территорию Канады (район Большого Невольничьего озера): его фрагменты разлетелись по площади около 100 тыс. кв. км. – было найдено около 100 фрагментов КА, имевших разную степень радиоактивности [49].

В 1973 г. американскими исследователями на борту ДОС «Skylab» был проведен эксперимент *EREP*, направленный на изучение возможностей радиофизических и оптических (включая ИК-диапазон) систем ДЗЗ. Эксперимент подтвердил существовавшие к тому времени представления о природе и закономерностях формирования земной поверхностью информационных сигналов в различных диапазонах электромагнитных волн (см., например, [50]).

27 июня 1978 г. на орбиту ИСЗ был запущен целевой океанографический КА «Seasat», оснащенный многофункциональным РЛ-комплексом дистанционного зондирования [51]. Его запуск можно рассматривать как один из этапов ЛКИ основных спутниковых радиоокеанографических систем ДЗЗ морских акваторий: скаттерометра, альтиметра и РЛС БО с синтезированием апертуры приемной антенны. И хотя КА проработал на орбите менее четырех месяцев, в ходе его полета была продемонстрирована возможность получения океанографической информации с помощью спутниковых РЛ-систем⁸.

Одновременно в США велись работы по созданию КА РЛ-разведки, получившего название «*Lacrosse* (Клюшка)», в связи с чем размещение на борту КА «*Seasat*» РСА некоторые исследователи рассматривают как этап ЛКИ РСА для КА «*Lacrosse*». Первый из КА этого типа был запущен на орбиту ИСЗ 2 декабря 1988 г. в полете *STS-27* многоразового транспортного космического корабля «*Space Shuttle Atlantis*». В настоящее время на орбите находится группировка из четырех таких КА (№№ 2, 3, 4 и 5), запускавшихся уже с помощью ракеты-носителя «*Titan IV-A*» с космодрома *Vandenberg AFB* (*Vandenberg Air Force Base*). Работают КА в интересах военных ведомств США и НАТО. И хотя информация, получаемая с помощью этого КА, ввиду специфики целевого назначения, для массового потребителя недоступна, для нас он представляет интерес тем, что на борту КА, по-видимому впервые, была установлена многорежимная РЛС БО (см., например, [52 – 54]).

Радиолокационные системы «Меч-К», «Меч-КУ», «Траверс». Как мы уже отмечали, первой отечественной спутниковой РЛ-системой мониторинга морских акваторий является РЛС БО, работавшая на борту КА УС-А. Для нас она интересна тем, что на ее основе в последующем были созданы РЛ-системы «Меч-К» и «Меч-КУ», работавшие на борту КА «Космос-1870» и «Алмаз-1», и РСА «Траверс», запускавшаяся в космос на борту КА «Ресурс-О» № 1 и на борту ДОС «Мир» [55 – 57]. Основные технические характеристики этих РСА перечислены в табл. 1.

Таблица 1. Основные характеристики РЛ-систем космического базирования «Меч-К», «Меч-КУ» и «Траверс» [57].

Характеристики и параметры	Наименование РЛ-системы		
	Траверс	Меч-К	Меч-КУ
1. Космический аппарат	Ресурс-О (Космос-1689)	Космос-1870	Алмаз-1
2. Период эксплуатации:			
начало	03.10.85	25.07.87	31.03.91
завершение	25.12.86	30.07.89	10.10.92
3. Рабочая длина волны, см	8	9,6	9,6
4. Поляризация	ВВ или ГГ	ГГ	ГГ
5. Пространственное разрешение, м:			
по дальности	150	18 – 20	12 – 15
по азимуту	150	15 – 20	10 – 15
6. Ширина полосы захвата, км	50	20	45 / 200
7. Ширина полосы обзора, км	50	2 × 300	2 × 350

Используемая в станциях горизонтальная поляризация излучаемого и принимаемого сигналов (ГГ) позволяла, с одной стороны, повысить различимость объектов на фоне морской поверхности, а с другой – повысить «рельефность» РЛ-изображений морской поверхности за счет большей чувствительности к вариациям уклонов морской поверхности (см., например, [10, 11])⁹. Вместе с тем отметим, что нам не удалось найти в доступной литера-

туре упоминаний о РЛ-мониторинге морских акваторий с борта ДОС «Мир», проводившемся с помощью РЛС «Траверс».

Оперативная океанографическая система «Океан» - «Січ». В 1976 – 1977 гг. в СССР была начата разработка оперативной государственной космической системы изучения природных ресурсов Земли «Ресурс» в составе одной неоперативной (фотографической) подсистемы «Ресурс-Ф» и двух оперативных подсистем: «Ресурс-О» и «Океан» [58 – 60]. Первый из КА подсистемы «Океан» – «Океан-Э № 1 (Космос-1076)», запущен 12.02.79 г. Он был оснащен радиометрическими комплексами, работающими в ИК- и СВЧ-диапазонах ¹⁰. На борту КА «Океан-Э, № 2 (Космос-1151)» (запущен 23.01.80 г.) был проведен технологический эксперимент, направленный на отработку элементов бортовой РЛ-системы. Его результаты стали основой для создания РЛС БО, работавшей в качестве штатной системы РЛ-мониторинга на борту КА «Космос», «Океан», «Океан-О», «Січ» и «Січ-1М», запускавшихся на орбиту ИСЗ в период с 1983 по 2004 г. ¹¹. Результаты работы РЛС БО на борту КА «Океан-ОЭ, № 1 (Космос-1500)» ¹² были настолько убедительны, что в сжатые сроки было организовано ее производство на одном из предприятий радиотехнической промышленности Украины. Последний запуск этой РЛС БО состоялся 24.12.2004 г. в составе бортового комплекса аппаратуры ДЗЗ КА «Січ-1М».

Конструкция КА «Космос-1500», состав и характеристики установленной на его борту аппаратуры ДЗЗ неоднократно рассмотрены в научно-технической печати и справочниках (см., например, [39, 58 – 66]), научные задачи, решаемые запуском КА «Космос-1500», сформулированы в [39, 61, 67], результаты выполненных работ рассмотрены в статьях тематического выпуска журнала «Исследование Земли из космоса» [63], в монографиях (см., например, [39, 61]). Общее представление о КА дает рис. 4.

Характерными элементами его конструкции являются: герметичный корпус (1), направленный в полете днищем на Землю, груз гравитационной системы ориентации (2) ¹³, раскрывающиеся на орбите панели (3), на которых размещены элементы комплексов служебной аппаратуры и аппаратуры ДЗЗ. Помещенная в рупор волноводно-щелевая антенна РЛС БО (4) имеет длину около 11 м и ширину в раскрытии рупора 4 см и состоит из пяти секций, разворачиваемых на орбите «в линию» (для сравнения: антенна РЛС БО КА «УС-А» состояла из двух секций – см. рис. 3).

Основные технические характеристики РЛС БО приведены в табл. 2. Обратим внимание на то, что на КА «Січ-1М» реализован экспериментальный режим работы РЛС БО с широкой полосой обзора [68].

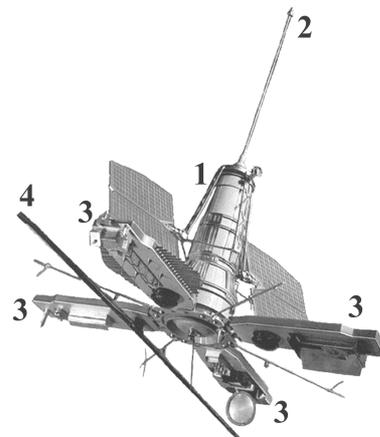


Рис. 4. Космический аппарат «Космос-1500»: 1 – герметичный корпус; 2 – груз гравитационной системы ориентации; 3 – панели с блоками аппаратуры комплекса ДЗЗ; 4 – антенна РЛС БО.

Таблица 2. Основные характеристики РЛС БО КА «Океан – Січ».

Характеристики и параметры	Космический аппарат		Примечания
	«Океан»	«Січ-1М»	
1	2	3	4
1. Рабочая длина волны, см	3,15	3,15	
2. Поляризация	ВВ	ВВ	
3. Тип антенной системы	волноводно-щелевая		
4. Ширина главного лепестка диаграммы направленности:			по уровню
в азимутальной плоскости, градус	0,2	0,2	половинной
в угломестной плоскости, градус	42	42	мощности
5. Длительность зондирующего импульса, мкс	3	3	
6. Мощность передатчика, кВт	100	100	импульсная
7. Чувствительность приемника, дБ	минус 140		предельная, относительно Ватта
8. Расположение полосы обзора относительно трассы КА	слева по полету		для КА «Океан-О» справа и слева от трассы
9. Ширина полосы обзора:			зависит от
в штатном режиме, км	450 – 475	450 – 475	состояния
в режиме расширенной полосы, км	-	~ 700	поверхности
10. Коэффициент усиления антенны, дБ	35	35	
11. Пространственное разрешение в штатном режиме обзора:			
по дальности, м	~ 700	~ 700	
по азимуту, м	~ 1 700	~ 1 700	
12. Пространственное разрешение в режиме расширенной полосы обзора:			
по дальности, м	-	~ 700	
по азимуту, м	-	~ 1 700	
13. Шумовой эквивалент ЭПР, дБ	минус 19		

Вертикальная поляризация излучаемого и принимаемого сигналов (ВВ), позволяла получить максимальную контрастность РЛ-изображений при наблюдении ледовых полей и обеспечить максимальную ширину полосы обзора при наблюдении морской поверхности.

Обратим внимание читателя также на то, что при создании комплекса ДЗЗ океанографической системы «Океан» была обеспечена возможность оперативного получения РЛ-снимков потребителями. Для этого комплекс по своей информативности был сопряжен с пропускной способностью радиоканалов, работающих в частотных диапазонах 466 МГц и 137 МГц и используемых для передачи метеорологической информации. Это позволило использовать для приема РЛ-информации как сеть штатных пунктов приема спутниковой метеорологической информации Гидрометеослужбы СССР,

так и автономные (мобильные) пункты, без проблем размещаемые на борту судов (в качестве примера назовем пункт приема данных на борту ледокола «Владивосток»), на борту самолетов и т.д., что создавало потребителям возможность получения РЛ-снимков непосредственно в темпе выполнения съемки¹⁴. Один из таких пунктов был развернут и в МГИ НАН Украины (в то время – МГИ АН УССР).

В 1995 г. был осуществлен последний удачный запуск КА типа «Океан-О1 – Січ¹⁵» – был запущен КА, получивший наименование «Січ-1».

Второй этап создания системы «Океан» связан с космическими аппаратами «Океан-О», значительно отличавшимся от КА «Океан-О1» как составом комплекса ДЗЗ, так и возможностями непосредственно КА (космической платформы). К сожалению, события конца 90-х годов прошлого столетия и последовавший за ними распад СССР перечеркнули планы дальнейшего развития как всей системы «Ресурс» в целом, так и ее океанографической подсистемы «Океан». В результате единственный изготовленный образец КА «Океан-О» был запущен после многократных переносов по разнообразным причинам (в том числе и финансового характера) только в 1999 г. [69]. После окончания в 2002 г. гарантийного срока эксплуатации КА работы с ним были прекращены.

