

УДК 574.5.08.+541.128.7

Г. К. Коротаев¹, В. В. Пустовойтенко¹, Ю. В. Терехин¹,
В. И. Драновский², С. С. Кавелин², Ю. Д. Салтыков²,
О. Л. Емельянов², В. Н. Цымбал³, В. Б. Ефимов³,
А. С. Курекин⁴, В. А. Комяк⁴, А. П. Пичугин⁵

¹Морський гідрофізичний Інститут Національної академії наук України, Севастополь

²Державне конструкторське бюро «Південне», Дніпропетровськ

³Центр радіофізичного зондування Землі Національної академії наук та Національного космічного агентства України ім. А. І. Калмикова, Харків

⁴Інститут радіофізики та електроніки Національної академії наук України, Харків

⁵Науковий центр оперативного моніторингу Землі, Москва, Росія

Тридцать лет отечественной спутниковой океанологии. 2. Прикладные аспекты использования спутниковой информации

Надійшла до редакції 13.08.07

Історія вітчизняної супутникової океанології налічує близько 30 років: у 1976—1977 рр. були ухвалені рішення про розробку експериментальних вітчизняних океанографічних КА «Океан-Э» і розробку і створення державної космічної експлуатаційної системи дослідження природних ресурсів Землі «Ресурс» та її космічної підсистеми «Океан». У статті розглядаються питання функціонування космічної океанографічної наглядової системи «Океан» — «Січ» і основні напрями практичного використання одержуваної інформації при рішенні фундаментальних і прикладних задач у області океанології, екології, агрогидрометеорології і т. ін.

ВВЕДЕНИЕ

История отечественной спутниковой океанологии насчитывает около 30 лет: в 1976-1977 гг. были приняты решения о разработке экспериментальных отечественных океанографических КА «Океан-Э» [8] и о разработке и создании государственной космической эксплуатационной системы исследования природных ресурсов Земли «Ресурс» и ее космической подсистемы «Океан» [16].

Использование методов и средств космической

техники в океанологии обеспечивает возможность создания междисциплинарных систем непрерывного контроля состояния морских акваторий примерно такого же типа, как метеорологические системы диагноза и прогноза погоды. Междисциплинарный диагноз состояния морских акваторий в реальном масштабе времени и среднесрочный прогноз его эволюции являются предметом нового, бурно развивающегося в последние годы, направления физической океанологии — оперативной океанологии.

В первой части нашей работы рассмотрены

основные этапы создания отечественных океанографических наблюдательных систем «Океан» и «Січ». При этом основное внимание было уделено космическому сегменту систем — космическим аппаратам (КА) и целям и задачам проводимых с их помощью работ.

Здесь рассмотрим некоторые вопросы функционирования космической наблюдательной системы «Океан»—«Січ» и основные направления практического использования получаемой информации при решении фундаментальных и прикладных задач в области океанологии (океанографии), экологии, агрогидрометеорологии и т. д.

ПОДСПУТНИКОВОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Черноморский контрольно-калибровочный полигон. Одним из важнейших аспектов работы космической наблюдательной системы является обеспечение достоверности получаемой с ее помощью информации. Поэтому прежде чем показывать примеры практического использования спутниковой информации в интересах решения широкого круга фундаментальных и прикладных задач, рассмотрим, как при создании океанографических космических наблюдательных систем «Океан» и «Січ» решалась проблема обеспечения спутниковых измерений сопутствующей контрольно-калибровочной информацией.

Дело в том, что в приложении к задачам океанологии, экологии морских систем и т.д. спутниковые средства и системы позволяют определить только параметры тонкого поверхностного слоя, которые не отражают полностью параметры трехмерной структуры морской среды. Наиболее адекватную информацию можно получить при совместном анализе пространственно распределенных спутниковых данных и детальной контактной информации. Это требует введения в состав космических наблюдательных систем в качестве неотъемлемой их части сети контрольно-калибровочных полигонов, обеспечивающих космическую систему требуемой контрольно-калибровочной информацией и создающих возможность проведения научно-методических работ, необходимых для дальнейшего раз-

вития теории, методов и средств космической океанологии и совершенствования методологии проведения непосредственно контрольно-калибровочных измерений [20].

В рамках работ по созданию космической подсистемы «Океан» специалисты Морского гидрофизического института при участии ряда научно-исследовательских и проектных организаций создали Черноморский контрольно-калибровочный подспутниковый полигон (ЧККП) и провели его опытную эксплуатацию. Опыт комплексных подспутниковых экспериментов в период работы КА «Океан-Э», «Океан-ОЭ» и «Океан-О1» позволил оптимизировать и унифицировать организационную структуру ЧККП и комплекс его программно-технических средств. В его состав вошли следующие контрольно-калибровочные средства и информационно-измерительные системы:

- контрольно-калибровочный центр (стационарная океанографическая платформа);
- авиационные информационно-измерительные системы (на базе самолетов Л-410 и АН-30);
- судовые информационно-измерительные системы (на базе судна на подводных крыльях «Комета» и научно-исследовательских судов института);
- радиоцентры координации работ подвижных информационно-измерительных систем и приема гидрометеорологической информации;
- автономные пункты приема и обработки спутниковой информации (АППИ) судового и наземного базирования;
- специальный стенд обработки спутниковой и сопутствующей информации.

Ядром ЧККП, обеспечивающим возможность отработки методик измерений океанографических параметров и методик калибровки аппаратуры ДЗЗ, стала стационарная океанографическая платформа*, внешний вид которой показан на рис. 1. Платформа введена в эксплуатацию на первых этапах создания подсистемы «Океан» и обеспечивает размещение в лабораторных помещениях, на трех палубах и на вспомогательных выдвижных устройствах (мостики, выстрелы) оборудования, предназначенного для выполнения широкого спектра измерений параметров морской поверхности, морской среды и атмосферы.

* Удаление платформы от берега около 500 м. Глубина моря в месте ее расположения — около 30 м. Высота основной палубы платформы над спокойным уровнем моря — 12 м, площадь лабораторных, жилых и вспомогательных помещений — 160 м².

