

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ КАК СРЕДСТВО МОНИТОРИНГА МОРСКИХ АКВАТОРИЙ

“Пустовойтенко В.В., “Малиновский В.В.,
Кудрявцев В.Н.
“Морской гидрофизический институт
НАН Украины
335000 г. Севастополь. ул. Капитанская, 2
“ДВС – ЛТД
335000 г. Севастополь. ул. Капитанская, 4

В последние годы в области морских наук все больший вес приобретают методы и средства дистанционного зондирования (ДЗ). Применительно к мониторингу морских акваторий они позволяют не только «демпфировать» потери информации, обусловленные снижением в последние годы активности морских экспедиционных исследований, но и дают в руки океанолога информацию совершенно нового уровня — информацию об образах процессов, протекающих непосредственно на морской (океанской) поверхности, под поверхностью и в приводном слое атмосферы.

Цель настоящего сообщения — познакомить океанолога-гидрофизика с возможностями современных радиолокационных средств наблюдения морской поверхности. Ограниченный объем не позволяет привести в нем полную библиографию по рассматриваемому вопросу.

* * *

Физические основы «океанографического» использования радиолокационных (РЛ)-средств.

Результаты ранних работ в области морской радиолокации (например: [1,2]) показали, что морская поверхность является мощным источником помех, затрудняющих наблюдение кораблей. В дальнейшем, по мере изучения явления рассеяния радиоволн морской поверхностью пришло понимание того, что формируемый морской поверхностью РЛ-сигнал несет информации о ее состоянии.

К концу 60-х годов на стыке радиолокации и морских наук возникло направление, получившее название радиоокеанография [1]. Примерно в эти же годы был завершен цикл основополагающих экспериментальных и теоретических исследований закономерностей рассеяния радиоволн морской поверхностью и сформированы основы современной теории, описывающей это явление и объясняющей его основные закономерности [3, 4, 5].

Установлено, что в широкой области углов наблюдения поверхности, за исключением узкого конуса углов вблизи надира, и в широком частотном диапазоне рассеяние радиоволн взволнованной морской поверхностью имеет избирательный, резонансный характер. Радиоволны длиной λ рассеивают только те из по-

верхностных морских волн, длина волн Λ_0 определяется условием пространственного резонанса:

$$\Lambda_0 = \pi \lambda / 2 \cos \Psi, \quad (1)$$

где Ψ — угол скольжения, отсчитываемый от спокойной поверхности воды.

Фазовая скорость «резонансных» морских волн (1) определяет величину допплеровского смещения частоты рассеянного сигнала

$$\Delta f = \pm \sqrt{ng/\lambda \pi}, \quad (2)$$

а их высота (спектральная плотность k_0) определяет уровень формируемого морской поверхностью сигнала

$$P \sim S(k_0), \quad (3)$$

Несколько упрощая процесс формирования РЛ-сигнала, морскую поверхность, с «точки зрения РЛС» можно представить в виде своеобразной дифракционной решетки, образованной резонансными морскими волнами (1). Для РЛС, работающих в СВ- и КВ-диапазонах, эта «дифракционная решетка» образуется крупными, энергонесущими морскими волнами. Для РЛС, работающих в УКВ-диапазонах, она образуется мелкомасштабными составляющими спектра морских волн и находится в переменном поле уклонов и орбитальных скоростей крупных волн.

Процесс формирования морской поверхностью РЛ-сигнала применительно к УКВ-диапазону удовлетворительно описывается двухмаштабной моделью [3]. В ее рамках удельная эффективная поверхность рассеяния — «интегральная» радиолокационная характеристика морской поверхности — определяется соотношениями:

при вертикальной поляризации

$$\sigma_{\text{vv}}^0 = 16\pi k^4 \sin^4 \psi \cdot \epsilon \cdot \epsilon^* \cdot B(\epsilon, \psi) S(K_0); \quad (4.a)$$

при горизонтальной поляризации

$$\sigma_{\text{gg}}^0 = 16\pi k^4 \sin^4 \psi \cdot S(K_0) \quad (4.b)$$

В соотношениях (4a, 4b): $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число облучающей поверхности радиоволны, ϵ — комплексная диэлектрическая проницаемость морской воды, ϵ^* — комплексно-сопряженная с ней величина, $B(\epsilon, \psi)$ — угломестный множитель, $S(K_0)$ — пространственный спектр морского волнения в области резонансных волновых чисел ($K_0 = 2\pi/\Lambda_0$).

