

В.Г.Бондур

(Центральный научно-исследовательский институт «Комета», Москва)

ПРОБЛЕМЫ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ОКЕАНА

Для эффективного использования аэрокосмических средств в интересах фундаментальной океанологии, исследования и национального использования природных ресурсов, мониторинга антропогенных воздействий на акватории морей и океанов и т.п. необходимо решение комплекса проблем, в том числе: выявление закономерностей и создание моделей взаимодействия глубинных гидрофизических полей и их изменений, обусловленных естественными и антропогенными процессами, с верхним слоем океана; разработка методов дистанционного зондирования, обработки, распознавания и интерпретации аэрокосмических данных для определения характеристик этих полей; разработка методов моделирования и моделей полей электромагнитного излучения, регистрируемого дистанционными средствами, а также баз данных о характеристиках различных явлений и процессов в приповерхностном слое; разработка принципов построения и создание аэрокосмических систем мониторинга океана и др.

При решении этих проблем, начиная с середины 70-х годов, проводились комплексы теоретических и экспериментальных (с борта аэрокосмических носителей, кораблей и гидрофизических платформ) исследований, позволивших выявить ряд не известных ранее эффектов, явлений и закономерностей. Впервые в областях проявления внутренних волн, полей течений, турбулентности, вихревых структур различного масштаба, волн Кельвина, а также пленок нефти, поверхностью-активных веществ и др., установлены эффекты: генерации локальных широкополосных (одномодовых – рис. 1а, б; и двухмодовых – рис. 1а, в), узкополосных (рис. 1г), а также линейных (рис. 1д, е) спектральных компонент для пространственных частот $\Delta\nu = 1,2 \cdot 10^{-2} \dots 10 \text{ м}^{-1}$ (обобщение на рис. 1ж); уменьшение интенсивности высокочастотных спектральных составляющих ($\Delta\nu = 8 \cdot 10^{-2} \dots 1 \text{ см}^{-1}$) (см. рис. 1з, и); изменение ориентации двумерных пространственных спектров (см. рис. 1з, к, л).

На основании обобщения данных, полученных при проведении более 1800 летно-морских экспериментов, проведена классификация форм двумерных спектров различных явлений на поверхности океана для $\Delta\nu = 2 \cdot 10^{-2} \dots 1,0 \text{ м}^{-1}$ и $\Delta\nu = 0,5 \cdot 10^{-2} \dots 10 \text{ м}^{-1}$ и выявлены информативные признаки спектров, характеризующие форму, ориента-