ры. На последующих этапах при поддержке КБ «Южное» была создана вторая платформа, допускающая установку на больших глубинах. Однако ввести ее в эксплуатацию в связи с изменившейся экономической обстановкой не удалось.

Авиационные информационно-измерительные системы ЧКПП обеспечивали выполнение аэровизуальных наблюдений (Л-410) и инструментальных (АН-30) измерений параметров полей температуры и цвета поверхности моря, интенсивности волнения, областей морской поверхности, подвергнувшихся интенсивному загрязнению, и т. д.

Судовые информационно-измерительные системы, развернутые на научно-исследовательских судах «Комета», «Профессор Колесников» и «Академик Вернадский», обеспечивали выполнение стандартных и нестандартных измерений океанографических параметров в акватории Черного и Средиземного морей и в других районах Мирового океана. Кроме этого, для измерений в акватории Черного моря использовались свободно дрейфующие буйковые станции (дрифтеры) [2, 20].

Радиоцентры ЧКПП обеспечивали координацию работ мобильных информационно-измерительных систем, прием диагностических и прогностических гидрометеорологических карт, данных стационарных метеорологических и океанографических измерений, а также другой метеорологической и океанографической информации, распространяемой по радиоканалам.

АППИ обеспечивали оперативный прием информации, передаваемой в аналоговом виде с борта орбитальных и геостационарных КА. АППИ были развернуты* непосредственно в институте, на судне «Академик Вернадский» и в Гвинейском научно-исследовательском центре, что позволяло получать снимки не только Черного и Азовского морей и морей Восточного Средиземноморья, но и Центральной и Северной Атлантики. В последующем АППИ, развернутый в МГИ НАН Украины, был дооснащен каналом приема информации, работающим в частотном диапазоне 1.7 ГГц и адаптированным к информационным потокам, передаваемым в

цифровом виде с борта КА типа NOAA. Это позволило, во-первых, существенно повысить качество принимаемых данных за счет снижения уровня эфирных помех при приеме информации (в диапазоне 137 МГц интенсивные помехи создают средства внутривоздушной диспетчерской связи, вплоть до полного срыва сеансов приема спутниковой информации) и, во-вторых, — перейти к анализу качественно новых изображений морских акваторий, пространственное разрешение которых составляет 1×1 км.

Параметры цифровой станции приема спутниковой информации МГИ НАН Украины в настоящее время обеспечивают возможность уверенного приема изображений не только акватории Черного и Азовского морей, но и морей восточного и центрального Средиземноморья, Каспийского, Аральского и Балтийского морей.

Во время проведения экспериментов «Океан-Э» и «Океан-ОЭ» обработка спутниковой и сопутствующей информации обеспечивалась созданным на базе вычислительного центра института специальным стендом обработки спутниковой информации и другими проблемно-ориентированными программно-аппаратными комплексами. Основу специального стенда составляли две ЭВМ ЕС-1033, дополненные в последующем ЭВМ ЕС-1060 (самой мощной в те годы в Крыму) и ЭВМ СМ-1420 «МЭРА» [6, 9].

Современный аппаратно-программный комплекс технических средств приема и обработки спутниковой и сопутствующей информации МГИ НАН Украины построен на основе персональных электронных вычислительных машин, объединенных в единую локальную сеть. При этом для получения разноплановой сопутствующей информации широко используются возможности интернет. Подобный комплекс создан и эксплуатируется в ЦРЗЗ им. А. И. Калмыкова.

В настоящее время на Черноморском ККП проводятся научно-методические работы, направленные на дальнейшее изучение физики формирования морской поверхностью информационных сигналов в видимом, ИК- и СВЧ-диапазонах и развитие на этой основе методов интерпретации разноплановой спутниковой ин-

* При подготовке к работам с КА «Океан-ОЭ» № 1 («Космос-1500») в ИРЭ АН УССР собственными силами также был создан АППИ, предназначенный для приема информации, передаваемой в аналоговом виде в частотном диапазоне 137 МГц. При подготовке к работам с КА «Сич-1М» этот АППИ был оснащен каналом приема цифровой информации, передаваемой с борта КА в частотном диапазоне 1.7 ГГц.

Основные технические и информационные характеристики РЛС БО КА космической наблюдательной системы «Океан» — «Січ»

| Наименование | Значение | Примечания |
|---|---------------|--|
| Ширина полосы обзора, км | | |
| стандартная | 450—500 | |
| расширенная | 700 | только на КА «Січ-1М» |
| Потенциальное разрешение (с учетом накопления сигнала), км | | по уровню –3 дБ |
| в направлении полета в полосе обзора | от 2.1 до 2.5 | диаграммы направленности антенны |
| перпендикулярно направлению полета в полосе обзора | от 0.9 до 0.6 | |
| Длина волны, см | 3.1 | |
| Длительность импульса излучения, мкс | 3 | |
| Мощность излучения в импульсе, кВт | 100 | |
| Частота повторения импульсов, Гц | 100 | |
| Поляризация излучения и приема | вертикальная | |
| Пороговая чувствительность приемника, дБ/Вт | –140 | |
| Число некогерентных накоплений импульсов в тракте обработки сигнала | 8 | для КА «Космос-1500» |
| Скорость вывода РЛИ на выходе системы обработки, строк/с | 4 | согласовано с пропускной способностью радиоканалов передачи данных по уровню –3 дБ |
| Ширина диаграммы направленности антенны | | |
| в азимутальной (H) плоскости | 42 | |
| в угломестной (E) плоскости | 0.2 | |
| Коэффициент усиления антенны, дБ | 35 | |
| Внутренняя калибровка | есть | |
| Число градаций калибровочного клина | 8 | |
| Количество элементов изображения | 570 | для КА «Космос-1500» |
| Время считывания РЛ-информации, мс | | |
| совмещенный режим | 46.9 | |
| автономный (РЛС БО) | 156.2 | |
| Угол разворота антенны в угломестной плоскости от надира | 35° | для КА «Космос-1500» |

формации и ее усвоения в системе оперативного гидрофизического и экологического мониторинга морских акваторий. Для этого используется стационарная океанографическая платформа, малые плавсредства, обеспечивающие возможность измерения ряда океанографических параметров на удалении до 10 миль от берега, и система автономных поверхностных дрейфующих буйковых станций [23].