Последний запуск КА по программе «Океан – Січ» был осуществлен в 2004 г. На борту КА «Січ-1М» был установлен доработанный комплект РЛС БО (см. табл. 2) с расширенной до 700 км полосой обзора и ряд другой аппаратуры ДЗЗ (см., например, [68]). Однако КА не вышел на расчетную орбиту, вследствие чего полностью осуществить научную программу его работы в части мониторинга морских акваторий не удалось.

Таким образом, после прекращения работ с КА «Січ-1М» и Украина, и Россия остались без космических РЛ-средств мониторинга морских акваторий. Кроме того, в этом же 2004 г., Россия утратила и последний из своих метеорологических КА систем «Метеор».

Космическая система «Метеор-3М» с космическим аппаратом «Метеор-М» [70 – 73]. Поэтому Федеральной космической программой России на 2006 – 2015 гг. было предусмотрено воссоздание национальной космической метеорологической наблюдательной системы и разработка метеорологических КА нового поколения «Метеор-М», первый образец которого был запущен на штатную орбиту 17 сентября 2009 г. Общее представление о нем дает рис. 5, на котором показан внешний вид КА. «Метеор-М» создан специалистами ВНИИЭМ им. А.Г. Иосифьяна (г. Москва) на конструктивной основе метеорологических КА «Метеор-3». По своему внешнему виду он отличается от своих предшественников наличием длинной антенны БРЛК «Северянин-М», расположенной в верхней части корпуса (см. рис. 5). БРЛК создан во НИИ ТП.

Как и ранее на КА серии «Океан – Січ», на КА «Метеор-М» в РЛС БО применена волноводно-щелевая антенна, изготовленная на основе стандартного волновода сечением 23×10 мм. Размер антенны в раскрытие: $13,4 \times 0,25$ м. Конструктивно она состоит из семи секций, что обеспечивает компактную укладку антенны при выводе на орбиту. Антенна формирует в угломестной плоскости главный лепесток диаграммы направленности косекансного типа (это обеспечивает равноконтрастность получаемых изображений) шириной $\sim 22,5^\circ$ по уровню половинной мощности. Ширина главного лепестка диаграммы направленности в азимутальной плоскости составляет около $0,12^\circ$.

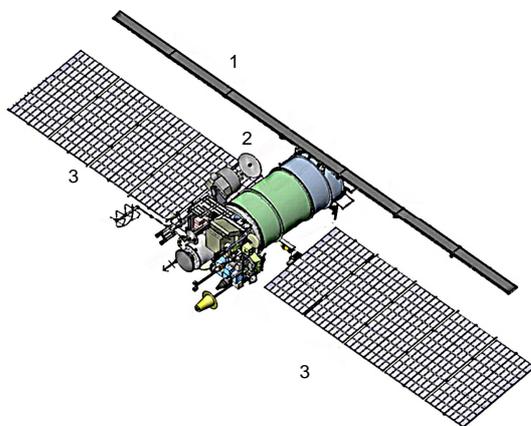


Рис. 5. Метеорологический КА «Метеор-М»: 1 – антенна БРЛК «Северянин-М»; 2 – модуль МТВЗА; 3 – солнечные батареи.

На КА «Метеор-М», наряду с установкой высокоскоростных радиолиний передачи информации, работающих в частотных диапазонах 1,7 ГГц и 8,3 ГГц, сохранена и аналоговая радиолиния, работающая в метровом диапазоне радиоволн (частотный диапазон 137 МГц), что обеспечивает возможность оперативного получения РЛ-снимков (в темпе съемки в режиме непосредственной передачи информации – НП) широкому кругу потребителей.

Таблица 3. Основные характеристики и параметры БРЛК «Северянин-М».

Характеристики и параметры	Значение	Примечания
1. Рабочая длина волны, см	3,1	
2. Поляризация	ВВ	
3. Диапазон углов наблюдения, градус	от 25 до 48	
4. Ширина полосы обзора, км	600 – 750	
5. Длительность зондирующего импульса:		
в режиме низкого разрешения, мкс	8	
в режиме среднего разрешения, мкс	4	
6. Пространственное разрешение по дальности:		
в режиме низкого разрешения, м	400 – 650	
в режиме среднего разрешения, м	800 – 1 300	
7. Ширина диаграммы направленности в азимутальной плоскости на уровне половинной мощности, градус	0,12	
8. Пространственное разрешение в азимутальной плоскости на ближней границе полосы обзора:		
в режиме низкого разрешения, м	~ 740	
в режиме среднего разрешения, м	~ 330	
8. Коэффициент усиления антенны, дБ	38,5	
9. Шумовой эквивалент ЭПР, дБ	минус 20	

Поляризация, как и в РЛС БО КА «Океан – Січ», вертикальная на прием и передачу.

Основные технические характеристики БРЛК приведены в табл. 3, а одно из полученных с его помощью РЛ-изображений – изображение архипелага «Новая Земля», приведено на рис. 6 [73].

В настоящее время КА находится на орбите и выдает снимки земной поверхности на наземные центры приема и обработки спутниковой информации¹⁶.

Эффективность космических РЛ-систем мониторинга морских акваторий. Потенциальная всепогодность видовых космических РЛ-систем при мониторинге морских акваторий обусловлена малым поглощением радиоволн СВЧ-диапазона в атмосфере Земли. Напомним несколько примеров использования информации, получаемой с помощью обзорных РЛС БО, иллюстрирующих их высокую эффективность.

Уже хрестоматийными примерами стало использование информации, получаемой с помощью обзорной РЛС БО КА «Космос-1500», для регулярного составления средне- и долгосрочных прогнозов ледовой обстановки в Арктике и Антарктике в интересах обеспечения морских операций, освещения ледовой и гидрометеорологической обстановки для проводки судов в экстремально тяжелых условиях: в районе пролива Лонга¹⁷ в 1983 г. (вывод из ледового плена каравана из 22 судов), в Охотском море и Татарском проливе в 1985 г., у берегов Антарктиды в 1985 г. (вывод из ледового плена экспедиционного судна «Михаил Сомов») и др. (см., например, [38 – 40, 60]). Еще раз подчеркнем, что для «сброса» информации на сеть приемных пунктов (в том числе – для прямого «сброса» на ледокол «Владивосток») при этом использовалась радиолиния, работающая в метровом диапазоне радиоволн (частотный диапазон 137 МГц).

Высокая чувствительность РЛС к спектральной плотности (высоте) резонансных морских волн (см., например, [10 – 14]) предопределяет возможность обнаружения и исследования с помощью РЛС БО космического базирования проявлений на морской поверхности следов атмосферных процессов и опасных гидрометеорологических явлений.

В качестве примера на рис. 7 приведена серия РЛ-изображений восточной части Черного моря, полученных с помощью обзорной РЛС БО в период опытной эксплуатации КА «Січ-1» (см. табл. 2, графы 1 и 2). Первый снимок (см. рис. 7, а) получен 17.03.1996 г. в 07:33 GMT, второй (см. рис. 7, б) – примерно через 12 часов, в 19:19 GMT 17.03.1996 г., третий (см. рис. 7, в) – в 07:11 GMT 20.03.1996 г. Обращает на себя внимание протяженная ветровая струя (на рис. 7, а – в отмечена стрелкой), «вытекающая» из района Колхидской низменности. По нашим оценкам (см., например, [74]) протяженность «струи» достигала 250 км при ширине около 40 – 50 км (напомним – ширина полосы обзора РЛС БО в зависимости от интенсивности волнения составляет от 450 до 475 км). Наибольшая скорость ветра на стрежне «струи» и у ее «устья» отмечалась вечером 17 марта и составляла около 20 м/с. В этот период в районе наблюдалось слабоградиентное поле атмосферного давления, никак не предсказывающее существование этого гидрометеорологического явления. Более того, поскольку струя «отжата» от берега, она не обнаруживалась и береговыми гидрометеорологическими станциями и постами.



Рис. 6. Фрагмент РЛ-изображения архипелага Новая Земля, полученного с помощью БРЛК «Северянин-М» [73].

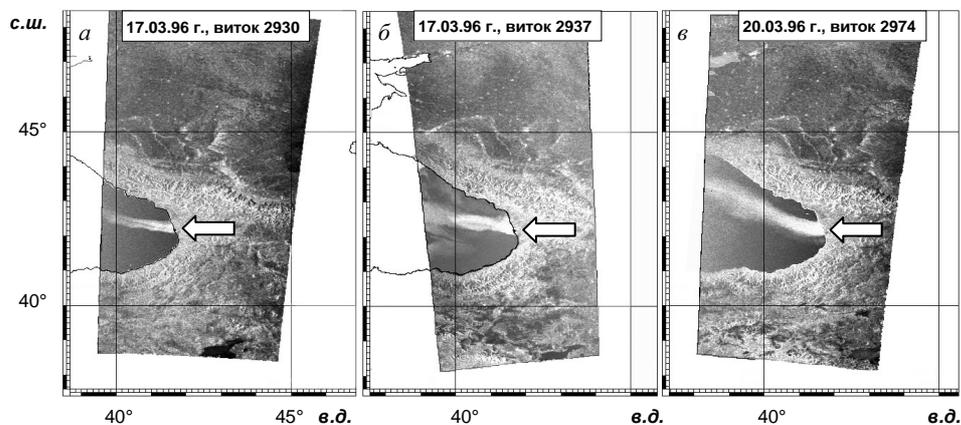


Рис. 7. РЛ-изображение восточной части Черного моря, полученное с помощью РЛС БО КА «Січ-1» 17 марта 1996 г. (*а* – виток 2930, *б* – виток 2937) и 20 марта 1996 г. (*в* – виток 2974). Стрелками отмечена локальная ветровая струя, скорость ветра в которой достигает 20 м/с.

Не менее показательным в плане иллюстрации высоких потенциальных возможностей обзорных РЛС БО как средств оперативного мониторинга морских акваторий, является и обнаружение у побережья США в 1984 г. с помощью РЛС БО КА «Космос-1500» тайфуна «Диана» [38, 39]. Его «РЛ-портреты» приведены на рис. 8. Мы не будем здесь детально их рассматривать, ограничимся, следуя цитируемым работам, только их кратким описанием.

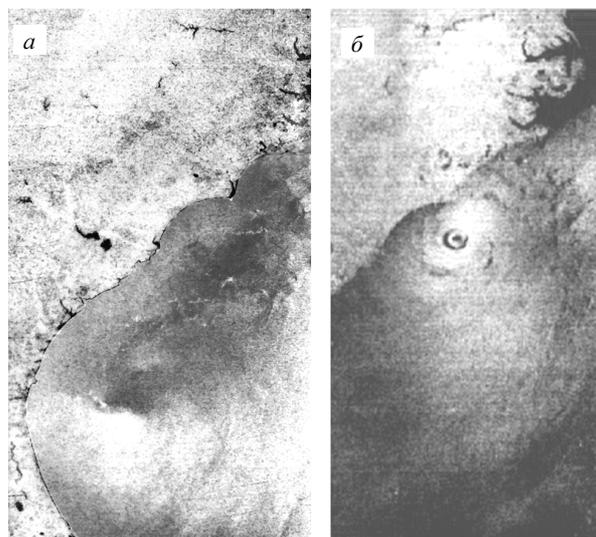


Рис. 8. «РЛ-портреты» урагана «Диана», полученные с помощью РЛС БО КА «Космос-1500» [38, 39]: *а* – в фазе ранней стадии формирования; *б* – в фазе наиболее развитого состояния (11.09.84 г.).