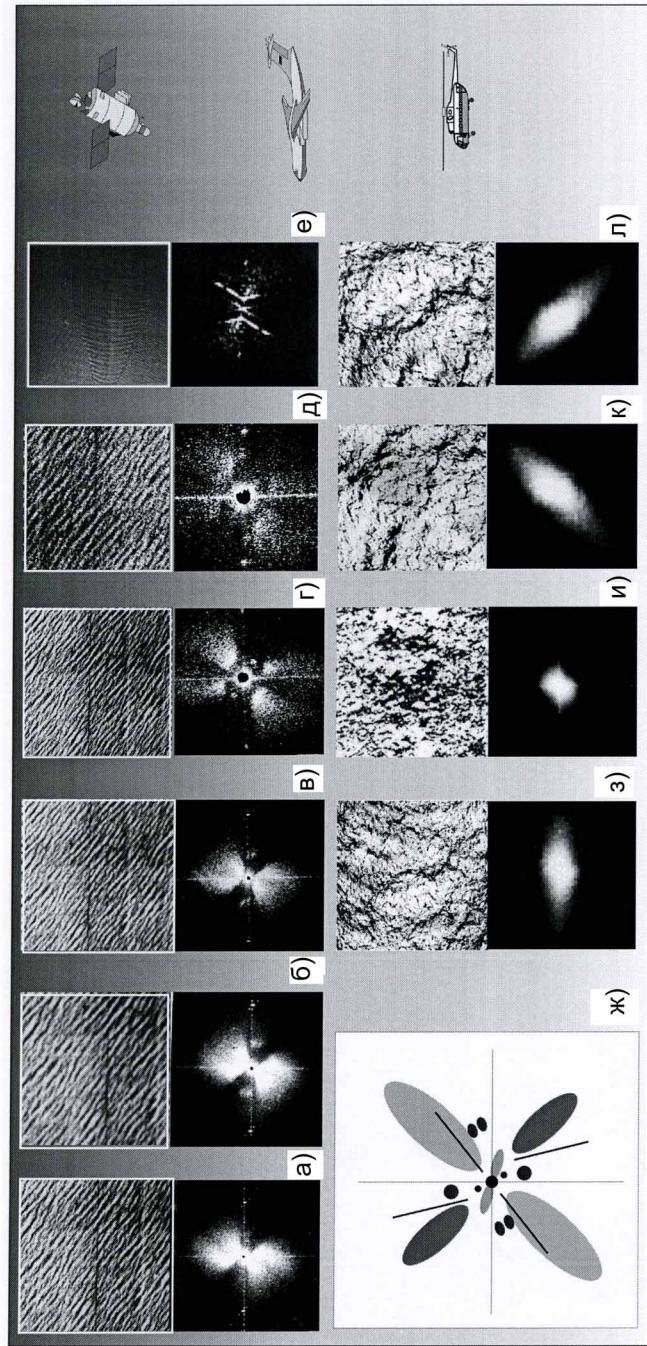


Рис. 1. Деформации спектров аэрокосмических изображений поверхности океана

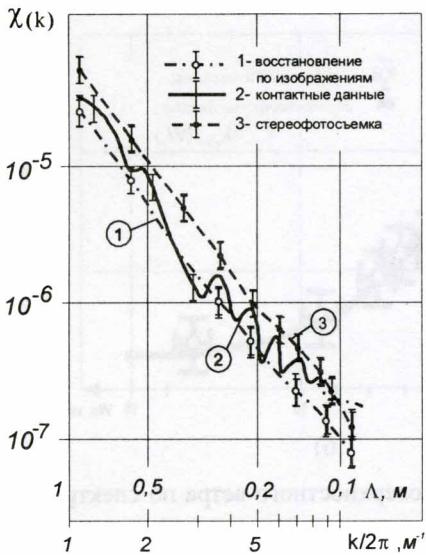


Рис. 2. Оценки спектров волнения различными методами

трансформацию спектров волнения, в зоне этих образований.

Развито новое научное направление – дистанционная пространственно-частотная спектрометрия, на основе которого разработаны новые методы и аппаратура дистанционного зондирования, методы, программные и технические средства обработки для выделения, классификации и определения характеристик различных процессов и явлений в океане по спектрам изображений, в том числе:

1. Линейные и нелинейные многопозиционные методы восстановления спектров волнения по аэрокосмическим изображениям, адекватность которых подтверждена путем сопоставления с данными контактных измерений и стереосъемки с морской платформы (рис. 2). Коэффициенты корреляции дисперсий и параметров наклонов спектров ($\chi(k) \sim k^p$), для различных методов составляют от 0,8 до 0,95. Полученные значения параметров наклонов $p = 2,63 \pm 0,09$ ($\lambda = 40\text{--}120$ см) и $p = 2,52 \pm 0,08$ ($\lambda = 4\text{--}60$ см) близки к имеющимся данным, например $p = 3$ – Филипс, Пирсон-Московитц; $p = 2,5$ – Тоба; $p = 2,6$ – Лейкин–Розенберг.

2. Метод определения скорости приповерхностного ветра по волновым числам максимумов пространственных спектров аэрокосми-

цию, топологические свойства, распределение энергии и др., которые отвечают условиям стабильности и эффективности для классификации и определения параметров этих явлений.

Обнаружены не известные ранее, выделяемые по информативным признакам спектров аэрокосмических изображений, поверхностные образования, имеющие сложную форму и устойчивые к изменению гидрометеорологических условий пространственно-геометрические характеристики, которые вызываются динамическими процессами в глубинных слоях океана. Установлены основные физические механизмы, обуславливающие в зоне этих образований.