Самолет-лаборатория АКДЗ-30. Эксплуатация самолетов-лабораторий как элементов ЧККП была прекращена в начале 1990-х годов. Но необходимость в мобильных средствах, обеспечивающих возможность проведения как контрольно-калибровочных, так и научно-методических работ в области ДЗЗ морских акваторий, есть. С учетом этого специалистами ЦРЗЗ НАНУ-НКАУ в содружестве со специалистами ЦАКИЗ ИГН НАН Украины и АНТК им. О. К. Антонова в последние годы создан

авиационный многоцелевой комплекс дистанционного зондирования природной среды АКДЗ-30 [21]. В состав его информационно-измерительного комплекса входят:

- РЛС БО 8-мм диапазона;
- сканирующий радиометр ИК-диапазона;
- аэрофотокамера и видеокамера;
- система бортовой обработки, накопления и отображения информации;
- навигационный приемник системы GPS.

Комплекс АКДЗ-30 ориентирован на решение широкого круга научных и практических задач в различных областях научной и хозяйственной деятельности. Прежде всего это оперативное обнаружение предвестников и мониторинг проявлений разнообразных природных и техногенных катастроф, природных кризисных ситуаций (наводнения, разливы на водной поверхности нефтепродуктов, ледовые заторы на реках, крупномасштабные пожары и многое другое), а

также поиск проявлений полезных ископаемых, обнаружение судов-нарушителей границ морской экономической зоны и т.д.

Комплекс размещен на борту самолета АН-30 МЧС Украины, имеет относительно невысокие эксплуатационные расходы и хорошие летные характеристики. Внешний вид самолета-лаборатории АКДЗ-30 показан на рис. 2, а, а размещение приборов в салоне самолета — на рис. 2, б—г.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ, ПОЛУЧАЕМОЙ КС «ОКЕАН» — «СІЧ»

Не претендуя на полноту изложения*, рассмотрим некоторые примеры использования информации, получаемой с помощью средств ДЗЗ космических наблюдательных систем «Океан» и «Січ-1». Основное внимание при этом уделим информации, получаемой с помощью спутниковой обзорной РЛС БО, технические и информационные характеристики которой приведены в таблице.

Напомним, что РЛС БО, используемая на океанографических КА типа «Океан» — «Січ», имеет полосу обзора около 500 км (для морской поверхности реальная ширина полосы обзора несколько варьирует в зависимости от гидрометеорологических условий) и позволяет наблюдать подстилающую поверхность вне зависимости от ее освещенности, наличия облачности, времени года и суток.

Квазиоперативный мониторинг акваторий Азовского и Черного морей. Высокая чувствительность РЛС БО к изменению геометрических (шероховатость) и электрофизических (диэлектрическая проницаемость, влажность) параметров поверхности создает физические основы для контроля состояния как морских акваторий и морских и материковых льдов, так и поверхности суши.

В период с ноября 1995 по февраль 1997 г. параллельно МГИ НАН Украины и ЦРЗЗ НАНУ-НКАУ им. А. И. Калмыкова на основе использования информации, получаемой с помощью РЛС БО КА «Січ-1», проведен квазиоперативный РЛ- мониторинг Черного и Азовского

морей. На рис. 3 в качестве примера приведена серия РЛ-изображений восточной части Черного моря, полученных с помощью РЛС БО КА «Січ-1» в марте 1996 г. На снимках зафиксирована ветровая струя, возникшая вследствие влияния особенностей рельефа местности. По полученным нами оценкам скорость ветра в стрессе ветровой струи составляла 10—12 м/с. Поскольку струя «отжата» от берега, она находится вне поля зрения береговых гидрометеорологических станций и постов. Стандартные метеорологические карты приземного анализа в эти дни показывали наличие в регионе слабоградиентного поля давления, не позволяющего спрогнозировать формирование ветровой струи. Обращает на себя внимание и размер области, находящейся под действием струи (ширина полосы обзора РЛС БО при наблюдении морской поверхности составляет около 450—470 км).

Наблюдение тропических штормов и ураганов. Другим примером практического использования спутниковой РЛ-информации является наблюдение опасных гидрометеорологических явлений — тропических штормов и ураганов. Они наносят человечеству катастрофические экономические потери, уносят многие человеческие жизни. Отметим, что только в 2005 г. прошел двадцать один ураган, среди которых особенно разрушительными стали Katrina, Rita, Sten, Vilma, затопившие Новый Орлеан и уничтожившие нефтяные платформы в Мексиканском заливе. Ураган «Катрина» имел наивысшую, пятую, категорию и стал самым дорогостоящим и одним из самых смертоносных ураганов в американской истории и шестым по силе когда-либо зарегистрированным атлантическим ураганом. «Рита» и «Вильма» имели четвертую категорию. В последние годы наблюдается ярко выраженная тенденция к увеличению год от года как мощности, так и количества ураганов. Это существенно повышает актуальность проблемы обнаружения ураганов на как можно ранней стадии их развития и своевременного оповещения о них. И здесь без спутниковой РЛ-информации не обойтись.

Для оценки возможного ущерба от ураганов используется разработанная в начале 1920-х годов 5-бальная шкала Г. Саффира и Р. Симп-

* Более подробное описание полученных данных и результатов анализа информации можно найти, например, в монографиях [14, 15, 17], тематическом [4] и других выпусках журнала «Исследование Земли из космоса».

сона (Saffir-Simpson scale) [25]:

тропический ураган (1 категория) — скорость ветра от 74 до 95 миль/ч (119—153 км/ч, 33—42 м/с);

тропический ураган (2 категория) — скорость ветра от 96 до 110 миль/ч (154—177 км/ч, 43—49 м/с);

сильный тропический ураган (3 категория) — скорость от 111 до 130 миль/ч (178—210 км/ч, 50—58 м/с);

очень сильный тропический ураган (4 категория) — скорость ветра от 151 до 155 миль/ч (211—249 км/ч, 59—69 м/с);

катастрофический тропический ураган (5 категория) — скорость ветра превышает 155 миль/ч (250 км/ч, 69 м/с).