Входящий в (4a) множитель $B(\epsilon, \psi)$ определяется как:

$$B(\epsilon, \psi) = [(1 + \cos^2 \psi)^2] / [(1 + \eta_1 \sin \psi)^2 + (\eta_2 \sin \psi)^2]^2 \quad (5)$$

где $\eta_1 + i\eta_2 = \sqrt{\epsilon}$

Как следует из (1,4), крупные морские волны непосредственно в формировании РЛ-сигнала в УКВ-диапазоне не участвуют, но изменяют локальные условия наблюдения элементов морской поверхности (5), что, в конечном итоге, обуславливает амплитудную и фазовую модуляцию РЛ-сигнала. С возрастанием шероховатости поверхности уровень формируемого РЛ-сигнала, в этой области углов наблюдения, увеличивается.

В области углов наблюдения, близких к на-диру, РЛ-сигнал формируется за счет зеркального отражения радиоволн от поверхности. В этом случае увеличение шероховатости поверхности уменьшает уровень РЛ-сигнала.

При использовании РЛС средневолнового (СВ-) и коротковолнового (КВ-) диапазонов возможно наблюдение за участками поверхности, находящимися далеко за линией горизонта – на расстоянии до 60-100 км при использовании поверхностной волны и до нескольких тысяч километров при использовании пространственной (ионосферной) волны. При использовании РЛС, работающих в более высокочастотных диапазонах, возможно наблюдение участков морской поверхности, расположенных в их зоне прямой видимости.

Данные об РЛ-средствах, нашедших наибольшее широкое применение в практической радиоокеанографии, приведены в табл. 1. Кратко рассмотрим «океанографические» возможности этих РЛ-систем.

Загоризонтные РЛС.

Применяются для определения интенсивности волнения и скорости морских течений в верхнем слое, а также – параметров поля ветра в приводном слое атмосферы [6, 7]. Широко используются в США, Англии, Японии и других странах, имеющих непосредственный выход в океан и заинтересованных в возможно более раннем предупреждении об угрожающих их прибрежной зоне штормах, циклонах, тайфунах и т.д.

Отличительной чертой этих РЛС является наличие каналов когерентного приема РЛ-сигнала. «Океанографическими» информационными параметрами спектра допплеровских частот смещения являются:

• положение на оси частот пиков спектра, соответствующих рассеянию первого, второго и более высоких порядков;

• уровень пиков спектра.

Смещение пиков спектра относительно ожидаемого (2) положения характеризует радиальную составляющую скорости поверхностного течения. Уровень пиков характеризует интенсивность волнения (высоту морских волн).

Для РЛС СВ-диапазона «резонансные» компоненты морского волнения расположены вблизи максимума его энергетического спектра. Их энергия изменяется по мере эволюции спектра, что позволяет, в конечном итоге, оценивать скорость ветра. Для РЛС КВ-диапазона «резонансными» компонентами волнения являются морские волны, принадлежащие к равновесному интервалу спектра – их энергия практически не зависит от скорости ветра. По этой причине для определения параметров поля ветра используются более слабые пики спектра, соответствующие рассеянию более высоких порядков, а насыщенный пик рассеяния первого порядка используется для калибровки энергетического потенциала РЛС, что позволяет оперативно учитывать изменение условий прохождения радиоволн в земной атмосфере.