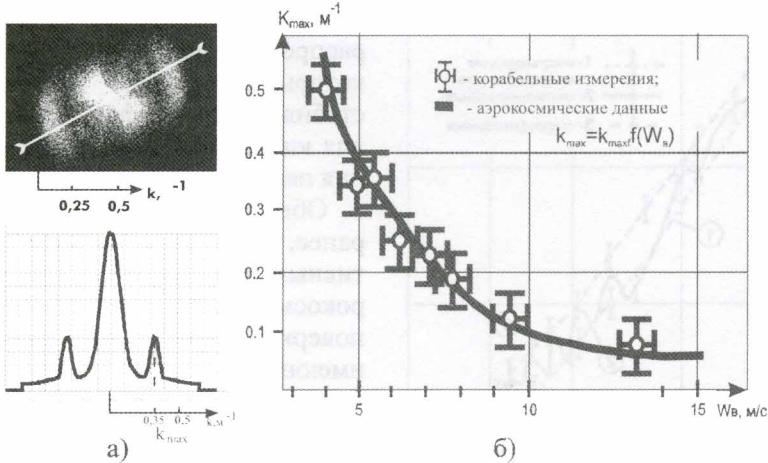
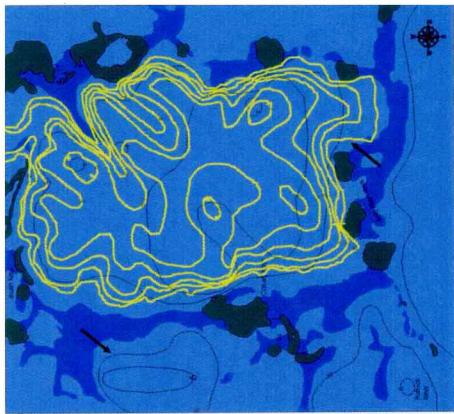


Рис. 3. Определение скорости приповерхностного ветра по спектрам аэрокосмических изображений

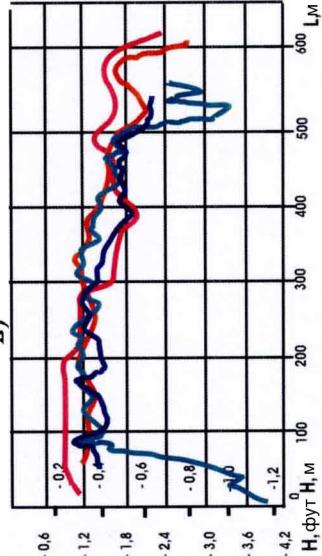
ческих изображений $W_b = (cg / k_{\max})^{1/2}$, где с – константа (рис. 3а). Адекватность метода подтверждена сопоставлением с данными корабельных измерений (см. рис. 3б).

3. Методы дистанционного определения рельефа дна, основанные на решении обратной задачи теории рефракции, оценках дисперсионного соотношения для волн на конечной глубине, трансформации волн на полях неоднородных течений, обтекающих неровности дна, а также на анализе плотности фототона. На рис. 4 приведены примеры уточнения рельефа дна во Флоридском заливе (по аэрокосмическим оптическим изображениям) и в районе пролива Карские ворота (по космическим радиолокационным изображениям). Результаты оценки рельефа дна, полученные по аэрокосмическим изображениям (Флоридский залив) хорошо совпадают с эхолотными и лидарными данными, а также данными, полученными с помощью рейки (рис. 4е).

Развит ряд методов и усовершенствована аэрокосмическая аппаратура для: выявления аномалий морской среды и определения спектров волнения по радиолокационным изображениям; выделения глубинных неоднородностей, вызванных естественными и антропогенными факторами, по градиентам обратного рассеяния лазерных сигналов; формирования спектров волнения и функций распределения элементов волн при некогерентной (когерентной) импульсной подсветке; определения температурных аномалий по ИК-изображениям и др.

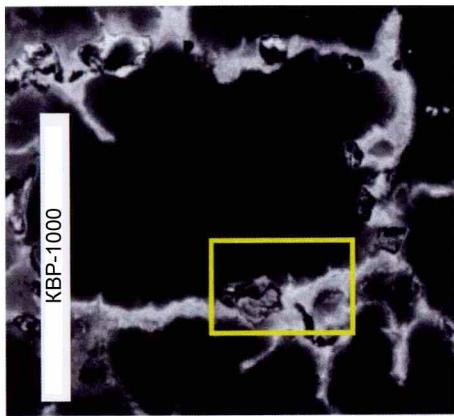


В)