Обзорные РЛС БО («Океан-О1», «Сич-1», «Сич-1М») могут с успехом использоваться для ранней диагностики тропических ураганов, дополняя и уточняя при этом традиционную метеорологическую информацию. Работы в этом направлении начаты еще во время эксплуатации КА «Океан-ОЭ» («Космос-1500») в ИРЭ АН УССР [22]. Впервые спутниковая обзорная РЛС БО была использована для наблюдения за тропическим ураганом «Диана» в 1984 г. Его РЛ-обнаружение в начальной стадии развития позволило своевременно принять необходимые меры и минимизировать причиненный ущерб. На рис. 4 приведены изображения урагана, полученные с помощью комплекса ДЗЗ КА «Космос-1500»: изображение, полученное в видимом диапазоне с помощью сканера МСУ-М ([7, табл. 2]), показано на рис. 4, а. РЛ-изображения области, охваченной ураганом, полученные 11 и 12 сентября 1984 г., показаны на рис. 4, б и в. На РЛ-изображениях темная область в центре с поперечником около 13–14 км представляет собой глаз урагана. Здесь скорость ветра ослабевает, что сопровождается быстрым затуханием гравитационно-капиллярных волн и снижением уровня формируемого морской поверхностью РЛ-сигнала. Но общее состояние морской (океанской) поверхности в области гла-

за урагана характеризуется наличием очень крутых, высоких и опасных для мореплавания длинных поверхностных волн.

Еще раз обратим внимание на то, что РЛ-изображения, в отличие от изображений, получаемых в видимом и ИК-диапазонах, характеризуют собой не структуру верхнего слоя облачности, а структуру поля шероховатости поверхности и, в конечном итоге, структуру поля ветра непосредственно вблизи морской поверхности. При этом поверхность наблюдается в любое время суток независимо от плотности облачности.

Мониторинг загрязнений морской поверхности поверхностно-активными веществами. Разливы нефти на море наносят огромный материальный ущерб. Наибольший общественный резонанс имеют катастрофические по своим масштабам и наносимому ущербу разливы нефти и нефтепродуктов при авариях танкеров. Вместе с тем вне поля зрения остаются утечки, происходящие во всей технологической цепи добычи нефти и ее транспортировки. Значителен вклад в загрязнение морских акваторий бытовых и промышленных стоков, в том числе приносимых реками. Одним из проявлений нефтяного загрязнения морской поверхности является образование на ней пленок*, существенно изменяющих ход естественных обменных процессов между морем и атмосферой. При скорости ветра до 3—5 м/с при наличии нефтяной пленки морское волнение не развивается. При скорости ветра до 13 м/с на поверхности моря различимо выглаженное пятно нефтяной пленки — так называемый «слик», обнаруживаемый РЛ-средствами**. Применительно к акватории Черного моря задача приобретает особую актуальность в связи с интенсификацией морских перевозок нефти, строительством нефтеперевалочных терминалов и перспективами дальнейшего развития в акватории морской добычи нефти.

В качестве иллюстрации возможностей РЛС БО отечественных океанографических КА на рис. 5 приведены изображения Синайского по-

* Нефть не растекается до мономолекулярных слоев, а ее пленки, как правило, имеют толщину от нескольких сантиметров до долей миллиметра. При растекании легкие фракции, включая токсичные ароматические углеводороды, испаряются, а остаточная пленка имеет повышенную вязкость и не столь низкое поверхностное натяжение, как в начальной стадии разлива. При отсутствии ветра, волн и течений 1 м³ сырой нефти растекается в пятно радиусом 50 м за 1.5 ч.

** Применительно к мониторингу сликов большими потенциальными возможностями обладают РЛС БО с высокой разрешающей способностью — РСА. Отечественная спутниковая океанология в настоящее время такими бортовыми РЛС не располагает.

луострова, полученные с помощью КА «Космос-1500». На рис. 5, а приведено изображение, полученное в видимом диапазоне с помощью сканера МСУ-М, а на рис. 5, б — изображение, полученное с помощью РЛС БО. Белой стрелкой на рис. 5, б показана область сликов, образованных разливом нефтепродуктов. Слик имеет меньшую в сравнении с окружающими участками моря яркость, поскольку шероховатость морской поверхности в слике ниже, чем вне его.

Мониторинг ледового покрова Азовского моря. Существенное различие электрофизических и геометрических характеристик морской и ледовой поверхности позволяет уверенно решать задачу обнаружения и распознавания льда на поверхности морских акваторий, оценивать его возраст и сплоченность, обнаруживать трещины, полыньи и т. д. Работы в этом направлении целенаправленно проводились специалистами Академии наук Украины (ИРЭ АН УССР) в период работы экспериментальных и эксплуатационных КА «Океан-ОЭ» и «Океан-О1» [17]. В первой части статьи мы детально рассмотрели примеры использования получаемой РЛ-информации при обеспечении транспортных и аварийно-спасательных операций в Арктике и Антарктике. Развивая эту тему, отметим, что в период эксплуатации КА «Січ-1» специалистами ЦРЗЗ НАНУ-НКАУ продолжена (с акцентом на замерзающие моря умеренных широт, в частности Азовское) отработка методики использования данных обзорных РЛС БО для решения региональных задач обеспечения мореплавания в зимних условиях [3]. В меньшем объеме подобные работы выполнялись в этот период и в МГИ НАН Украины. На рис. 6 показана серия РЛ-изображений Азовского моря и прилегающих районов, полученных с помощью РЛС БО КА «Січ-1» в весенний период 1996 г.: первый из них (а) получен 24 февраля 1996 г., второй (б) — 6 марта 1996 г., а третий (в) — 1 апреля 1996 г. Положение кромки льда отмечено на снимках белыми стрелками. Географическая привязка снимков позволяет проследить динамику изменения ледовой обстановки в контролируемом районе, в частности — оценить скорость смещения положения кромки льда. Нетрудно видеть, что за период наблюдения она сместилась в направлении с востока на запад на расстояние около 1.5°. Подобная информация о

состоянии ледового покрова Азовского моря весьма интересна для планирования навигации в его бассейне. Тем более, что в осенне-зимний период регион часто закрыт облачностью, что исключает возможность мониторинга ледового покрова с помощью спутниковых средств оптического и ИК-диапазонов.