Ураган «Диана» возник при эволюции внутропической области низкого давления севернее Багамских островов и к вечеру 8 сентября 1984 г. превратился в тропический шторм. Но на РЛ-снимках ураган был выявлен двумя

неделями раньше, когда в структуре облачности он еще не проявлялся (!). Вторично «Диана» попала в поле зрения РЛС БО 11 сентября в момент своего наибольшего развития. Приведенные на рис. 8 «радиопортреты» «Дианы» относятся, соответственно, к ранней стадии развития (см. рис. 8, *а*) и к фазе наибольшего своего развития (см. рис. 8, *б*).

В фазе наибольшего развития в РЛ-образе урагана (см. рис. 8, *б*) отчетливо проявляется его «глаз» – область, в которой отмечается «толчея» крупных морских волн, слабый ветер и над которой наблюдается ясное небо. На РЛ-изображении «глазу» соответствует область слабого сигнала – скорости ветра здесь недостаточно для генерации резонансной [10, 11] ряби и РЛ-сигнал отсутствует, несмотря на «толчею» крупных волн. Кстати, этот факт может косвенно говорить о переоценке вклада механизмов «нерезонансного» (см., например [28, 75] и цитируемую там литературу) рассеяния в формирование морской поверхностью РЛ-сигнала. По мере удаления от центра «глаза» яркость изображения увеличивается – с усилением ветра начинается генерация и эволюция спектра резонансной ряби. Еще неплотная облачность и осадки малой интенсивности не оказывают в этой области влияния на величину РЛ-сигнала.

Далее, по мере углубления в стену глаза – кольцо, образованное кучево-дождевыми облаками, в которой наблюдаются наиболее сильные (ливневые) дожди и самые сильные ветры, уровень РЛ-сигнала вновь падает. Это связано, по-видимому (см. [38, 39]), с поглощением радиоволн «мелкой» дождевой фракцией. Известно (см., например [76 – 78]), что при интенсивности дождя около 15 мм/час поглощение радиоволн с длиной волны ~ 3 см составляет около 0,5 – 0,8 дБ/км. В ливневых же дождях при интенсивности около 100 мм/час ослабление достигает ~ 2 дБ/км. Другими словами, при распространении тропосфере ослабление РЛ-сигнала может превышать 15 – 20 дБ. При дальнейшем продвижении от центра к периферии урагана интенсивность осадков снижается, а скорость ветра постепенно падает, что находит свое «отражение» и в радиообразе урагана.

В процессе эксплуатации РЛС БО на КА «Космос-Океан-Січ» несколько неожиданным для радиофизиков стало проявление на РЛ-снимках морских температурных фронтов, поскольку температурные изменения диэлектрической проницаемости морской воды даже при температурном контрасте в несколько градусов не должны были приводить к столь заметным РЛ-контрастам во фронтальных зонах. На рис. 9 сопоставлены между собой изображения западной части Черного моря: рис. 9, *а* – тепловое, рис. 9, *б* – радиолокационное. Тепловой снимок получен с помощью сканера AVHRR ИСЗ «NOAA» 02.02.96 г. в 14:35 по московскому времени – МСК), РЛ-снимок получен с помощью РЛС БО КА «Січ-1» 03.02.96 г. (виток 2293) в 01:46 МСК. Перепад температуры через фронт составляет около 5,5 °С. Его происхождение связано с адвекцией холодных вод, образующихся в результате выхолаживания мелководной северо-западной части моря, вдольбереговым течением.

На РЛ-изображении вблизи берега также присутствует область пониженного сигнала (темная область). Ее граница практически совпадает с положением температурного фронта, которое отмечено на РЛ-изображении светлой линией и светлыми стрелками на обоих изображениях.

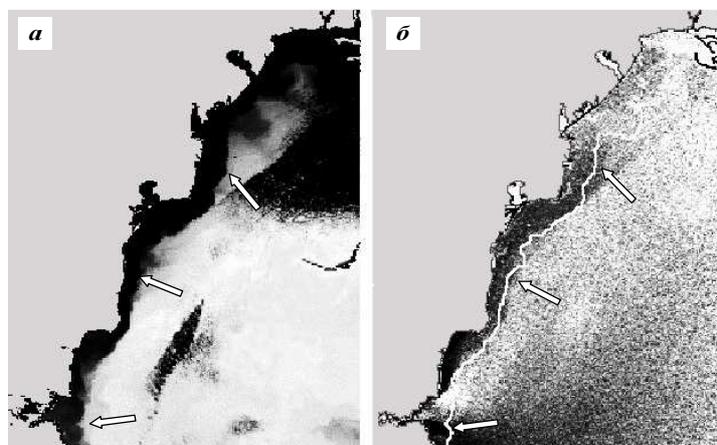


Рис. 9. Изображения западной части Черного моря: *а* – тепловое (ИК-); *б* – радиолокационное. Светлая линия на РЛ-изображении – граница раздела между теплой и холодной водой, перенесенная из теплового изображения.

Физическое объяснение наблюдающегося явления было найдено при изучении структуры (стратификации) приводного слоя атмосферы в области морских температурных фронтов [79 – 81]. Вслед за авторами цитируемых работ, кратко остановимся на физике проявления температурного фронта в РЛ-изображениях морской поверхности.

Воздушный поток, набегая с «шероховатой» земли на море, на начальном этапе адаптируется под поверхность, соответствующую холодному вдольбереговому течению. Если предположить, что температура моря здесь близка к температуре земли, то адаптированный погранслоя – нейтрально стратифицирован. После пересечения фронтального раздела температура подстилающей поверхности атмосферного погранслоя резко увеличивается. При фиксированных параметрах верхних слоев атмосферы увеличение температуры моря (и связанное с этим формирование неустойчивой стратификации воздуха), вызывает увеличение как скорости приводного ветра, так и ветровых напряжений, что ведет к увеличению спектральной плотности резонансной [10, 11] ряби и, следовательно, к возрастанию уровня РЛ-сигнала.

Возможность РЛ-наблюдения морских температурных фронтов стала основой, например, для разработки методик обнаружения промысловых скоплений рыб [81].

Показательным примером использования РЛ-информации высокой детализации ¹⁸, получаемой с помощью космических РСА, в области физики моря является проект «*MaxWave*», направленный на изучение такого небезопасного природного явления, как волны-убийцы ¹⁹ (см., например, [82 – 85]). Упоминания об этих волнах долгое время считались морским мифом, поскольку классическая теория волнообразования предсказывала ничтожную вероятность их появления, не говоря уже о вероятности встречи с ними кораблей – такие события считались вообще невозможными. Ситуация изменилась после документально зафиксированного инцидента на нефтяной платформе «Дропнер», расположенной в Северном море: 1 января 1995 г. при значимой высоте волн 12 метров возникла волна высотой 26 м, которая и обрушилась на

платформу. Анализ чрезвычайных морских происшествий показал, что в период с 1969 по 1994 гг. 60 судов затонули в результате «внезапного затопления» и вероятной причиной трагедий для трети из них являются именно волны-убийцы. Эти обстоятельства и стимулировали постановку в 2000 г. Европейским космическим агентством проекта «*MaxWave*» – массового анализа детальных РЛ-изображений океанской поверхности.

Его результаты показали, что волны-убийцы возникают в океане гораздо чаще, чем это предсказывает теория. Появляющиеся даже при относительно спокойной поверхности, они наносят тяжелые повреждения судам – поверхность, на которую обрушивается такая волна, может испытывать давление до 100 т/м^2 , в то время как большинство же современных судов может выдержать нагрузку максимум 15 т/м^2 . В качестве одного из примеров последствий встречи с волной-убийцей на рис. 10 показана фотография носовой части норвежского танкера «*Wilstar*» (многократно воспроизводимая в печатных и электронных источниках информации – см., например [86]), подвергнувшегося в 1974 г. «нападению» волны у берегов Южной Африки.

В качестве примера одной из последних встреч с волной-убийцей назовем инцидент, произошедший в Средиземном море 3 марта 2010 г.: на пятой палубе кипрского круизного лайнера «*Louis Majesty*» [87]²⁰ волной были выбиты иллюминаторы – 2 человека погибли, еще 12 получили ранения.



Рис. 10. Носовая часть танкера «*Wilstar*», поврежденная волной-убийцей.

Большую проблему в экологии моря представляет загрязнение его поверхности различными поверхностно-активными веществами (ПАВ). Весьма перспективным инструментом для обнаружения участков морской поверхности, покрытых ПАВ, являются РЛС БО. Известно (см., например [88]), что присутствие на морской поверхности пленок ПАВ при определенных условиях²¹ приводит к эффективному подавлению мелкомасштабных поверхностных волн – к выглаживанию поверхности (образованию сликов). Снижение высоты резонансных [10, 11]) для спутниковых РЛС БО морских волн, ведет к уменьшению уровня РЛ-сигнала, формируемого этими участками. Это и предопределяет возможность обнаружения сликов с помощью РЛ-систем (см., например, [39, 89 – 92]). Имеющийся многолетний опыт показывает, что современные РЛС БО космического базирования потенциально позволяют:

- обнаруживать на морской поверхности присутствие пленок ПАВ;
- определять границы областей морских акваторий, подвергшихся загрязнению ПАВ того или иного происхождения;
- наблюдать траектории перемещения пленок;
- оценивать их толщину и на этой основе оценивать количество ПАВ, образовавшего пленку и т.д.

Весьма заманчивым является не только обнаружение, но и одновременное распознавание природы пленки ПАВ, образовавшей слик, и, в конечном

итоге – селекция на морской поверхности снимков, образованных пленками ПАВ, содержащими нефтепродукты²². Не приводя обзора работ этой тематики, укажем, что для решения задачи обнаружения и локализации нефтяных загрязнений на морской поверхности, а также для определения типа загрязнения на основе использования *только* спутниковых РЛ-снимков привлекается дополнительная информация: конфигурация снимков, текстура их РЛ-изображений, географическое положение (выходы из грифонов), поляризационное отношение и т.д. (см., например, [75, 88 – 93]). Нам представляется, что в этом плане спутниковые данные целесообразно использовать прежде всего для общего обзора контролируемого района, а задачу локального контроля и распознавания – решать с помощью авиационных систем экологического патрулирования (см., например, [37, 39, 42]), упомянутых нами ранее.

В качестве примера, характеризующего реальную эффективность использования спутниковых РЛ-систем для обнаружения нефтяных загрязнений морских акваторий обратимся к событиям, происходившим в Керченском заливе в ноябре 2007 г. Напомним, что 11 ноября в результате разразившегося шторма в проливе за один день затонули четыре судна, шесть сели на мель, два получили повреждения. Из разломившегося танкера «Волгонефть-139» – его кормовая и носовая части показаны на рис. 11, заимствованном из сайта «Прозрачный мир» [94]), в море вылилось около 13 000 т мазута.