Методика «океанографического» использования этих РЛС хорошо отработана. Так уже в одной из первых радиоокеанографических работ [1], была показана возможность определения параметров морского волнения и ветра в проводной атмосфере. В США в 70-х годах в рамках программы «Sea Echo» создана радиоокеанографическая РЛС, размещенная на о. Сан-Клемента. В Англии несколько позже разработана океанографическая система OSCAR, состоящая из двух РЛС, располагающихся на морском побережье на расстоянии около 20 км друг от друга и управляемых общей ЭВМ. Она позволяет измерять вектор скорости поверхностного течения на расстоянии до 40 км от берега при разрешении по дальности 1.2 км и по азимуту 6°. Загоризонтные РЛС разных типов широко использовались в океанографических экспериментах JASIN, ARSLOE и др.

В последние годы широкую популярность приобрела радиоокеанографическая РЛС CODAR [9], ориентированная на измерение параметров поверхностных течений. Как и OSCAR, система CODAR состоит из двух РЛС и общей управляющей ЭВМ. Работая в частотном диапазоне 25-30 МГц система обеспечивает возможность картографирования в реальном времени (около 20 минут) течений на участках морской поверхности площадью около 2000 кв.км при пространственной разрешающей способности 3x3 км.

Станции системы CODAR компактны – размещаются в салоне микроавтобусов типа «РАФ», «УАЗ» и т.д., а также на борту судов небольшого тоннажа.

Система CODAR эффективно используется при мониторинге полей поверхностных течений и слежении за положением границ ледовых полей на Балтийском море, при изучении взаимодействия приливных волн, поверхностных течений и ветра у побережья Северной Каролины, для обеспечения безопасности эксплуатации месторождений нефти и газа у берегов Шотландии и т.д.

В табл. 2 приведены обобщенные оценки точности измерения «океанографических» параметров с помощью загоризонтных РЛС.

Таблица 2

№	Наименование параметра	Точность измерения
1.	Скорость течения, см/с	2–4
2.	Направление течения, градус	5–12
3.	Направление ветра, градус	5–12
4.	Направление распространения волн, градус	5–12
5.	Высота волн, %	10
6.	Период волн, с	0.6

Таблица 1

Тип радиолокационной системы	Длина волны, диапазон для Н радиоволн	Основное океанографическое применение
1. Загоризонтные РЛС, работающие ионосферным лучом	коротковолновый (HF) длины волн от 10 до 100 м	Определение интенсивности морского волнения, скорости течений в верхнем слое, скорости ветра в приводном слое атмосферы на расстояниях в несколько тысяч километров от места своего расположения
2. Загоризонтные РЛС, работающие поверхностным лучом	коротковолновый (HF) длины волн от 10 до 100 м	Определение интенсивности морского волнения, скорости течений в верхнем слое, скорости ветра в приводном слое атмосферы на расстояниях в несколько десятков (до 60-100) километров от места своего расположения
3. Авиационные КВ-диапазона	коротковолновый (HF) длины волн от 10 до 100 м	Определение высот волн 3%-обеспеченности
4. Авиационные панорамные УКВ-диапазона (кругового и бокового обзора).	сантиметровый (L,S,C,X) длины волн от 30 до 3 см	Получение плановых изображений подстилающей поверхности, определение параметров поля ветра и волнения, областей с повышенным содержанием поверхностно-активных веществ и т.д.
5. Морские (судовые) и береговые РЛС КВ- и УКВ - диапазона.	КВ (HF) и УКВ (L,S,C,X)	Определение параметров поля ветра и волнения, областей с повышенным содержанием поверхностно-активных веществ и т.д.
6. Спутниковые прецезионные альтиметры.	сантиметровый (K _u)	Определение уровенной поверхности и шероховатости морской поверхности (высоты морских волн).
7. Спутниковые скаттерометры.	сантиметровый (K _u)	Определение параметров поля ветра в приводной атмосфере в глобальных и региональных масштабах
8. Спутниковые РЛС бокового обзора с реальной апертурой приемной антенны (РЛС БО).	сантиметровый (X)	Получение плановых (панорамных) РЛ-изображений морской поверхности. Определение параметров поля ветра и волнения в глобальных и региональных масштабах, определение зон с повышенным содержанием на поверхности поверхностно-активных веществ и т.д.
9. Спутниковые РЛС бокового обзора с синтезированием апертуры приемной антенны	сантиметровый (L,S,C, X)	Получение плановых (панорамных) РЛ-изображений морской поверхности с высоким пространственным разрешением. Определение параметров поля ветра и волнения в региональных и локальных масштабах, определение зон с повышенным содержанием на поверхности поверхностно-активных веществ и т.д.