Мониторинг ледового покрова Антарктиды. Наличие на борту КА бортовых запоминающих устройств позволяет проводить мониторинг морских акваторий, расположенных на значительном удалении от центров приема и обработки спутниковой информации, в частности осуществлять сопровождение промысловых и научных судов, работающих в высоких широтах, проводить мониторинг предполагаемых районов их работы на ранних стадиях планирования и т. д.

Для Украины эта задача особо актуальна в приложении к обеспечению работы полярной Антарктической станции «Академик Вернадский». На рис. 7 приведена композиционная карта района, прилегающего к Антарктическому полуострову. При ее построении использованы три РЛ-изображения района, полученные с помощью РЛС БО КА «Січ-1» в период с июля (А) по октябрь (В) 1996 г. Контур береговой линии нанесен на карту сплошной черной линией. Белым кружком отмечено положение полярной станции «Академик Вернадский». На июльском РЛ-изображении (А) в зоне 61—62° южной широты и 54—55° западной долготы наблюдаются поверхностные проявления внутренних волн в атмосфере (в виде «корабельных» волн за островами). На октябрьском изображении (В) отчетливо заметна кромка льда (обозначена цифрой 1). Обращает на себя внимание ее изрезанность и наличие в массиве льда крупных каналов, имеющих ширину несколько километров и длину несколько десятков километров. Контроль реального положения кромки льда весьма важен, так как в районе нередки случаи, когда под действием сильных стоковых ветров, достигающих 30 м/с и более, кромка льда (битый лед, ледяная каша) может смещаться более чем на 100 км к северу от своего среднеклиматического положения, что представляет собой серьезную навигационную опасность.

Цифрой 2 на рис. 7 отмечены районы формирования молодого льда, имеющего более глад-



Рис. 1. Стационарная океанографическая платформа МГИ НАН Украины



Рис. 2. Самолет-лаборатория АКДЗ-30: *а* — внешний вид самолета-лаборатории, *б* — аэрофотоаппарат и ИК-сканер, *в* — рабочие места управления радиолокационной частью комплекса (слева ближе), оперативной бортовой интерпретации информации дистанционного зондирования (справа), *г* — прямо-передающий блок РЛС БО

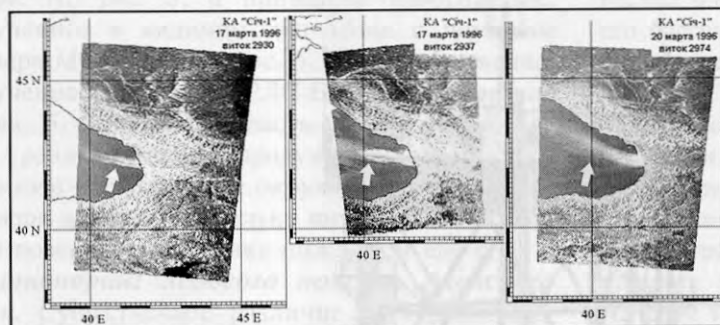


Рис. 3. Серия РЛ-снимков восточной части Черного моря, полученных с помощью РЛС БО КА «Січ-1» в марте 1996 г. Ветровая струя отмечена стрелкой

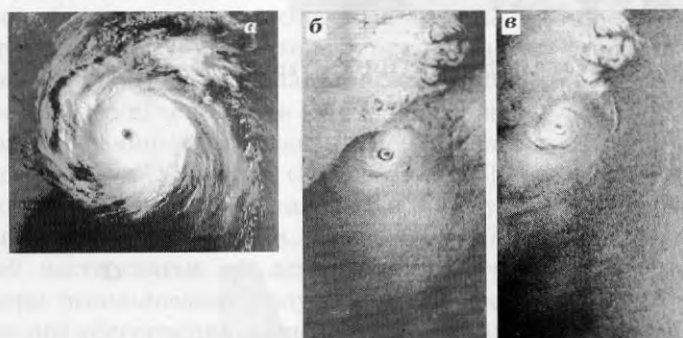


Рис. 4. Изображение урагана «Диана», полученное с помощью комплекса ДЗЗ КА «Космос-1500»: а — изображение урагана, полученное в видимом диапазоне с помощью сканера МСУ-М 11 сентября 1984 г.; б — РЛ-изображение области, охваченной ураганом, полученное 11 сентября 1984 г.; в — РЛ-изображение области, охваченной ураганом, полученное 12 сентября 1984 г.

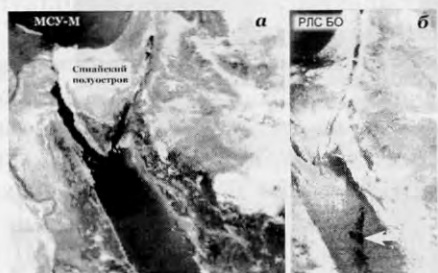


Рис. 5. Изображение Синайского полуострова и Красного моря, полученные с помощью комплекса ДЗЗ КА «Космос-1500»: а — оптическое изображение, полученное с помощью сканера МСУ-М; б — РЛ-изображение, полученное с помощью РЛС БО. Стрелкой в акватории Красного моря показана область сликов, образованных разливом нефтепродуктов

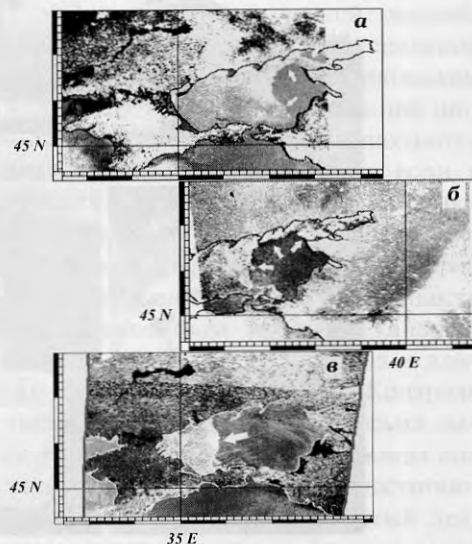


Рис. 6. Серия РЛ-изображений акватории Азовского моря, полученных с помощью РЛС БО КА «Січ-1» в весенний период 1996 г.: а — 24 февраля 1996 г., б — 6 марта 1996 г., в — 1 апреля 1996 г.