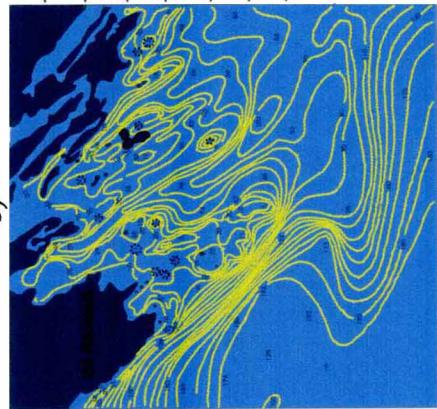


Измерения с помощью робота
Измерения, полученные с помощью лазера
Измерения, полученные с помощью экзогата
уточнены по снимкам

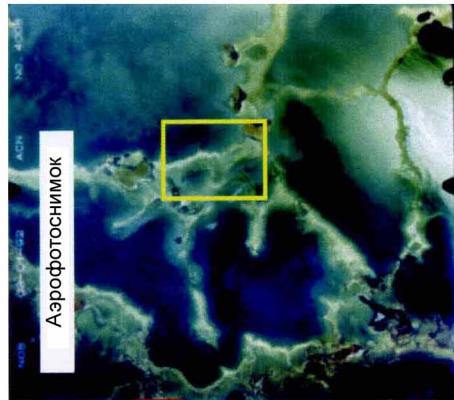
е)



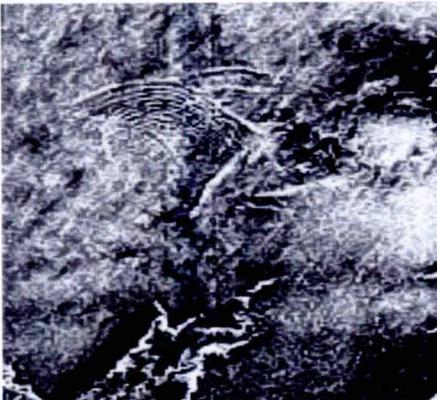
б)



д)



а)



ж)

Рис. 4. Определение рельефа дна по аэрокосмическим изображениям

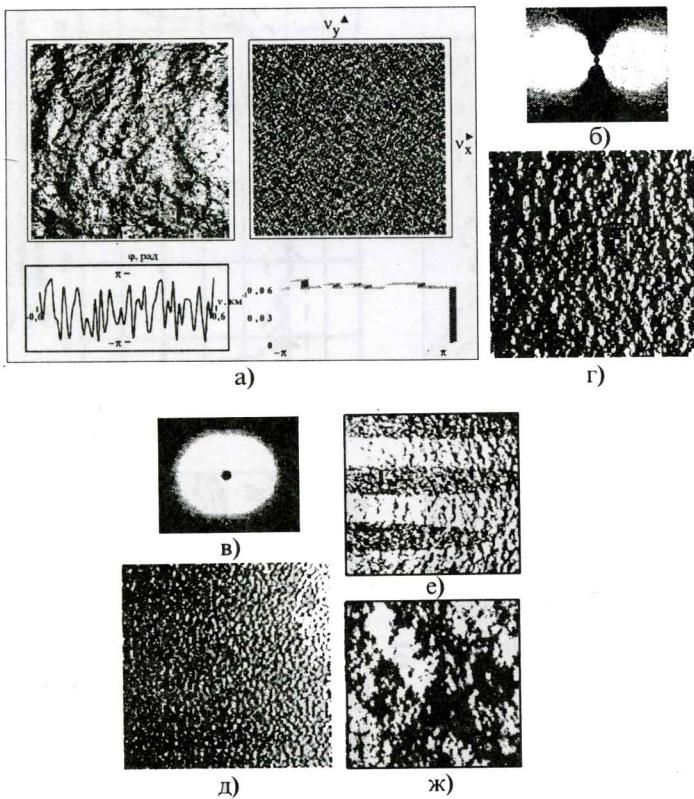


Рис. 5. Моделирование полей излучения на входе аэрокосмической аппаратуры

Развита теория формирования полей излучения на входе дистанционной аппаратуры, методы информационного моделирования (статистические, структурные и нечеткие), и созданы пространственные спектральные модели морского волнения и аномалий различного происхождения, модели объектов, фонов и фоново-целевых обстановок применительно к условиям наблюдения различными аэрокосмическими системами. Разработан метод фазового спектра для синтеза изображений поверхности океана, а также различных образований в атмосфере и на суше, основанный на использовании пространственных спектров (рис. 5б, г), модельных данных и экспериментально подтвержденной гипотезы о равномерном распределении фазы (рис. 5а). Примеры синтеза изображений приведены на рис. 5