Авиационные океанографические РЛС.

Для определения параметров морской поверхности с борта самолетов и вертолетов используется широкая гамма РЛ-средств, работающих как вблизи надира, так и в области резонансного рассеяния: скаттерометры, измерители высоты морских волн, РЛС БО с синтезированием и без синтезирования апертуры приемной антенны, альтиметры и т.д.

Измеритель высоты волн 3% обеспеченности [10] определяет коэффициент вариации РЛ-сигнала при наблюдении морской поверхности в области углов, близких к надиру. Погрешность РЛ-измерений в интервале высот морских волн (20-200) см не превышает 15% (относительно данных стандартного волномера ГМ-16). Результаты измерений практически нечувствительны к скорости и направлению полета самолета.

Корреляционный измеритель высот волн [11] определяет коэффициент корреляции двух когерентных, но разнесенных по частоте, РЛ-сигналов. Когерентность зондирующих сигналов обеспечивается либо путем амплитудной модуляции несущей, либо путем генерации широко-полосных зондирующих сигналов [12].

Модуль «двухчастотной» функции корреляции $R(\Delta F)$ при наблюдении морской поверхности в области углов, близких к надиру, связан с шероховатостью подстилающей поверхности

$$R(\Delta F) = \exp\{-2\sigma^2 \Delta K^2 \cos^2 \theta\} D_m$$

где σ^2 – дисперсия распределения «блестящих точек»; $\Delta K=2\pi\Delta F/c$ – разность волновых чисел «блуждающих» поверхность радиоволн; θ – угол отклонения направления наблюдения от надира; D_m – «декоррелирующий» множитель, зависящий от величины разноса частот ΔF , высоты полета носителя Н и ширины диаграммы направленности антенны φ_e .

Авиационные РЛС бокового обзора (с реальной или синтезируемой диаграммой направленности приемной антенны) широко применяются при выполнении научных и прикладных работ исследовательскими центрами многих стран – США, Англии, Франции, Канады, России, Украины и т.д. РЛС БО позволяют получать панорамные изображения морской поверхности с высоким пространственным разрешением, приближающимся к разрешению оптических средств наблюдения. Накопленный в мировой практике опыт использования авиационных РЛС БО в интересах решения научных и прикладных «морских» задач (см. например [13-16]) показывает, что они являются достаточно удобным средством дистанционного зондирования, принципиально позволяющим выполнять РЛ-съемки морских акваторий практически независимо от состояния местных гидрометеорологических условий в различных районах Мирового океана. Практически же существуют ограничения на выбор этих районов, определяемые расположением аэропортов базирования и полетными данными авиационных средств.

Наряду с РЛС БО при проведении океано-

графических работ широко используются авиационные скаттерометры. С их помощью в натурных условиях уточняются зависимости РЛ-характеристик морской поверхности от гидрометеорологических и других условий. Возможность «абсолютных» измерений обеспечивается их натурной калибровкой. Специалисты Военно-морской исследовательской лаборатории США использовали для этого весьма оригинальную методику – сбрасывали с самолета металлические сферы различного диаметра (эффективная поверхность рассеяния таких отражателей рассчитывается довольно точно) [17].

Авиационные альтиметры позволяют измерять высоты морских волн по трассе полета самолета (вертолета) [18], но в практической океанографии они нашли ограниченное применение – эпизодически используются при проведении методических работ.