Рис. 7. Композиционная карта района, прилегающего к Антарктическому полуострову: А–В — РЛ-изображения района, полученные с помощью РЛС БО КА «Сич-1»; сплошная линия — контур береговой линии; белый кружок — положение полярной станции «Академик Вернадский»; 1 — кромка льда; 2 — районы формирования молодого льда; 3 — зона повышенной интенсивности волнения; 4 — области материкового льда

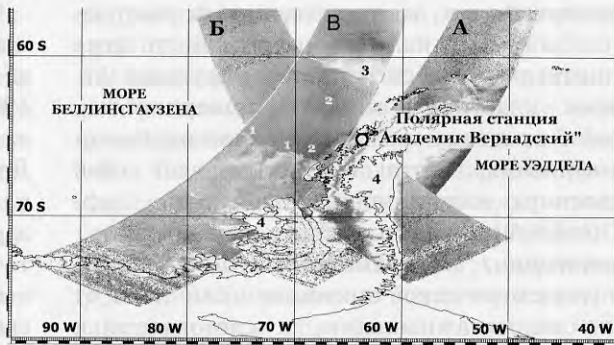


Рис. 8. Изображения юга Украины, полученные с помощью РЛС БО КА «Сич-1»: а — 21 июня 1996 г. при сухой погоде, б — 24 июня 1996 г. после прохождения атмосферного фронта (область выпавших осадков отмечена белой стрелкой), в — в 05 ч 50 мин 4 апреля 1996 г.; г — в 17 ч 36 мин. Сплошная белая линия — граница увлажненной и сухой почвы, соответствующая области таяния снега



Рис. 9. Обобщенная структура системы оперативного мониторинга Черного и Азовского морей с усвоением спутниковой информации

кую поверхность и, соответственно, формирующего слабый РЛ-сигнал (его интенсивность даже ниже интенсивности сигнала, формируемого открытыми участками морской поверхности). Цифрой 3 отмечена зона повышенной интенсивности волнения, что так же представляет собой определенную навигационную опасность. Цифрой 4 отмечены области материкового льда.

Мониторинг поверхности суши. Зависимость диэлектрической проницаемости почв от степени их увлажненности, и следовательно, зависимость от увлажненности удельной эффективной поверхности рассеяния почв, позволяет с помощью спутниковых РЛ-средств классифицировать их по этому параметру и определять, например, границы областей влажного снега и оценивать интенсивность снеготаяния, оконтуривать области выпавших осадков и т. д.

В период работы КА «Січ-1» ЦРЗЗ НАНУ-НКАУ совместно с подразделениями Гидрометеоцентра Украины отработывались методы регионального мониторинга зон свежевывавших осадков по данным спутниковых РЛ-наблюдений [3]. На рис. 8 в качестве иллюстрации использования возможностей РЛС БО КА «Січ-1» в этой области приведены РЛ-изображения юга Украины, полученные 21.06.96 г. при сухой погоде и 24.06.96 г. после прохождения атмосферного фронта, сопровождавшегося выпадением осадков — рис. 8, а и б соответственно. Область выпавших осадков отмечена на рис. 8, б стрелкой.

Данные, получаемые с помощью обзорных спутниковых РЛС БО, позволяют в весенний период года оценивать скорость снеготаяния на всей территории Украины и прогнозировать возможную интенсивность весеннего паводка. На рис. 8, в и г приведены РЛ-снимки юга Украины, полученные с помощью РЛС БО КА «Січ-1» 4 апреля 1996 г. в 05 ч. 50 мин. (в) и в 17 ч. 36 мин. (г). Граница увлажненной и сухой почвы, соответствующая области таяния снега, показана сплошной белой линией. Нетрудно видеть, что в течение дня граница области переувлажнения переместилась за счет высыхания почвы в направлении на север примерно на 60 км: от линии «Новая Каховка — Мелитополь» к линии «Энергодар — Запорожье». РЛ-контраст между сухой и увлажненной почвой в данном случае был более чем достаточен и составлял 6 дБ.

Одним из показательных примеров является использование РЛ-информации при контроле таяния снега на территории Украины весной 1988 г. В тот год обилие выпавшего снега создавало угрозу интенсивного весеннего паводка. Для сохранности гидротехнических сооружений на реках Украины в этих условиях предлагалось заранее спустить воду из водохранилищ. В восточных регионах Украины это решение было выполнено, а вот спуск водохранилищ Днепровского каскада (Киевского моря, в частности) мог привести к радиоактивному заражению всего бассейна Днепра вплоть до Черного моря. Организованный с помощью КА «Космос-1766» оперативный РЛ-мониторинг показал, что скорость таяния снегов значительно ниже прогнозируемой. Это позволило отказаться от сброса вод из водохранилищ Днепровского каскада. Полученный опыт мониторинга снеготаяния был использован в 1996, 1998 и 2000 гг.

СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА МОРСКИХ АКВАТОРИЙ С УСВОЕНИЕМ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

На современном этапе развития спутниковой океанологии МГИ НАН Украины интенсифицировал работы в направлении создания и реализации современной концепции спутникового мониторинга Черного и Азовского морей, морей восточного Средиземноморья и других районов Мирового океана [1, 11, 12—15]. Концепция основана на идее усвоения данных ДЗЗ в численных моделях циркуляции морей и океанов. Активное включение моделей в систему дистанционного мониторинга океана позволяет не только восполнить имеющиеся недостатки спутниковых измерений — спутниковые данные характеризуют в основном состояние поверхностного слоя моря, а получаемая при этом информация разнородна, разнесена во времени и имеет различное пространственное и временное разрешение, — но и дает возможность прогнозировать изменение состояния морской среды.

Одним из основополагающих моментов концепции является возможность использования данных ДЗЗ для задания граничных условий на поверхности моря, которые необходимы для численного интегрирования уравнений морской ди-

намики. В частности, по информации радиометров ИК-диапазона и СВЧ-скаттерометров формулируются граничные условия на поверхности моря при интегрировании уравнений баланса тепла и импульса. Сложнее складывается ситуация с заданием граничных условий при интегрировании уравнений баланса соли, поскольку пока еще нет возможности получения необходимой для этого спутниковой информации.

При интегрировании уравнений термогидродинамики океана спутниковые измерения позволяют задавать не только граничные, но и начальные условия. Наиболее эффективными с этой точки зрения являются современные альтиметры, позволяющие с высокой точностью контролировать изменения топографии морской поверхности, характеризующие собой изменчивость морских течений вплоть до синоптических масштабов.

К сожалению, на отечественных океанографических КА альтиметры до настоящего времени не устанавливаются. Поэтому приходится ориентироваться на использование альтиметрических данных, получаемых с помощью зарубежных КА (океанографических, природоресурсных, геодезических и т. д.).

Методики интерпретации спутниковой информации в настоящее время далеки от своего совершенства, поэтому важной частью работ по созданию системы мониторинга морских акваторий является проведение теоретических и экспериментальных работ, направленных как на уточнение физических механизмов и закономерностей формирования морской поверхностью информационного сигнала в используемых при ДЗЗ участках спектра электромагнитных волн — видимом, ИК- и СВЧ-, так и на сопоставление результатов спутниковых измерений и модельных расчетов с данными прямых измерений физических параметров морской среды, что в конечном итоге необходимо для оценки качества и точности работы всей системы спутникового мониторинга. С целью верификации методик определения параметров полей, характеризующих состояние морской среды, таких как поля температуры поверхности моря, цвета морской воды, шероховатости морской поверхности и степени ее загрязненности поверхностно-активными веществами, осуществляются контрольно-калибровочные работы с использованием ста-

онарной океанографической платформы института (п. Кацевели).

В последние годы в МГИ НАН Украины создана и развивается система мониторинга циркуляции Черного моря, действующая в режиме времени, близком к реальному. Система функционирует на основе усвоения данных альтиметров, установленных на КА TOPEX/POSEIDON и ERS, GFO, Jason, ENVISAT, скаттерометра QUICKSCAT, данных о поле температуры поверхности моря, получаемых с помощью сканера AVHRR КА NOAA, и информации о характеристиках верхнего слоя моря, получаемой с помощью дрейфующих буев. Система обеспечивает возможность диагноза и прогноза эволюции полей температуры поверхности моря, полей течений и профилей температуры и солёности в верхнем слое моря. Ее обобщенная структурная схема показана на рис. 9.

В 2005 г. работы в области развития современных методов и средств мониторинга морских акваторий отмечены Государственной премией Украины в области науки и техники. Детально с последними достижениями МГИ НАН Украины в области спутниковой океанологии и мониторинга морских акваторий можно ознакомиться, например, в работах [5, 10, 18, 19, 23, 24].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье кратко рассмотрены вопросы обеспечения достоверности информации, получаемой с помощью средств ДЗЗ океанографической космической наблюдательной системы «Океан» — «Січ», и приведены примеры практического использования спутниковой, в основном радиолокационной информации. Они показывают, что спектр природоресурсных, природоохранных и других задач, при решении которых возможно использование РЛ-информации, достаточно широк. При этом, разумеется, речь не идет о противопоставлении традиционных (контактных) и неконтактных (дистанционных) методов и способов получения информации. Речь идет об их разумном сочетании, когда один вид информации естественным образом уточняет и дополняет другой.

Безусловно, есть такие области, где методы и средства ДЗЗ имеют неоспоримые преимущества

перед традиционными. Но есть и области, где неоспоримо преимущество традиционных методов и средств получения информации. Однако их детальное сопоставление выходит за рамки статьи. За рамки статьи выходит и анализ современных достижений в области изучения особенностей структуры взволнованной морской поверхности и процессов генерации и диссипации высокочастотных поверхностных морских волн (ряби) в различных гидрометеорологических условиях, что важно с точки зрения адекватной интерпретации результатов РЛ-наблюдения морской поверхности.

Поскольку статья посвящена вопросам создания и эксплуатации оперативной океанографической космической наблюдательной системы «Океан» — «Січ», мы сознательно не рассматривали океанографические информационные возможности РЛ-систем бокового обзора с синтезированием апертуры приемной антенны, обеспечивающих достижение высокого и сверхвысокого пространственного разрешения, не рассматривали интерферометрические и альтиметрические РЛ-системы, с помощью которых также возможно получение весьма интересной и важной информации о Мировом океане.