Рис. 11. Танкер «Волгонефть-139», разломившийся в Керченском проливе 11 ноября 2007 г.: а – кормовая часть; б – носовая часть (фото заимствовано из [94]).

помощью РСА КА «Radarsat» (пространственное разрешение снимка – 30 м). Светлые точки (1) на изображении – различные суда, находящиеся в проливе и перед ним, темные области (2) – участки, покрытые пленкой нефтепродуктов. Танкер «Волгонефть-139» находится в точке (3). 16 ноября РЛ-съемка была выполнена и другими КА РЛ-наблюдения: «Envisat», «ALOS» и «TerraSAR-X».

Снимки, передаваемые с борта КА «Radarsat» принимались в России на технических средствах ИТЦ «СканЭкс» и после обработки стали доступны. Снимки района, получаемые с помощью РСА КА «Envisat» принимались на норвежской приемной станции, но, поскольку Россия не входила в число абонентов онлайн-сервиса CSN, в открытом доступе в России снимки появились со значительным опозданием. Изображение же, полученное с борта

В этот период практически все находившиеся в то время на орбите КА РЛ-наблюдения – «Radarsat» (Канада), «Envisat» (Европа), «ALOS» (Япония), «TerraSAR-X» (Германия), выполняли съемку пролива [95]. При этом первая РЛ-съемка была выполнена по заявке ИТЦ «СканЭкс» только 15 ноября, т.е. на *четвертый* день после трагедии и то «в виде исключения», поскольку стандартный период ожидания при заказе съемки составляет до двух недель [96]. В качестве примера на рис. 12 показан фрагмент РЛ-изображения²³, полученного 16 ноября 2007 г. с

КА «TerraSAR-X», находившегося после запуска в фазе орбитальных испытаний, появилось в открытом доступе только 20 ноября – на *девятые (!)* сутки после катастрофы²⁴. РЛ-снимок Керченского пролива, полученный 16 ноября 2007 г. с помощью японского КА «ALOS», вообще был продемонстрирован только в январе 2008 г. в одном из научных докладов на семинаре Европейского космического агентства.



Рис. 12. Нефтяное загрязнение Керченского пролива и южной части Азовского моря.

К сожалению, какой-либо информации об использовании спутниковых РЛ-снимков оперативными службами МЧС Украины и Керченского морского порта во время шторма 11 ноября 2007 г. и в последующий период нам найти не удалось.

Основные тенденции и направления развития спутниковых систем мониторинга морских акваторий, построенных на основе РЛС БО космического базирования. Рассматривая современное состояние и тенденции в развитии спутниковых систем мониторинга морских акваторий, можно отметить следующее:

1. За пятьдесят с небольшим лет, прошедших после запуска в космос первого ИСЗ, в области наук о Земле возникло новое научное направление: «Дистанционное зондирование Земли» или более емкое – «Исследование Земли из космоса»²⁵, опирающееся на широкое использование космических технологий.

2. В конце 60-х – начале 70-х годов прошлого столетия арсенал космических средств ДЗЗ пополнился радиофизическими системами наблюдения, в том числе – радиолокационными, обеспечивающими возможность всепогодного мониторинга морских акваторий.

3. Современные космические РЛ-системы ДЗЗ по своей потенциальной пространственной разрешающей способности вплотную приблизились к оптическим, от которых выгодно отличаются всепогодностью.

4. В России, не испытывающей недостатка в предприятиях «космической» и «радиотехнической» отрасли, разрабатываются и создаются:

а) КА РЛ-наблюдения «Аркон-2» – ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина» совместно с ОАО «Концерн радиостроения "Вега"» (см., например, [97]);

б) космическая наблюдательная система «Арктика» – ФГУП «НПО имени С.А. Лавочкина» совместно с Росгидрометцентром (см., например, [98]). В составе системы будут работать пять КА: два КА «Арктика-М», находящихся на высокоэллиптических орбитах, будут непрерывно следить за изменениями погоды в арктическом регионе и своевременно оповещать о развитии стихийных природных бедствий и аномалий. КА РЛ-наблюдения «Арктика-Р» будет отслеживать состояние ледового покрова. Его же информацию предполагается использовать в интересах разведки залежей нефти, газа и других полезных ископаемых. Два КА «Арктика-МС» будут обеспечивать телефонную связь, телевизионную и радиопередачу в УКВ-диапазоне в арктическом регионе;

в) космическая наблюдательная система «Монитор» – ГКНПЦ имени М.В. Хруничева (см., например, [99]), создается на базе унифицированной космической платформы «Яхта». Предполагается, что в ее состав будут входить КА «Монитор-Э», «Монитор-И», «Монитор-С», «Монитор-О», оснащенные оптико-электронной аппаратурой и КА «Монитор-Р», оснащенные РСА;

г) проект дооснащения КА ДЗЗ серии «Ресурс-П» бортовой РСА – ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» (см., например [100]);

д) космическая система РЛ-наблюдения «Север» – ФГУП «КБ "Арсенал"» (С.-Петербург) (см., например, [101]);

е) космическая наблюдательная система на основе малых КА «Кондор-Э» – ОАО «Военно-промышленная корпорация "НПО Машиностроение"» совместно с ОАО «Концерн радиостроения "Вега"» (см., например, [102, 103]). Предполагается, что РСА будет иметь две полосы обзора, расположенные слева и справа от трассы КА и имеющие ширину 500 км. При этом, при ширине полосы захвата 10 км, РСА будет иметь пространственное разрешение ~ (5 – 30) м в обзорном режиме, от 1 до 3 м в режиме детальной съемки и от 1 до 2 м в прожекторном режиме.

5. Украина имеет развитый научный и производственный потенциал в области создания и использования космических систем ДЗЗ. Напомним, что специалистами научно-исследовательских и научно-производственных организаций Академии наук и других ведомств Украины совместно со специалистами организаций и предприятий ракетно-космической отрасли в конце 70-х – начале 80-х годов прошлого столетия в сжатые сроки была создана оперативная эксплуатационная подсистема «Океан» оперативной государственной космической системы изучения природных ресурсов Земли «Ресурс». На протяжении многих лет она поддерживалась в рабочем состоянии – на орбите одновременно работали один-два космических аппарата.

Став после распада СССР независимым государством, Украина приступила к созданию национальной космической наблюдательной системы «Січ» – были запущены КА природо-ресурсного назначения «Січ-1», «Океан-О» и «Січ-1М», создана наземная инфраструктура управления полетом КА, разра-

ботаны методы и программные средства оперативной компьютерной обработки получаемых космических снимков (см., например, [104 – 107]). Ведутся работы по созданию национальной космической системы связи на основе геостационарного КА «Либідь» (см., например [104]), проанонсирована (см., например [105 – 109]) разработка КА оптико-электронного – «Січ-2», «Січ-2М» и «Січ-3-О», и радиолокационного – «Січ-2М-Р», «Січ-3-Р»²⁶, наблюдения. Общее представление о КА «Січ-3-Р» дает рис. 12 (заимствованный из [107]).

Говоря в общих чертах о работах в области ДЗЗ, ведущихся в Украине, отметим, что такие важные для оперативной океанографии направления, как «Альтиметрия» и «Скаттерометрия», в действующей космической программе, как и в предыдущих трех, не представлены. Вероятно, по причине ограниченных, в сравнении, скажем с Россией, материальных ресурсов.

* * *

Рассмотрим, не вдаваясь в детали²⁷, в нескольких фразах основные направления использования РЛС БО космического базирования в интересах ДЗЗ в зарубежных странах – в странах «дальнего зарубежья» (см., например, [110 – 120]). С первых шагов своего возникновения в развитии зарубежных видовых РЛ-систем ДЗЗ доминировало направление создания РЛС БО с синтезированием апертуры приемной антенны.

Первой такой системой, как мы уже отмечали, стала РСА, установленная на борту океанографического КА «*Seasat*» [51]. В последующие почти четверть века зарубежными специалистами было реализовано несколько проектов космических РСА²⁸, работавших на борту пилотируемых и автоматических КА: «*SIR-A, -B*» (1981 г., 1984 г., США), «*SIR-C/X-SAR*» (1994 г., США, Германия, Италия), «*Radarsat-1, -2*» (1995 г., 2001 г., Канада), «*ERS-1, -2*» (1991 г., 1995г., Европейское космическое агентство), «*JERS*» (1992 г., Япония), «*Envisat*» (2000 г., Европейское космическое агентство). Часть из этих РСА имела несколько режимов работы.

Запусками этих систем решались преимущественно исследовательские и технологические задачи – отрабатывались и проверялись аппаратные решения, методы и техника обработки РЛ-данных, технологии измерения характеристик природных объектов и явлений и т.д. Осуществлялся поиск оптимальных частотных диапазонов (использовались радиоволны с длиной 23; 10; 5 и 3 см) и конструкций антенных систем, отрабатывались способы управления углом наблюдения поверхности («*SIR-A/B/C*») и режимами работы («*ERS-1, -2*»), обеспечивалась одновременная съемка на нескольких поляризациях и частотах («*SIR-B/C/X-SAR*») и т.д. В области техники обработки РЛ-информации был сделан окончательный выбор в пользу цифровых методов и средств (см., например [121]).

После запуска в 1995 г. канадского КА «*Radarsat-1*» начался новый этап: переход от исследовательских (демонстрационных) к эксплуатационным



Рис. 13. КА «Січ-3-Р» [107].

системам, предназначенным для решения конкретных научных, хозяйственных и коммерческих задач²⁹. В настоящее время состав зарубежного «Космического радиолокационного клуба» расширился – КА РЛ-наблюдения используют, например: Китай, Израиль, Индия, Италия³⁰. В перспективе создание КА РЛ-наблюдения предусматривается и французскими специалистами.

В 2000 г. в полете космического корабля «Спейс Шаттл» (полет *STS-99*) начата отработка технологии интерферометрической съемки земной поверхности (см., например, [117, 118]). Развитие технологии привело к созданию РЛ-интерферометрических съемочных систем, таких, как «*TanDEM-X*» (Германия) [119] и «*Cryosat*» [120].

Система из двух идентичных КА «*TerraSAR-X*» (запущен 15.06.2009 г.) и «*TanDEM-X*» (запущен 24.06.2010 г.) [119] представляет собой космический двухпозиционный эксплуатационный РЛ-интерферометрический комплекс, в котором земная поверхность облучается одним КА, а прием РЛ-сигнала осуществляется двумя, разнесенными в пространстве. Основной задачей системы является создание глобальной цифровой модели местности, охватывающей до 90 % поверхности Земного шара, в стандарте *HRTI-3* (пространственное разрешение 12×12 м, абсолютная вертикальная точность 10 м) и региональных моделей местности в стандарте *HRTI-4* (пространственное разрешение 6×6 м, абсолютная вертикальная точность 5 м).

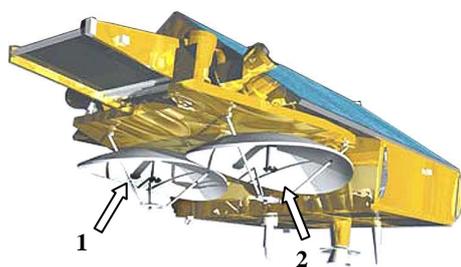


Рис. 14. КА «*CryoSat-2*».
1, 2 – антенны интерферометра.