Морские (судовые) и береговые океанографические РЛС.

Морские и береговые океанографические комплексы УКВ-диапазона развивались как по пути создания специальных исследовательских РЛ-комплексов, так и по пути создания приставок к промышленным метеорологическим, морским навигационным и авиационным РЛС [13, 19, 20]. Наблюдают морскую поверхность преимущественно под малыми ($\Psi < 10^\circ$) углами скольжения.

Информационными параметрами РЛ-сигнала являются:

- для некогерентных РЛС – интенсивность (мощность) рассеянного сигнала;
- для когерентных РЛС – спектр доплеровских частот смещение (форма спектра, ширина, средняя частота и т.д.).

Результаты многочисленных работ показывают, что с помощью РЛС этой группы возможно определение в локальных масштабах основных океанографических параметров волнения:

- статистические характеристики периодов энергонесущих морских волн;
- статистические характеристики длин энергонесущих морских волн;
- статистические характеристики высот энергонесущих морских волн
- относительные энергетические спектры волнения и т.д.

Высокая чувствительность ряби к содержанию поверхности-активных веществ, к градиентам поверхностных течений позволяет наблюдать различные неоднородности морской поверхности, в том числе:

- пленки нефтепродуктов и других поверхности-активных веществ;
- поверхностные проявления внутренних волн;
- морские температурные фронты [21, 22] и т.д.

Отметим, что после появления спутниковых океанографических РЛ-средств интерес к этой группе приборов в значительной мере ослаб. Вместе с тем, оснащение судов волнозимери-

тельными приставками позволило бы привести измерения параметров волнения, выполняемые на неспециализированных судах, к единой инструментальной базе и исключить субъективный фактор из сообщаемой ими информации о волнении.

Спутниковые радиоокеанографические системы и комплексы.

С появлением спутниковых средств наблюдения морские науки получили в свое распоряжение инструмент, адекватный, по своим возможностям, масштабам изучаемых и контролируемых процессов. Действительно, спутниковые средства дают возможность «космотреть» практически весь Мировой океан в течение суток. Исследователь-оceanолог, при этом, получает информацию об образах динамических процессов, протекающих на поверхности океана и в толще его вод. Радиолокационные же средства и методы позволяют получать информацию независимо от времени суток, года и местных гидрометеорологических условий.

Первые наблюдения морской поверхности из космоса проведены с борта орбитальной космической станции SKYLAB [23] в 1973 году. Работы носили методический характер и подтвердили представления о физике формирования РЛ-сигнала морской поверхностью. На регулярной основе спутниковые РЛ-средства используются для получения океанографической информации с 1978 г. – после запуска КА SEASAT. Использование космической РЛ-информации для мониторинга Океана предусматривается в космических программах США, Канады, Франции, России, Украины и других стран.

Альтиметры (высотомеры) измеряют высоту полета КА относительно поверхности Земли (океана) и используются для решения разнообразных задач геодезии, геофизики и океанографии. Первые космические альтиметрические измерения были выполнены с борта ОКС SKYLAB [23], в последующем альтиметры неоднократно использовались на КА типа SEASAT, GEOS, ERS, GEOSAT, TOPEX/POSEIDON и т.д..

В приложении к океанографии позволяют определять уровенную поверхность, высоту волн и скорость ветра над морской поверхностью. При реализации комплекса мер, обеспечивающих точное определение положения КА в геоцентрической системе координат, погрешность измерения положения уровенной поверхности по трассе КА может быть доведена до нескольких сантиметров. Это позволяет отслеживать динамику изменения уровня поверхности океана.

При использовании альтиметров высота морских волн оценивается по степени «затяжки» переднего фронта отраженного поверхностью зондирующего сигнала. В реальных условиях высоты морских волн определяются с погрешностью не более 10% в интервале высот волн до

5 м и $\pm 5\%$ при больших высотах. Погрешность определения скорости ветра по альтиметрическим данным составляет около 2 м/с.