1. Дымников В. П., Коротаев Г. К., Галин В. Я. Требования к составу и к точности спутниковой информации в исследованиях по программе «Разрезы» // Итоги науки и техники. Сер. Атмосфера, океан, космос — программа «Разрезы». — М.: Изд-во ВИНТИ, 1984.—34 с.
2. Еремеев В. Н., Мотыжев С. В. Дрифтерный мониторинг морей и океанов // Развитие морских наук технологий в Морском гидрофизическом институте за 75 лет / Под общ. ред. акад. НАН Украины В. Н. Еремеева. — Севастополь, НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2004.—С. 544—584.
3. Ефимов В. Б., Комяк В. А., Курекин А. С. и др. Применение радиолокации Земли из космоса в гидрометеорологии // Космічна наука і технологія.—2000.—6, № 5/6.—С. 16—28.
4. Исследование Земли из космоса. — М.: Наука, 1985.— № 3.—128 с.
5. Коротаев Г. К., Малиновский В. В., Мотыжев С. В. и др. Компоненты спутникового мониторинга Черного моря (вклад Украины в Black Sea GOOS). — Севастополь, 2001.—116 с.—(Препринт / НАН Украины; МГИ).
6. Коротаев Г. К., Пустовойтенко В. В., Радайкина Л. Н. и др. Дистанционное зондирование морей и океанов. Развитие работ в области спутниковой океанологии // Развитие морских наук технологий в Морском гидрофизическом институте за 75 лет / Под общ. ред. акад. НАН Украины В. Н. Еремеева. — Севастополь, НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2004.—С. 585—625.
7. Коротаев Г. К., Пустовойтенко В. В., Терехин Ю. В. и др. Тридцать лет отечественной спутниковой океанологии. 1. Космическая система «Океан»—«Січ» // Космічна наука і технологія.—2007.—13, № 5.—С. 28—43.
8. Космические аппараты «Океан-01» // Информ. бюл. пресс-центра космодрома «Плесецк».—1994.—№ 36.— 11 октября. <http://www.plesetzk.ru/index.php?p=inf036&d=doc/inf>
9. Кулешов С. В., Пуховой А. П. Развитие береговых вычислительных центров // Развитие морских наук технологий в Морском гидрофизическом институте за 75 лет / Под общ. ред. акад. НАН Украины В. Н. Еремеева. — Севастополь, НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2004.—С. 664.
10. Мотыжев С. В., Еремеев В. Н., Лунев Е. Г. и др. Особенности дрифтерного мониторинга Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.— 2004.—№ 11.—С. 122—131.
11. Нелепо Б. А. Спутниковый мониторинг климата океана // Метеорология и гидрология.—1984.—№ 8.—С. 34—41.
12. Нелепо Б. А., Коротаев Г. К. Спутниковый мониторинг климата океана // Комплексный глобальный мониторинг Мирового океана. — Л.: Гидрометеиздат, 1985.— С. 163—171.
13. Нелепо Б. А., Коротаев Г. К., Мановицкий В. Н. Создание системы диагноза и прогноза состояния океана как актуальная проблема автоматизации океанологических исследований // Морской гидрофиз. журн.— 1985.—№ 3.—С. 44—49.
14. Нелепо Б. А., Коротаев Г. К., Суетин В. С. и др. Исследование океана из космоса. — Киев: Наук. думка, 1985.—168 с.
15. Нелепо Б. А., Терехин Ю. В., Коснырев В. К. и др. Спутниковая гидрофизика. — М.: Наука, 1983.—253 с.
16. Призваны временем. — Днепропетровск: Арт-Пресс, 2004.—Т 2: Ракеты и космические аппараты КБ «Южное» / Под общ. ред. С. Н. Конохова.—232 с. <http://epizodsspace.testpilot.ru/bibl/kb-ujn/obl.html>
17. Радиолокация поверхности Земли из космоса (Исследование морской поверхности, ледяного и ледового покровов с помощью спутниковой радиолокационной станции бокового обзора) / Под ред. Л. М. Митника и С. В. Викторова. — Л.: Гидрометеиздат, 1990.—200 с.
18. Развитие морских наук и технологий в Морском гидрофизическом институте за 75 лет / Под общ. ред. В. Н. Еремеева. — Севастополь: МГИ НАН Украины, 2004.—704 с.
19. Суетин В. С., Королев С. Н., Суслин В. В. и др. Проявление особенностей оптических свойств атмосферного аэрозоля над Черным морем при интерпретации данных спутникового прибора SeaWiFS // Морской гидрофиз. журн.—2004.—№ 1.—С. 69—79.
20. Терехин Ю. В. Опыт анализа наблюдений на черноморском контрольно-калибровочном полигоне в связи с интерпретацией данных ИСЗ «Космос-1500» // Исслед. Земли из космоса.—1985.—№ 4.—С. 116—123.
21. Цимбал В. М., Лялько В. І., Курекин О. С. та ін.

- Авіаційний комплекс АКДЗ-30 дистанційного зондування природного середовища // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 2/3.—С. 36—40.
22. Уткин В. Ф., Шестопапов В. П., Калмыков А. И. и др. Возможности определения параметров тропических циклонов по радиолокационным изображениям из космоса // ДАН СССР.—1986.—№ 2.—С. 331—333.
23. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа: Сб. науч. тр. — Севастополь, 2004.—Вып. 11.—268 с.— (НАН Украины, МГИ, ИГН, ОФ ИнБИОМ; Редкол.: В. А. Иванов — гл. ред.).
24. Kudryavtsev V., Hauser D., Caudal G., et al. A semi-empirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface. 1. Background model // *J. Geophys. Res.*—2003.—108 C, N 3.—P. 8054.—(doi:10.1029/2001JC001003).
24. The Saffir-Simpson Hurricane Scale <http://www.nhc.noaa.gov/aboutsshs.shtml>

THIRTY YEARS OF DOMESTIC SPACE OCEANOLOGY. 2. PRACTICAL ASPECTS OF THE APPLICATION OF SATELLITE INFORMATION

*G. K. Korotayev, V. V. Pustovoytenko, Yu. V. Terekhin,
V. I. Dranovsky, S. S. Kavelin, Yu. D. Saltykov,
O. L. Yemelyanov, V. N. Tymbal, V. B. Yefimov,
A. S. Kurekin, V. A. Komyak, A. P. Pichugin*

Domestic satellite oceanology was developed about 30 years ago. In 1976—1977 the decisions on the creation of the experimental oceanographic spacecraft «Ocean-E» and the development of the state space system for researching the Earth environment «Resurs» and its subsystem «Ocean» were adopted. This paper considers some problems of space oceanographic system «Ocean—Sich» functioning and the main directions of practical application of the derived information in performing fundamental and applied tasks in the field of oceanology, ecology, hydro-meteorology, etc.