Ближе к интересам оперативной океанографии находится КА «*Cryosat-2*» (запущен 8.04.2010 г.), внешний вид которого показан на рис. 14, [120]. На его борту установлен интерферометрический РЛ-высотомер с синтезируемой апертурой антенны *SIRAL*, который служит для определения высоты материкового льда, а также надводной части айсбергов. Он позволяет получать точные изображения земной поверхности вне зависимости от метеорологических условий и уровня освещенности, при этом детальность РЛ-изображений сопоставима с детальностью аэрофотоснимков. *SIRAL* оптимизирован таким образом, чтобы получать наиболее точные данные не о поверхности суши, а именно о льдах – вне зависимости от их местонахождения.

Наконец, назовем еще один интересный на наш взгляд КА – «*ALOS-2*», создаваемый японскими специалистами и планируемый к запуску в 2013 г. [122]. Внешний вид КА показан на рис. 15.

Он оснащается РСА, построенной на основе активной фазированной решетки (*Active Phased Array Antenna*). Рабочая длина волны выбрана в *L*-диапазоне (длина волны 22,9 см), а частота излучаемого РЛС сигнала может составлять 1257,5; 1236,5 или 1278,5 МГц в зависимости от режима работы. Предусмотрен режим полнополяризационных измерений, когда осуществляется через импульсное чередование вертикальной и горизонтальной поляризаций излучаемого сигнала с параллельным приемом согласованной и деполаризо-

ванной составляющих РЛ-сигнала. Интересен также экспериментальный режим измерения с поворотом плоскости поляризации на 45° и одновременным (параллельным) приемом двух составляющих РЛ-сигнала – с вертикальной и горизонтальной поляризациями. В отличие от предшественника – «ALOS-1», на «ALOS-2» обеспечивается возможность обзора подстилающей поверхности в одной из двух полос обзора, расположенных слева и справа от трассы КА, но одновременного обзора в двух полосах не предусмотрено³¹.

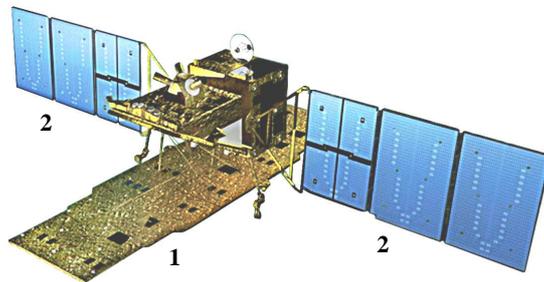


Рис. 15. КА РЛ-наблюдения «ALOS-2». 1 – антенна PCA, 2 – солнечные батареи.

Основные характеристики PCA КА «ALOS-2» перечислены в табл. 4, в которой приняты следующие обозначения поляризационных режимов: *SP* (Single Polarization – ВВ или ГГ), *DP* (Dual Polarization – ВВ и ВГ или ГГ и ГВ), *FP* (Full Polarization – чередование ВП и ГП на передачу, и параллельный прием обеих составляющих), *CP* (Compact Polarization – наклонная линейная поляризация, экспериментальный режим).

Таблица 4. Основные характеристики и параметры PCA КА «ALOS-2»

Параметр	Режим работы				
	SpotLight	StripMap			ScanSar
		Ultra-fine	Hight-sensitive	Fine	
1. Частота, МГц	1257,5	1257,5	Любая из частот 1275,5; 1236,5; 1278,5		
2. Полоса обзора	интервал углов падения от 8 до 70 градусов				
3. Пространственное разрешение, м	3 × 1	3	6	10	100
4. Ширина полосы захвата, км	25 × 25	50	50 30 (FP)	70 30 (FP)	350 5 ячеек
5. Поляризация	SP	SP / DP	SP / DP / FP / CP		SP / DP

Заключение. В заключение отметим, что космическая деятельность, как один из продуктов мирового научно-технического прогресса, постепенно стала одним из его главных двигателей. Ею создаются и передаются в другие области науки и техники, значительные объемы важных технологий и научных разработок.

Среди многих направлений космической деятельности для оперативной океанографии весьма важными являются фундаментальные и прикладные исследования, проектные и опытно-конструкторские работы, направленные на поддержание в эксплуатационном состоянии и совершенствование космических систем ДЗЗ, взаимодействующих с космическими системами позиционирования (навигации) и связи.

Значительный прогресс достигнут в области создания РЛ-средств мониторинга морских акваторий – радиолокационных станций бокового обзора с реальной и синтезируемой апертурами приемных антенн (последние, как известно, позволяют достичь наивысшего пространственного разрешения – единиц метров и менее при ширине полосы захвата до нескольких десятков километров).

В настоящее время многие страны «космического клуба» – страны обладающие развитыми космическими средствами и технологиями, страны создающие, запускающие и эксплуатирующие космические аппараты, развивают радиолокационное направление ДЗЗ, становятся членами «космического радиолокационного клуба». К таким странам относится и Украина.

АВТОРСКИЕ ПРИМЕЧАНИЯ И КОММЕНТАРИИ

¹ В литературе последних лет, по-видимому – с полным на то основанием, отмечается, что приоритет в обнаружении резонансного рассеяния радиоволн взволнованной морской поверхностью принадлежит, по сути, сотрудникам Лаборатории (в последующем – отдела) радиолокации ИРЭ АН УССР под руководством (в те годы – к.т.н., в последующем – д.т.н.) И.С. Тургенева. Однако, по независящим от авторов обстоятельствам, результаты этих работ были опубликованы позже работы Д.Д. Кромби (см., например, [9]).

² Разработка двухмасштабной модели в научном плане была столь значима, что Общество радиоинженеров США отметило работу [10] своим Дипломом, невзирая на существовавшее в те годы (годы «холодной войны») противостояние между США и СССР.

³ Здесь и далее при ссылках на литературные источники слово «например» означает, что кроме названных нами существуют и другие источники, перечисление которых заняло бы непозволительно много места.

⁴ Мы не ставили перед собой задачу привести исчерпывающий обзор океанографических работ, направленных на уточнение особенностей формирования и эволюции спектров гравитационно-капиллярных волн и других параметров морского волнения в различных гидрометеорологических условиях.

⁵ Отметим, что идеи использования для повышения пространственного разрешения РЛС по дальности ЛЧМ-импульсов с последующей их оптимальной обработкой с помощью дисперсионных фильтров были предложены еще в 40-х годах прошлого столетия, однако их практическая реализация стала возможной только в 60-х годах. С тех пор метод широко используется в современной радиолокационной технике.

⁶ Здесь и далее имеются ввиду системы, созданные в СССР и в странах СНГ.

⁷ Хельсинкская комиссия (Хелком, *The Helsinki Commission, HELCOM*) – комиссия по защите морской среды Балтийского моря. Образована в результате подписания Хельсинкской конвенции 1992 г. и объединяет (по алфавиту) Германию, Данию, Латвию, Литву, Польшу, Россию, Финляндию, Швецию и Эстонию;

⁸ Возможность использования пассивных радиофизических систем (радиометров) для получения геофизической и океанографической информации была продемонстрирована с помощью радиометрических комплексов, установленных на борту КА «Космос-243» (запущен 23 сентября 1968 г.) и «Космос-384» (запущен 10 декабря 1970 г.). В США подобные работы были проведены позже с помощью радиометрического комплекса *ESMR*, установленного на борту КА «Нимбус-5» (запущен 10 декабря 1972 г.).

⁹ Речь идет о средних по элементу разрешения РЛС уклонах длинных (энергонесущих) морских волн.

¹⁰ Радиометрический комплекс представлял собой дальнейшее развитие своего аналога (прототипа), работавшего на борту КА «Космос-243, -384».

¹¹ Всего по программе «Океан» осуществлено, не считая запусков габаритно-весовых (габаритно-массовых) макетов, 14 запусков КА. Из них один аварийный – «Океан-01» № 4 (1989 г.) и в одном КА не вышел на штатную орбиту – КА «Січ-1М», (2004 г.). На борту 12 КА – начиная с КА «Космос-1500», была установлена РЛС БО.

¹² Напомним, что в 1983 г. на Северном морском пути в районе пролива Лонга был затерт льдами караван из 22 судов: один из транспортов каравана был потерян («Нина Сагайдак», раздавлен льдами и утонул 9 октября 1983 г.), а второй («Коля Мякотин») получил обширную пробоину, к счастью – выше ватерлинии. КА «Космос-1500» в условиях полярной ночи стал единственным источником достоверной информации о состоянии ледовых полей в районе, на основании которой была спланирована и осуществлена операция по выводу каравана из ледового плена. В 1985 г. «Космос-1500» во время операции по выводу из ледового плена Антарктиды научно-экспедиционного судна «Михаил Сомов» вторично стал «космическим лоцманом».

¹³ Герметичный корпус, поворотные панели (с расположенными на них другими элементами конструкции) и вынесенный вдоль строительной оси КА груз образуют гравитационный диполь, располагающийся в полете вдоль силовых линий гравитационного поля Земли.

¹⁴ По своей оперативности комплекс ДЗЗ КА океанографической системы «Океан» является, пожалуй, непревзойденным до настоящего времени.

¹⁵ КА запускался как совместный российско-украинский (украино-российский), что, впрочем, соответствовало действительности по вкладу в создание КА, его бортового комплекса аппаратуры ДЗЗ и инфраструктуры запуска и управления.

¹⁶ Кроме БРЛК «Северянин-М» в состав комплекса аппаратуры ДЗЗ КА «Метеор-М» № 1 входят:

– многозональное сканирующее устройство малого разрешения (МСУ-МР), предназначенное для широкозахватной трассовой съемки (полоса захвата не менее 2 800 км) с получением изображений облачности, земной поверхности, ледового покрова и др. в видимом и ИК-диапазонах с пространственным разрешением около 1 км;

– комплекс многозональной спектральной съемки среднего разрешения (КМСС), предназначенный для получения многозональных изображений поверхности Земли и Мирового океана;

– модуль температурно-влажностного зондирования атмосферы (МТВЗА-ГЯ);

– гелиогеофизический аппаратный комплекс (ГГФК-М), предназначенный для глобального мониторинга гелиогеофизических параметров;

– бортовой радиокomплекс системы сбора и передачи данных (ССПД);

– радиопередачи информации, работающие в метровом (М), дециметровом (ДМ) и сантиметровом (СМ) диапазонах радиоволн.

¹⁷ Район гибели в 1934 г. парохода ледокольного типа «Челюскин», отрабатывавшего схему доставки грузов по Северному морскому пути за одну летнюю навигацию.

¹⁸ Детальное рассмотрение океанографических возможностей РСА является предметом самостоятельной публикации.

¹⁹ Волны-убийцы (блуждающие волны, волны монстры, *rogue wave* – волна-разбойник; *freak-wave* – волна-придурак, отморозок; *onde scelerate* – волна-злодейка; *galejade* – дурная шутка, розыгрыш) – одиночные аномально-высокие волны, имеющие максимальную высоту, превышающую значимую высоту ветровых волн в 2,2 и более раз. В проекте «*MaxWave*» наблюдалось превышение в 2,9 раз, а за 793 часов инструментальных (*in situ*) наблюдений волн в Северном море зарегистрировано превышение

в 3,19 раза – при этом волна с такой высотой оказалась в 300 раз более вероятной, чем это предсказывается классической теорией.