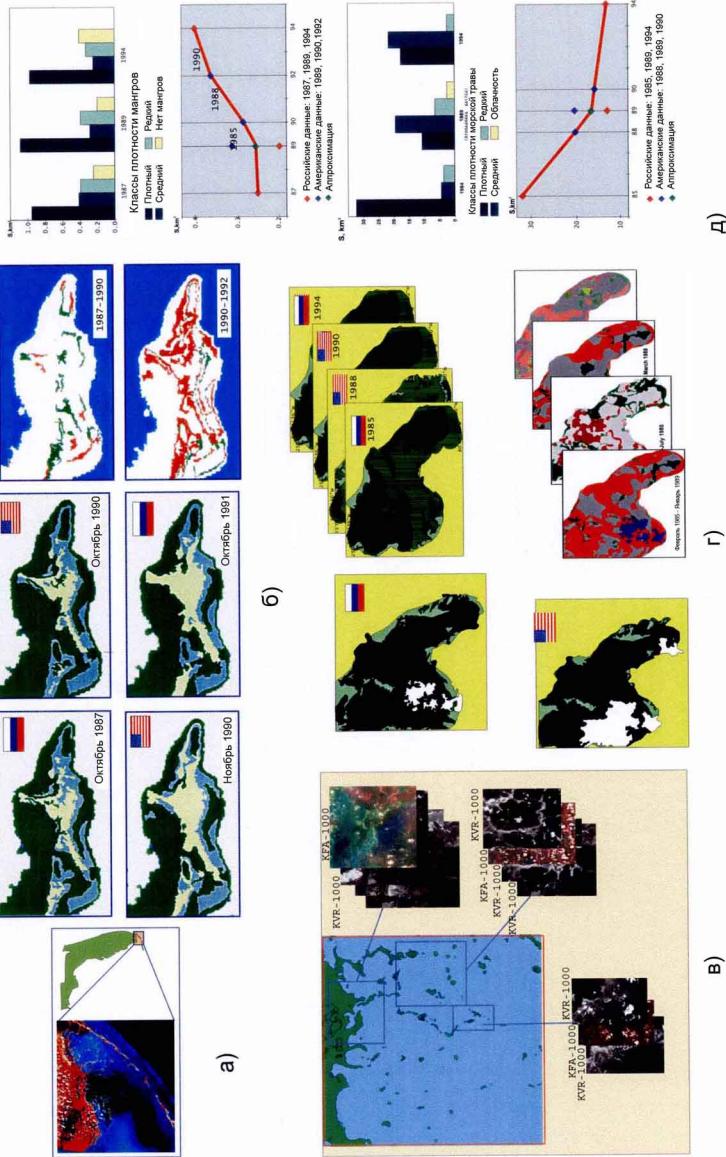


Рис.6 Мониторинг Флоридского залива

для пространственно-однородной (г, д) и неоднородной (е, ж) морской поверхности.

Выполнен ряд работ по мониторингу акваторий Черного, Баренцева, Балтийского, Охотского морей, озер-охладителей АЭС и др., подтвердивших эффективность дистанционных методов. На рис. 6 в качестве примера представлены результаты, полученные при мониторинге Флоридского залива (а) в рамках деятельности Российской-Американской комиссии по экономическому и технологическому сотрудничеству. Исходными данными являлись изображения с различных космических систем (в), данные, полученные на месте, а также существующие ГИС за период 1965–1997 гг. В результате анализа и сопоставления сформированных по космическим изображениям тематических слоев ГИС для плотности морской травы (г, д) и сомкнутости крон мангровых деревьев (б) оценивалось изменение состояния экосистемы залива за 20-летний период (б, д).

Полученные результаты и предложенные методы обеспечили возможность создания и развития существующих, разработки принципов построения перспективных аэрокосмических систем для освещения обстановки в океане, мониторинга акваторий в экологических и природно-ресурсных целях, контроля 200-мильной зоны и др.