Скаттерометры представляют собой РЛ-системы, ориентированные на определение параметров поля ветра в приводной атмосфере. «Осматривают» взволнованную поверхность в двух полосах, расположенных по обе стороны от трассы КА, с помощью многолучевой (4-х в скаттерометре SASS ИСЗ SEASAT [24] или 6-ти в скаттерометрах ИСЗ NROSS [25], ERS и JERS) антенной системы, что позволяет устранить неоднозначность в определении направления ветра. Методика использования получаемых данных предполагает расчет величины σ^0 (4a,б) в каждой из разрешаемых на поверхности ячеек (протяженность ячейки 40-50 км) и использование экспериментальных и модельных зависимостей σ^0 (W) для последующего определения направления и скорости ветра. Погрешности измерения параметров поля ветра не превышают ± 2 м/с для скорости и $\pm 20^\circ$ для направления ветра.

Радиолокационные станции бокового обзора позволяют получать панорамные изображения подстилающей поверхности с разной степенью детализации (в зависимости от величины пространственного разрешения). Требуемая пространственная разрешающая способность обеспечивается либо путем создания «протяженных» антенн – РЛС БО с реальной апертурой приемной антенны, либо путем синтезирования диаграммы направленности приемной антенны.

Обобщенные данные об используемых в практической океанографии РЛС БО приведены в табл. 3.

Таблица 3

ИСЗ	Апертура приемной антенны	Ширина полосы обзора, км	Разрешение, м
SEASAT	синтезир.	100	25
SHUTTLE			
SIR-A	синтезир.	100	25
SIR-B		50	35
SIR-C		40-90	10
ERS-1,-2	синтезир.	80	30
RADARSAT	синтезир.	500 100 45	100 30 10
Космос, Океан	реальная	450	~ 800
Космос, Алмаз	синтезир.	30	30
Сич-1	реальная	450	~ 800
SPOT (проект)	синтезир.	200 30	40 3.5

РЛС БО с синтезированием апертуры приемной антенны обладают высоким пространственным разрешением, близким к разрешению оптических средств наблюдения, и позволяют получать детальные изображения тех или иных морских акваторий и участков суши. В океанографии используются с 1978 г. (ИСЗ SEASAT). Несмотря на небольшой срок работы ИСЗ (три месяца), с помощью РСА выполнена съемка ~ 126 млн. км² земной поверхности, причем интерес к полученной информации не утрачен до сих пор. В отечественной практике РСА эпизодически используются с 1987 г. (ИСЗ «Космос-1870»).

В последние годы в мировой практике прослеживается тенденция создания многофункциональных многочастотных комплексов РСА, обеспечивающих возможность получения, наряду с РЛ-снимками высокого разрешения, и обзорных снимков с пониженным разрешением в пространстве.

Так, РСА канадского ИСЗ RADARSAT [26] в режиме съемки «Волна» имеет пространственное разрешение ~ 10 м, что позволяет наблюдать на локальном уровне структуру течений, пути распространения поверхностно-активных веществ (ПАВ), изучать особенности пространственного спектра волнения и т.д. В режиме «Ветер» РСА имеет пространственное разрешение ~ 100 м и полосу обзора ~ 500 км.

РЛС БО с реальной апертурой приемной антенны применяются в океанографической практике с 1983 г. (ИСЗ «Космос-1500») [27]. Параметры РЛС БО (длина волны, поляризация, углы наблюдения и т.д.) выбраны исходя из получения максимальной ширины полосы обзора и обеспеченности достоверными методиками интерпретации полученной информации [28, 29]. Использование для передачи РЛ-снимков одного из радиоканалов, применявшихся для передачи информации с метеорологических ИСЗ «NOAA» и «Метеор» обеспечивает возможность прямого доступа к РЛ-информации возможно большему числу потребителей.