Изучение проблемы показывает, что подобные «волны-убийцы» могут возникать не только в водной, но и любой другой среде, подчиняющейся законам волновой динамики, не исключая и мир финансов (см., например, сайт «Популярная механика». URL: <http://www.popmech.ru/article/6269-volnyi-ubiytzy/>).

²⁰ Технические характеристики лайнера (см., например, [87]): длина – 207,2 м; ширина – 27,6 м; осадка – 14 м; водоизмещение – 40 876 т; скорость хода – до 20 узлов; число кают – 732; численность экипажа – 602 чел.; количество пассажиров – до 1 460 чел.

²¹ Известно, что при скорости ветра до 3 – 5 м/с при наличии на поверхности пленок ПАВ морское волнение не развивается. При скорости ветра до 11 – 13 м/с на поверхности моря хорошо различаются выглаженные пятна – «слики». При больших скоростях ветра РЛ-наблюдаемость сликов снижается, поскольку пленки разываются морскими волнами.

²² Напомним, что слики на морской поверхности могут быть вызваны не только пленками ПАВ, содержащими нефтепродукты, но и другими причинами, например: наличием естественных пленок ПАВ биологического происхождения, неоднородностью поля ветра, неоднородностью приповерхностных течений и т.д.

²³ Снимок заимствован из сайта ИТЦ «СканЭкс». URL: http://www.scanex.ru/ru/news/News_Preview.asp?id=n10824230.

²⁴ Заметим, что РЛ-съемки разлива нефти, произошедшего 12 декабря 2007 г. на нефтедобывающей платформе в Северном море были выполнены с помощью КА «EnviSat» 14 декабря – на вторые сутки после аварии.

²⁵ Одноименный журнал «Исследование Земли из космоса» в 2010 г. отметил свое тридцатилетие.

²⁶ Проектные характеристики перспективных КА ДЗЗ:

– «Січ-2» будет вести съемку в 4 каналах видимого и в 1 канале ближнего ИК-диапазонов с пространственным разрешением ~ 8 м (видимый диапазон) и ~ 45 м (ИК-диапазон) в полосе захвата ~ 50 км;

– «Січ-2М-О» будет вести съемку в 5 каналах видимого диапазона с пространственным разрешением ~ 2 м при панхроматической съемке и ~ 6 м при многоспектральной съемке в полосе захвата ~ 20 км (при панхроматической съемке) и ~ 30 км (при многоспектральной съемке);

– «Січ-3-О» будет вести съемку в 5 каналах видимого диапазона с пространственным разрешением лучше 1 м при панхроматической съемке и лучше 3 м при многоспектральной съемке в полосе захвата ~ 25 км независимо от режима съемки;

– «Січ-2М-Р» в режиме работы с реальной апертурой приемной антенны будет иметь пространственное разрешение 1 300 × 2 000 м в каждой из двух полос обзора, имеющих ширину ~ 750 км и расположенных по обе стороны от трассы КА, а в режиме работы с синтезированием апертуры приемной антенны будет иметь пространственное разрешение 200 × 200 м и две полосы обзора шириной по 350 км каждая;

– «Січ-3-Р» в режиме обзорной съемки будет иметь пространственное разрешение ~ 20 м и полосу захвата ~ 100 км, а в режиме детальной съемки, соответственно, ~ 2 м и ~ 10 км.

Разработка КА ДЗЗ ведется в рамках направления «Осуществление дистанционного зондирования Земли» Общегосударственной целевой научно-технической космической программы Украины на 2008 – 2012 гг. (утверждена Законом Украины от 30 сентября 2008 г. № 608-VI) [109].

²⁷ Детальное рассмотрение требует значительного объема и, на наш взгляд, является предметом самостоятельной публикации.

²⁸ Часть из них была многорежимной, с изменяемыми пространственным разрешением и шириной полосы захвата. В последние годы появился «прожекторный» режим работы, в котором достигается наивысшее пространственное разрешение, сравнимое с пространственным разрешением оптических (фотографических) систем.

²⁹ Напомним читателю, что КА «УС-А» системы МКРЦ был *принят* в штатную эксплуатацию в 1975 г., а подсистема «Океан» оперативной государственной космической системы изучения природных ресурсов Земли «Ресурс» была *принята* в опытную эксплуатацию в 1985 г. (постановление Правительства № 133 от 6 февраля 1985 г. о принятии космического аппарата в опытную эксплуатацию под индексом «Океан-01»).

³⁰ В настоящее время космические системы ДЗЗ, включая системы оптического диапазона, используют около 60 стран мира.

³¹ Напомним, что ранее аналогичным образом был организован РЛ-обзор подстилающей поверхности на борту КА «Океан-О».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кортаев Г.К., Еремеев В.Н.* Введение в оперативную океанографию Черного моря. – Севастополь: НПП «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2006. – 382 с.
2. *Смирнов Г.В., Еремеев В.Н., Агеев М.Д., Кортаев Г.К., Ястребов В.С., Мотыжев С.В.* / Океанология: Средства и методы океанологических исследований. – М.: Наука, 2005. – 795 с.
3. *Kerr D.E.* Propagation of short radio waves (vol. 13 of MIT Radiation Laboratory Series). – New York: McGraw-Hill Book Company Inc. – 1951. – 728 p.
4. *Керр Д.Е.* Распространение ультракоротких радиоволн / Пер. с англ. под ред. Б.А. Шиллерова. – М.: Сов. радио, 1954. – 710 с.
5. *Справочник по радиолокации. Том 1. Основы радиолокации.* (ред. М. Скольника). Перевод с англ. под общей ред. К.Н. Трофимова. – М.: Сов. радио, 1976. – 455 с.
6. *Moore R.K., Fung A.K.* Radar determination of winds at sea // Proc. IEEE. – 1979. – v. 67, № 11. – P. 1504-1521.
7. *Мур Р.К., Фэн А.К.* Радиолокационное определение параметров ветра над морем // ТИИЭР. – 1979. – т. 67, № 11 (ноябрь). – С. 40-63.
8. *Crombie D.D.* Doppler Spectrum of Sea Echo at 13.56 Mc/s. // Nature. – 1955, – v. 175. – P. 681-683.
9. *Жил в Харькове такой человек – Иван Сергеевич Тургенев* // Ежедневник «2000». – 2007, № 11 (358). [Электронный ресурс]. <http://www.2000.net.ua/print?a=%2Fpaper%2F12099> (Проверено 25.05.2009).
10. *Bass F.G., Fuks I.M., Kalmykov A.I., Ostrovsky I.E. and Rosenberg A.D.* Very High Frequency Radiowave Scattering by a Disturbed Sea Surface, Parts I and II // IEEE Trans. Antennas and Propagat. – 1968. – v. AP-16. – P. 554-559 and 560-568.
11. *Басс Ф.Г., Фукс И.М.* Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. – М.: Наука, 1972. – 424 с.
12. *Wright J. W.* A New Model for Sea Clutter // IEEE Trans. Antennas and Propagat. – 1968. – v. AP-16. – P. 217-223.
13. *Радиоокеанографические исследования морского волнения* / Под. ред. С.Я. Брауде. – Киев.: Изд. АН УССР, 1962. – 116 с.
14. *Калмыков А.И., Островский И.Е., Розенберг А.Д., Фукс И.М.* Влияние структуры морской поверхности на пространственные характеристики рассеянного ею излучения // Известия ВУЗов: Радиофизика. – 1965. – т. VIII, № 6. – С. 1117-1127.

15. *Басс Ф.Г., Брауде С.Я., Калмыков А.И., Мень А.В., Островский И.Е., Пустовойтенко В.В., Розенберг А.Д., Фукс И.М.* Методы радиолокационных исследований морского волнения (радиоокеанография) // Успехи физических наук. – 1975. – т. 116, вып. 4. – С. 741-743.
16. *Басс Ф.Г., Брауде С.Я., Калмыков А.И., Мень А.В., Островский И.Е., Розенберг А.Д., Фукс И.М.* Радиофизические исследования морского волнения (радиоокеанография), выполненные в АН УССР. – Харьков, 1975. – 43 с. (Препринт № 51/АН УССР. ИРЭ).
17. *Bass F.G., Braude S.Ya., Fuks I.M., Kalmykov A.I., Megn A.V., Ostrovsky I.E., Rosenberg A.D.* Radiophysical investigations of sea roughness (radio-oceanography) at the Ukrainian Academy of Sciences // IEEE Trans. Antennas and Propag. – 1977. – v. AP-25, № 1. – P. 43-52.
18. *Нелепо Б.А., Терехин Ю.В., Коснырев В.К., Хмыров Б.Е.* Спутниковая гидрофизика. – М.: Наука, 1983. – 253 с.
19. *Нелепо Б.А., Коротяев Г.К., Суетин В.С., Терехин Ю.В.* Исследование океана из космоса. – Киев: Наукова думка, 1985. – 168 с.
20. *Robinson I.S.* Measuring The Oceans From Space: The Principles And Methods Of Satellite Oceanography. – Chichester, UK: Springer-Praxis, 2004. – 350 p.
21. *Romeiser R., Alpers W. and Wismann V.* An improved composite surface model for the radar backscattering cross section of the ocean surface. 1. Theory of the model and optimization/validation by scatterometer data // Journ. Geoph. Res. – 1997. – v. 102, № C11. – P. 25237-25250.
22. *Apel J.R.* An improved ocean surface wave vector spectrum // Journ. Geoph. Res. – 1994. – v. 99, № C8. – P. 16269-16291.
23. *Кудрявцев В.Н.* Физическая модель спектра капиллярно-гравитационной ряби // Морской гидрофизический журнал. – 1999. – № 2. – С. 3-14.
24. *Makin V., Kudryavtsev V.* Coupled sea surface-atmosphere model. Part 1: Wind over wave coupling // Journ. Geoph. Res. – 1999. – v. 104, № C4. – P. 7615-7624.
25. *Kudryavtsev V.N., Makin V.K., Chapron B.* Coupled sea surface-atmosphere model. Part 2. Spectrum of short wind waves // Journ. Geoph. Res. – 1999. – v. 104, № C4. – P. 7625-7639.
26. *Kudryavtsev V., Hauser D., Caudal G. and Chapron B.* A semi-empirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface. Part 1: The background model // Journ. Geophys. Res. – 2003. – v. 108, № C3. 8054, doi:10.1029/2001JC001003.
27. *Kudryavtsev V., Hauser D., Caudal G. and Chapron B.* A semi-empirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface. Part 2: Radar modulation transfer function // Journ. Geophys. Res. – Vol. 108, № C3. 8055, doi:10.1029/2001JC001004.
28. *Булатов М.Г., Кравцов Ю.А., Лаврова О.Ю., Литовченко К.Ц., Митягина М.И., Раев М.Д., Сабинин К.Д., Трохимовский Ю.Г., Чурюмов А.И., Шуган И.В.* Физические механизмы формирования аэрокосмических радиолокационных изображений океана // Успехи физических наук. – 2003. – т. 173, № 1. – С. 69-87.
29. *Zapevalov A.S., Pustovoytenko V.V.* Modeling of the probability distribution function of sea surface slopes in problems of radio wave scattering // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2000. – v. 53, № 2. – P. 100-110.
30. *Применение радиолокационной аэросъемки при геолого-географических исследованиях / под ред. В.М. Глушкова и В.Б. Комарова.* – Л.: Недра, 1984. – 238 с.
31. *Ил-20.* Сайт «Большая авиационная энциклопедия "Уголок неба"». [Электронный ресурс]. <http://www.airwar.ru/enc/spy/il20.html> (Проверено 01.10.2010).

32. *Ан-24*. Сайт ИКАМ (Иллюстрированный каталог авиации мира). [Электронный ресурс]. <http://www.brazd.ru/av/an-24.html> (Проверено 01.10.2010).
33. *Ил-24Н*. Сайт «Большая авиационная энциклопедия "Уголок неба"». [Электронный ресурс]. <http://www.airwar.ru/enc/other/il24n.html> (Проверено 15.08.2010).
34. *Анцев Г.В., Сарычев В.А., Следников К.Н и др.* Авиационный комплекс территориального информационного мониторинга // Качество и ИПИ (CALS) технологии. – 2005, № 3 (7). – С. 7-9.
35. *Ту-126*. Сайт «Большая авиационная энциклопедия "Уголок неба"». [Электронный ресурс]. <http://www.airwar.ru/enc/spy/tu126.html> (Проверено 15.11.2010).
36. *Самолет ДРЛО Ту-126*. Сайт «Российской военной техники». [Электронный ресурс]. http://www.rusarmy.com/avia/tu_126.htm (Проверено 15.10.2010).
37. *Цымбал В.М., Лялько В.І., Курекін О.С., Гавриленко О.С.* Авіаційний комплекс АКДЗ-30 дистанційного зондування природного середовища // Космічна наука і технологія. – 2002. – т. 8, № 2/3. – С. 36-40 .
38. *Калмыков А.И., Цымбал В.Н., Величко С.А., Зубенко Н.В., Кулешов Ю.А., Олейник Н.А.* Радиолокационное наблюдение из космоса критических явлений и природных катастроф в Мировом океане. – Харьков, 1989. – 28 с. (Препринт № 300/ АН УССР. ИРЭ).
39. *Радиолокационные методы и средства оперативного дистанционного зондирования Земли с аэрокосмических носителей / под ред. С.Н. Конюхова, В.И. Драновского и В.Н. Цымбала.* – Киев: ООО НТЦ «Авиадиагностика», «Джулия принт», 2007. – 440 с.
40. *Центр радиофизического зондирования Земли им. А. И. Калмыкова НАН и НКА Украины.* [Электронный ресурс]. <http://www.nas.gov.ua/aboutNASU/Documents/rus/320.htm> (Проверено 15.11.2010).
41. *Боев А.Г., Матвеев А.Я.* Оценка количества разлитой нефти на акватории каспийского промысла «Нефтяные камни» по данным многочастотного радиолокационного зондирования // Радиоп физика и радиоастрономия. – 2005. – т. 10, № 2. – С. 178-188.
42. *Dornier Do-228*. Сайт «Das Flugzeuglexikon (the Aircraft Encyclopedia)». [Электронный ресурс]. http://www.flugzeuginfo.net/acdata_php/acdata_do228_en.php (Проверено 15.02.2010).
43. *Карабашев Г.С.* Флюоресценция в океане. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 200 с.
44. *Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т.* Радиоизлучение Земли как планеты. – М.: Наука, 1974. – 187 с.
45. *Шарков Е.А.* Пассивное микроволновое зондирование Земли: прошлое, настоящее и планы на будущее // Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса: Сборник науч. статей. – М.: ИКИ РАН., 2004. – С.70-80.
46. *Гурвич А.С., Кутуза Б.Г.* «Космос-243» – первый в мире эксперимент по исследованию Земли из космоса радиофизическими методами // Исследование Земли из космоса. – 2010. – № 2. – С. 14-25.
47. *Савин А.И., Зотов Г.Ф., Петрущенко Ю.Е.* Система морской космической разведки и целеуказания. [Электронный ресурс]. <http://www.navy.ru/science/sor7.htm> (Проверено 15.11.2010).
48. *Sven Grahn.* The US-A program (Radar Ocean Reconnaissance Satellites – RORSAT) and radio observations thereof [Электронный ресурс]. <http://www.svengrahn.pp.se/trackind/RORSAT/RORSAT.html> (Проверено 12.11.2010).
49. *Железняков А.* Авария спутника «Космос-954». [Электронный ресурс]. <http://www.astronaut.ru/bookcase/article/article58.htm> (Проверено 15.10.2010).

50. *Бэлью Л., Стулингер Э.* Орбитальная станция «Скайлэб» / Сокр. пер. с англ. под общ. ред. д-ра физ.-мат. наук Г.Л. Гродзовского. – М.: «Машиностроение», 1977. – 232 с.
51. *Seasat.* Сайт «EoPortal». [Электронный ресурс]. http://www.eoportal.org/directory/pres_SEASAT.html (Проверено 15.12.2010).
52. *LACROSSE/ONYX.* [Электронный ресурс]. http://www.globalsecurity.org/space/systems/lacrosse_onyx-schem.htm (Проверено 15.12.2010).
53. *Lacrosse.* Сайт «The Internet Encyclopedia of Science» [Электронный ресурс]. <http://www.daviddarling.info/encyclopedia/L/Lacrosse.html> (Проверено 15.11.2010).
54. *Аганов В.* Группировка КА радиолокационной разведки США получила подкрепление // *Новости космонавтики.* – 2000. – № 10 (213). – С. 7-9.
55. *Тарасенко М.* Отечественная система оперативного дистанционного зондирования Земли // *Новости космонавтики.* – 1998. – т. 8, № 17/18 (184/185). – С. 36-38.
56. *Витер В., Петровский В., Кучейко А.* Космические аппараты радиолокационного наблюдения, созданные в НПО машиностроения // *Новости космонавтики.* – 2001. – т. 11, № 3. – С. 42-43.
57. *Неронский Л.Б., Михайлов В.Ф., Брагин И.В.* / Микроволновая аппаратура дистанционного зондирования поверхности Земли и атмосферы. Радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны. – СПб.: СПбГУАП. – 1999. – Ч. 2. – 220 с.
58. *Космический аппарат «Океан-01».* Сайт космодрома «Плесецк». [Электронный ресурс]. <http://www.plesetzk.ru/ka/ocean> (Проверено 15.12.2010).
59. *Ракеты и космические аппараты конструкторского бюро «Южное» /* под общей редакцией С.Н. Конюхова. – Днепропетровск: ООО «КолорГраф», ООО РА «Тандем-У», 2001. – 240 с.
60. *Призваны временем. От противостояния к международному сотрудничеству /* под общей редакцией С.Н. Конюхова. – Днепропетровск: Арт-Пресс, 2004. – 768 с.
61. *Радиолокация поверхности Земли из космоса /* под ред. Л.М. Митника и Л.В. Викторова. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 200 с.
62. *Калмыков А.И., Ефимов В.Б., Кавелин С.С. и др.* Радиолокационная система ИСЗ «Космос-1500» // *Исследование Земли из космоса.* – 1984. – № 5. – С. 84-93.
63. *Исследование Земли из космоса.* – М.: Наука. – 1985. – № 3. – 128 с.
64. *Калмыков А.И., Курекин А.С., Ефимов В.Б., Фетисов А.Б., Иголкин В.В., Торчун П.М., Левантовский В.Ю., Зельдис В.И., Кавелин С.С., Драновский В.И., Салтыков Ю.Д., Гринченко А.А., Емец В.Н., Кулешов Ю.А., Курбатов А.А.* Радиолокатор бокового обзора ИСЗ «Космос-1500» // *Исследование Земли из космоса.* – 1985. – № 3. – С. 76-83.
65. *Кавелин С.С., Белов Д.Г., Гладилин В.С., Зубенко В.Ф., Игдалова И.С., Петренко Г.В., Поллуксов И.М., Хмыров Б.Е.* Экспериментальный океанографический спутник «Космос-1500» // *Исследование Земли из космоса.* – 1985. – № 3. – С. 115-122.
66. *Skolnik M.I.* Radar handbook (2nd ed.). – New York: McGraw-Hill Companies, 1990. – 1232 p.
67. *Афанасьев Ю.А., Нелепо Б.А., Селиванов А.С., Хмыров Б.Е., Тамкович Г.М., Шестопалов В.П., Арманд Н.А., Ходарев Ю.К., Бушуев Е.И., Терехин Ю.В., Кортаев Г.К.* Программа экспериментов на ИСЗ «Космос-1500» // *Исследование Земли из космоса.* – 1985. – № 3. – С. 3-8.
68. *Драновский В.И., Салтыков Ю.Д., Меланченко А.Г., Куликовский О.Ю., Емельянов О.Л.* Спутник дистанционного зондирования Земли «Сич-1М» // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное*

- использование ресурсов шельфа / Тематический сборник научных трудов «Дистанционное зондирование» (отв. ред. выпуска Г.К. Коротаев). – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2004. – вып. 11. – С. 184-197.
69. *Первый «Океан-О» на орбите* // Новости космонавтики. – 1999 – т. 9, № 9 (200). – С. 34-37.
 70. *Макриденко Л.А., Волков С.Н., Горбунов А.В., Трифонов Ю.В., Ходненко В.П.* Космический аппарат гидрометеорологического и океанографического наблюдения «Метеор-М» № 1 // Вопросы электромеханики. – 2009. – т. 108, № 1. – С. 44-55.
 71. *Малогобаритный бортовой радиолокационный комплекс космического базирования «Северянин-М» для дистанционного зондирования Земли.* Сайт ОАО «НИИ точных приборов». [Электронный ресурс]. http://www.niitp.ru/directions/05/development/development_6.html (Проверено 15.04.2010).
 72. *Внотченко С.Л., Коваленко А.И., Рима В.В., Теличев А.В., Чернышов В.С., Шишанов А.В.* Системные принципы реализации космического радиолокатора «Северянин-М». (Всероссийская научно-практическая конференция «Космическая радиолокация – КРЛ-2010», г. Муром. 27.06.2010 – 01.07.2010). [Электронный ресурс]. <http://mivlgu.ru/conf/murom2010/html/matherials/KRL2010/plenum/4.pdf> (Проверено 12.12.2010).
 73. *Асмус В.В., Кропотынцева В.А., Милехин О.Е., Тренина И.С.* Действующие и перспективные российские спутниковые системы и их использование для оперативного мониторинга ледяного покрова полярных областей Земли и изучения климатических изменений / Международная научная конференция «Морские исследования полярных областей земли в Международном полярном году 2007/2008». 21-23 апреля 2010 г. С-Петербург, ГУ «ААНИИ». [Электронный ресурс]. <http://www.aari.ru/news/conferences/20100421/seaice/Asmus.pdf> (Проверено 12.12.2010).
 74. *Коротаев Г.К., Малиновский В.В., Мотыжев С.В., Пустовойтенко В.В., Радайкина Л.Н., Станичный С.В., Суетин В.С., Суслин В.В.* Компоненты спутникового мониторинга Черного моря (вклад Украины в Black Sea GOOS). – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2001. – 116 с. (Препринт / НАН Украины, МГИ).
 75. *Юровский Ю.Ю., Малиновский В.В., Смолов В.Е.* Радиолокационные методы мониторинга прибрежной зоны: возможности и проблемы использования / Современные проблемы океанологии, вып. № 4. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2008. – 75 с.
 76. *Бартон Д.* Радиолокационные системы / сокр. пер. с англ. под общ. ред. К.Н. Трофимова. – М.: Воениздат, 1967. – 480 с.
 77. *Долуханов М.П.* От миллигерц до терагерц. – Л.: Судостроение, 1970. – 104 с.
 78. *Черный Ф.Б.* Распространение радиоволн. – М.: «Сов. радио», 1972. – 464 с.
 79. *Кудрявцев В.Н.* Упрощенная модель трансформации атмосферного погранслоя над температурным фронтом // Морской гидрофизический журнал. – 1995. – № 2. – С. 24-51.
 80. *Kudryavtsev V.N., Grodsky S.A., Dulov V.A., Malinovsky V.V.* Observation of atmospheric boundary layer evolution above the Gulf Stream frontal zone // Bound. Layer Meteorology. – 1996. – v. 79. – P. 51-82.
 81. *Кудрявцев В.Н., Малиновский В.В., Родин А.В.* Проявление температурных фронтов в радиолокационных изображениях океана // Исследование Земли из космоса. – 1999. – № 6. – С. 16-26.
 82. *Волны-убийцы.* [Электронный ресурс]. <http://www.maxwave.ru/info.php> (Проверено 15.12.2010).

83. Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. Волны-убийцы: факты, теория и моделирование. – Н. Новгород: Нижегородский гос. техн. университет. – 2004. – 158 с.
84. Доценко С. Ф., Иванов В. А. Волны-убийцы / Современные проблемы океанологии, вып. 1. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2006. – 42 с.
85. Бадулин С.И., Иванов А.Ю., Островский А.Г. Волны-убийцы и их дистанционное зондирование // Исследование Земли из космоса. – 2006. – № 1. – С. 77-92.
86. Волны-убийцы. Сайт «Корабельный портал». [Электронный ресурс]. http://korabley.net/news/volny_ubijcy/2010-05-01-556 (Проверено 15.12.2010).
87. Волны-убийцы в Средиземном море накрыли круизный лайнер «Louis Majesty». Есть жертвы. Сайт «Корабельный портал». [Электронный ресурс]. http://korabley.net/news/volny_ubijcy_v_sredizemnom_more_nakryli_kruiznyj_lajner_louis_majesty_est_zhertvy/2010-03-04-499 (Проверено 15.12.2010).
88. Ермаков С.А. Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн. – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2010. – 164 с.
89. Krishen K. Detection of oil spills using 13,3 GHz radar scatterometer // Journ. Geoph. Res. – 1973, – v. 78, № 12. – P. 1952-1963.
90. Kraus S.P., Esten J.E., Atwater S.G., Jensen J.R., Volimers R.R. Radar detection of surface oil slicks // Photogrammetric Eng. Remote Sensing. – 1974. – v. 43. – P.1523-1531.
91. Галаев Ю.М., Калмыков А.И., Курекин А.С., Лементя Ю.А., Нелено Б.А., Островский И.Е., Пичугин А.П., Пустовойтенко В.В., Терехин Ю.В. Радиолокационные обнаружения нефтяных загрязнений морской поверхности // Известия АН СССР: Физика атмосферы и океана. – 1977. – т. 13, № 4. – С. 406-414.
92. Пустовойтенко В.В. Определение динамических характеристик морской поверхности радиолокационным методом : дис. ... кандидата физ.-мат. наук. Морской гидрофизический институт НАН Украины. – Севастополь, 1984. – 224 с.
93. Малиновский В.В., Иванов В.А., Sandven S., Дулов В.А. Наблюдение загрязнений поверхности моря по радиолокационным данным // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2005. – вып. 13. – С. 99-110.
94. Сайт «Прозрачный мир». [Электронный ресурс]. http://maps.transparentworld.ru/news/2008_11_01-1.html (Проверено 25.12.2010).
95. Керченская катастрофа: как ее видели с орбиты. [Электронный ресурс]. <http://gorod.tomsk.ru/index-1211342570.php> (Проверено 10.01.2010).
96. Лаврова О.Ю., Бочарова Т.Ю., Митягина М.И., Строчков А.Я. Спутниковый мониторинг последствий катастрофического разлива нефтепродуктов в Керченском проливе. [Электронный ресурс]. http://d33.infospace.ru/d33_conf/2009,1/409-420.pdf (Проверено 05.01.2010).
97. Аркон-2. Космический комплекс радиолокационного наблюдения. Сайт НПО им. С.А. Лавочкина. [Электронный ресурс]. <http://www.laspase.ru/rus/arcon.php> (Проверено 25.12.2010).
98. Космическая система (КС) «Арктика». Цели создания и задачи КС «Арктика». Сайт Федерального космического агентства РФ (Роскосмос). [Электронный ресурс]. <http://www.roscosmos.ru/main.php?id=2&nid=12070> (Проверено 10.10.2010).
99. Глазкова И.А. Космическая система дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) Государственного космического научно-производственного центра (ГКНПЦ) им. М.В. Хруничева. [Электронный ресурс]. <http://www.iki.rssi.ru/earth/trudi/1-05.pdf> (Проверено 10.01.2010).
100. Кирилин А.Н., Ахметов Р.Н., Анишаков Г.П. Основные результаты и планы ГНПРКЦ «ЦСКБ-ПРОГРЕСС» по созданию космических средств ДЗЗ социально-экономического назначения. [Электронный ресурс]. <http://jurnal.vniiem.ru/text/105/5.pdf> (Проверено 10.01.2010).

101. *Космическая система радиолокационного наблюдения «Север»*. Сайт ФГУП «Конструкторское бюро "Арсенал" им. М.В. Фрунзе». [Электронный ресурс]. <http://www.kbarsenal.ru/sever.php> (Проверено 12.11.2010).
102. *Малый космический аппарат «Кондор-Э» с радиолокатором синтезированной апертуры*. [Электронный ресурс]. <http://www.promash.ru/activities/ru/space1.htm?l=0> (Проверено 15.12.2010).
103. *Радиолокатор синтезированной апертуры обзора земной поверхности для малых космических аппаратов*. Сайт ОАО «Концерн радиостроения "Вега"». [Электронный ресурс]. <http://www.vega.su/production/detail.php?ID=17> (Проверено 12.11.2010).
104. *Конюхов С.Н.* КБ «Южное» им. М.К. Янгеля: космическая деятельность в интересах человечества // Вселенная, пространство, время. – 2006. – № 4 (апрель). – С. 26-29.
105. *Деятельность Украины по созданию спутников дистанционного зондирования земли*. Информационный альбом. [Электронный ресурс]. www.unoosa.org/pdf/pres/stsc2008/tech-23.pdf (Проверено 10.12.2010).
106. *Українська програма спостереження Землі із космосу (Ukrainean program of Earth observation)*. – Київ. ТОВ «СЕЕМ», 2005. – 95 с.
107. *Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку і безпеки GEOUA. (Aerospace observations for sustainable and development and security GEO-UA)*. – Київ. ТОВ «СЕЕМ», 2008. – 118 с.
Электронная версия: Сайт «Державне космічне агентство України». Буклет «Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку і безпеки. GEO-UA». [Электронный ресурс]. <http://www.space.com.ua/pdf/GEO-UA.pdf> (Проверено 10.10.2010).
108. *Державне космічне агентство України*. Сайт «Вікіпедія». [Электронный ресурс]. http://uk.wikipedia.org/wiki/Державне_космічне_агентство_України (Проверено 10.12.2010).
109. *Загальнодержавна цільова науково-технічна космічна програма України на 2008-2012 роки*. Официальный сайт «Державне космічне агентство України». [Электронный ресурс]. <http://www.nkau.gov.ua/nsau/catalogNEW.nsf/160776743F0D4A37C3256BB30050B196/6FAF7E382FEEA2A2C225726D00425D75?OpenDocument&Lang=U> (Проверено 15.12.2010).
110. *RADARSAT-1*. Сайт «EoPortal». [Электронный ресурс]. http://www.eoportal.org/directory/pres_RADARSAT1.html (Проверено 20.12.2010).
111. *RADARSAT-2*. Сайт «EoPortal». [Электронный ресурс]. http://www.eoportal.org/directory/pres_RADARSAT2.html (Проверено 20.12.2010).
112. *ERS-1 (European Remote-Sensing Satellite-1)*. Сайт «EoPortal». [Электронный ресурс]. http://www.eoportal.org/directory/pres_ERS1EUROPEANREMOTESENSING SATELLITE1.html (Проверено 20.12.2010).
113. *ERS-2 (European Remote-Sensing Satellite-2)*. Сайт «EoPortal». [Электронный ресурс]. http://www.eoportal.org/directory/pres_ERS2EuropeanRemoteSensingSatellite2.html (Проверено 20.12.2010).
114. *JERS-1 (Japan Earth Resources Satellite)*. Сайт «EoPortal». [Электронный ресурс]. http://www.eoportal.org/directory/pres_JERS1JapanEarthResourcesSatellite.html (Проверено 20.12.2010).
115. *ENVISAT (Environmental Satellite)*. Сайт «EoPortal». [Электронный ресурс]. http://www.eoportal.org/directory/pres_ENVISATEnvironmentalSatellite.html (Проверено 20.12.2010).
116. *SIR (Shuttle Imaging Radar) Missions*. Сайт «EoPortal». [Электронный ресурс]. http://www.eoportal.org/directory/pres_SIRShuttleImagingRadarMissions.html (Проверено 20.12.2010).

117. *SRTM* (Shuttle Radar Topography Mission). Сайт «EoPortal». [Электронный ресурс]. http://www.eoportal.org/directory/pres_SRTMShuttleRadarTopographyMission.html (Проверено 20.12.2010).
118. *Shuttle Radar Topography Mission*. Сайт «NASA. Jet Propulsion Laboratory Californian Institute Technology». [Электронный ресурс]. <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/mision.htm> (Проверено 20.12.2010).
119. *TanDEM-X* (TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement). Сайт «EoPortal». [Электронный ресурс]. http://www.eoportal.org/directory/pres_TanDEMXTerraSARXaddonforDigitalElevationMeasurement.html (Проверено 20.12.2010).
120. *CryoSat-2* (Earth Explorer Opportunity Mission-2). Сайт «EoPortal». [Электронный ресурс]. http://www.eoportal.org/directory/pres_CryoSat2EarthExplorerOpportunityMission2.html (Проверено 20.12.2010).
121. Итоги науки и техники. Серия «Исследование Земли из космоса». – М: ВИНТИ, 1987. – Том 1, 196 с. – Том 2, 172 с.
122. *ALOS-2* (Advanced Land Observing Satellite-2). Сайт «EoPortal». [Электронный ресурс]. <http://events.eoportal.org/presentations/330/10003264.html> (Проверено 25.12.2010).

Материал поступил в редакцию 25.12.2010 г.

После переработки 15.01.2011 г.