РЛС БО хорошо зарекомендовала себя как средство наблюдения морских акваторий [29] и использовалась на многих ИСЗ серии «Космос» и «Океан». В 1995 аналогичная РЛС БО была установлена на борту КА «Сич-1». Некоторые аспекты использования ее информации для наблюдения Азовского и Черного морей рассмотрены нами в [30].

Заключение

Таким образом, с помощью радиолокационных средств наблюдения возможно определение широкого спектра параметров морской поверхности и ветра в приводной атмосфере.

В отличие от наблюдательных систем оптического и инфракрасного диапазонов, РЛ-системы позволяют получать информацию независимо от условий освещенности и местных гидрометеорологических условий.

Существующий арсенал РЛ-средств и методов позволяет создать многоуровневую (спутник-самолет-корабль) оперативную систему наблюдения морских акваторий в локальных (включая и прибрежную зону), региональных и глобальных масштабах. При этом использование РЛ-средств различных классов позволяет дополнить, уточнить и детализировать стандартную гидрометеорологическую информацию, особенно в части данных о реальном состоянии морских акваторий.

Наземный сегмент такой системы наблюдения Черного и Азовского морей может быть построен на основе нескольких стационарных за-горизонтных РЛС КВ-диапазона, расположенных в ключевых точках бассейна, и нескольких взаимодействующих с ними подвижных РЛС (аналогичных РЛС CODAR). Подвижные РЛС позволяют оперативно изменять конфигурацию наблюдательной системы в зависимости от приоритетности решаемых задач.

Космический сегмент системы, обеспечивающий получение разнoplановой информации, может быть построен на основе радиолокационных КА типа «Космос», «Океан», «Сич» с привлечением, в рамках международного сотрудничества с космическими организациями других стран (NASA, NOAA, ESA и др.), РЛ-информации, получаемой радиолокационными КА типа ERS, TOPEX/POSEIDON, RADARSAT и т.д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Радиоокеанографические исследования морского волнения. - Киев: АН УССР, 1962. - 116 с.
2. Kerr D.E. Распространение ультракоротких волн (пер. с англ. под ред. Б.А. Шиллерова). - М.: Сов. радио. - 1954. - 710 с.
3. Bass F.G., Fuks I.M., Kalmykov A.I. and all. Very height frequency radiowave scattering by a disturbed sea surface. IEEE Trans. Antennas and Prop. - 1968. vol. 16. № 5. - p. 554-568.
4. Barrick D.T. Theory of HF and VHF propagation across the round sea. Radio Scie. - 1971. vol. 6, № 5. - p. 527-533.
5. Wright J.W. A new model for sea clutter. IEEE Trans. Antennas and Prop., - 1968. vol. 16, № 2. - p. 217-223.
6. Barrick D.E., Headrick J.M., Bogle R.N., Crombie D.D. Sea backscatter at HF: Interpretation and utilization of the echo. - Proc. IEEE. -1974. vol. 62, № - p. 673-680.
7. Ahearn J.L., Carley S.R., Headrick J.M., Trizna D.B. Test of Remote Skywave measurement of Oceanic surface conditions. - Proc. IEEE. - 1974. vol. 62, № - p. 681-678.

8. Ohno Y. Высокочастотный океанский радиолокатор. 6. Наблюдение течений на южном побережье Окинавы с помощью высокочастотного океанского локатора. - Цусин сого кенкодзе кихо = Rev. Radio. Res. Lab. - 1991. - vol. 37., № 3. - p. 393-403.
9. Barrick D.E., Lipa B.J., Crismann R.D. Mapping surface current with CODAR. - Sea Technol. - 1985. vol. 26, №10. - p. 43-46,48.
10. Гарнакерьян А.А., Афанасьев К.Л. и др. Измерение параметров волнения радиотехническим методом с летательного аппарата. - Метеорология и гидрология. - 1973, № 12. - с.37-42.
11. Weismann D.E. Two-frequency radar interferometry applied to the measurement of ocean wave height. - IEEE Trans. Antennas and Prop. - 1973. vol.21, № 5. - p. 649-656.
12. Башаринов А.Е., Калинкевич А.А. Особенности радиолокационного определения высот морских волн при многочастотном зондировании. В кн.: Неконтактные методы определения океанографических параметров. - М.: Гидрометеоиздат. - 1977. - с. 21-23.
13. Загородников А.А. Радиолокационная съемка морского волнения с летательных аппаратов. - Л.: Гидрометеоиздат. - 1978. - 240 с.
14. Глушков В.М., Комаров В.В., Старостин В.А. и др. Применение радиолокационной съемки при геолого-географических исследованиях. - Л.: Недра. - 1981. - 238 с.
15. Дистанционное зондирование в метеорологии, океанографии и гидрологии. Пер. с англ. под ред. А.Крэйнелла. - М.: Мир. - 1984. - 535 с.
16. Калмыков А.И., Цымбал В.Н. и др. Многоцелевой радиолокационный самолетный комплекс исследования Земли. Препринт № 21. - Харьков. ИРЭ АН УССР. - 1990 . - 34 с.
17. Гинард Н., Дейли Дж. Экспериментальные исследования модели радиолокационных отражений от морской поверхности. - ТИИЭР. - 1970. - т.58, № 4. - с. 31-39.
18. Неделяев А.М., Прахов В.П. К вопросу об определении статистических характеристик морского волнения радиолокационным методом. - Труды МЭИ. - 1975, вып.261. - с. 30-35.
19. Калмыков А.И., Пустовойтенко В.В. Радиолокационный измеритель пространственно-временных характеристик морского волнения. В кн.: Неконтактные методы определения океанографических параметров. - М.: Гидрометеоиздат. - 1986. - с. 48-52.
20. Лейкин И.А., Островский И.Е., Розенберг А.Д. Определение параметров морского волнения по частотным характеристикам рассеянного морем радиосигнала. Препринт № 60. - Харьков. ИРЭ АН УССР. - 1976. - 28 с.
21. Кудрявцев В.Н. Упрощенная модель трансформации атмосферного погранслоя над температурным фронтом моря.- Морской гидрофизический журнал.- 1995, №2.- с.24-51.
22. Кудрявцев В.Н. Физическая модель спектра коротких ветровых волн. - Морской гидрофизический журнал.- 1996, №2. - с.3-14.
23. Макгуген Дж.Т., Миллер Д.С., Браун Г.С., Нейн Д.С. Исследования поверхности Земли с помощью радиовысотомера S-193. - ТИИЭР. 1974, т.62, № 6. - с. 171-184.
24. Grantham W.L., Bracalente T.M. et all. The Seasat-A satellite scatterometr. - IEEE J. Ocean. Eng. - 1977. vol. OE-2. - p. 200-205.
25. Li F., Winn C., Long D. et all. NROSS-scatterometr - an instrument for global oceanic wind observation. - Proc. Soc. Photo-Opt. Instr. Eng. - 1984., №481. - p. 193-198.
26. RADARSAT: Canada's microwave satellite. - Int. J. Remote Sens. - 1990. - vol. 11, № 3. - p. 527-530.
27. Калмыков А.И., Ефимов В.Б., Курекин А.С. и др. Радиолокационная система ИСЗ «Космос-1500». - Исследование Земли из космоса. - 1984, № 5. - с. 84-93.
28. Цымбал В.Н., Калмыков А.И., Пустовойтенко В.В. и др. Информационные возможности радиолокационной системы бокового обзора ИСЗ «Космос-1500». - Исследование Земли из космоса. - 1985, № 3. - с. 84-92.
29. Радиолокация поверхности Земли из космоса. - Л.: Гидрометеоиздат. - 1990. - 200 с.
30. Малиновский В.В., Пустовойтенко В.В., Кудрявцев В.Н. Использование информации РЛС БО ИСЗ «Січ-1» для наблюдения Черного и Азовского морей. (в наст. сборнике).