

- диагностики. — Киев: Наук. думка, 1990.—136 с.
14. Gitelson A. A., Merzlyak M. N. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer Platanoides* L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation // J. Plant Physiol.—1994.—143.—P. 286—292.
 15. Merzlyak M. N., Gitelson A. A., Chircunova O. B., Rakitin V. Yu. Non-destructive optical detection of leaf senescence and fruit ripening // Physiol. Plant.—199.—106.—P. 136—141.235
 16. Penuelas J., Baret F., Filella I. Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll {a }ratio from leaf spectral reflection // Photosynthetica.—1995.—31.—P. 221—230.
 17. Carter G. A., Cibula W. G., Miller R. L. Narrow-band reflectance imagery compared with thermal imagery for early detection of plant stress // J. Plant Physiol.—1996.—148.—P. 515—520.
 18. Carter G. A. Reflectance wavebands and indices for remote estimation of photosynthesis and stomatal conductance in pine canopies // Remote Sens. Environ.—1998.—63.—P. 61—72.
 19. Qi J., Huete A. R., Modified soil adjusted vegetation index (MSAVI) // Remote Sens. Environ.—1994.—48.—P. 119—126.
 20. Чимитдоржиев Т. Н., Ефременко В. В. Об использовании различных индексов вегетации в дистанционном зондировании экосистем // Исслед. Земли из космоса.—1998.—№ 3.—С. 49—56.
 21. Huete A. R., Liu H. Q. An error and sensitivity analysis of the atmospheric and soil correcting variant of the NDVI for the MODIS-EOS // IEEE Trans. Geosci. Remote. Sens.—1995.—32, N 4.—P. 897—905.
 22. Horler D. N. H., Dockray M., Barber J. The red edge of plant leaf reflection // Int. J. Remote Sens.—1983.—4, N 2.—P. 273—288.
 23. Ferns D. C., Zara S. J., Barber J. Application of high resolution spectroradiometry to vegetation // Photogram. Eng. And Remote Sens.—1984.—50, N 12.—P. 1725—1739.
 24. Boochs F., Kupfer G., Dockter K., Кьхбауш W. Shape of the red edge as vitality indicator for plants // Int. J. Remote Sens.—1990.—10.—P. 1741—1753.
 25. Buschmann C., Rinderle U., Lichtenthaler H. K. Detection of stress in coniferous forest trees with the VIRAF Spectrometer // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.—1991.—29, N 1.—P. 96—100.
 26. Vogelmann J. E., Rock B. N., Moss D. M. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves // Int. J. Remote Sens.—1993.—14, N 8.—P. 1563—1575.
 27. Шадчина Т. М. Наукові основи дистанційного моніторингу стану посівів зернових. — Київ, Український фітосоціологічний центр, 2001.—219 с.
 28. Кочубей С. М. Сравнение информативных возможностей многозональной съемки и спектроскопии высокой разрешающей способности при дистанционном зондировании растительного покрова // Космічна наука і технологія.—1999.—5, № 2/3.—С. 41—48.

Вирішення тематичних задач радіофізичними методами

Результаты мониторинга морской многочастотного неоднородностей поверхности радиолокационного волнения

М. В. Белоброва¹, А. Г. Боев², В. К. Иванов¹, И. А. Калмыков³,
А. Я. Матвеев³, В. Б. Разказовский³, В. Н. Цымбал³

¹Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков

²Радиоастрономический институт НАН Украины, Харьков

³Центр радиофизического зондирования Земли им. А. И. Калмыкова НАН и НКА Украины, Харьков

Дистанционные исследования неоднородностей морской поверхности решают задачи оперативного контроля экологии окружающей среды (обнаружение загрязнений на морской поверхности поверхностно-активными веществами), важны для обеспечения безопасности судоходства в акваториях мощных течений и в зонах проявления внутренних волн, необходимы для коррекции прогнозов погоды для близлежащих к течениям прибрежных районов и др. Для решения таких многопараметрических

задач все чаще используются многочастотные радиолокационные методы, как наиболее информативные и наименее подверженные влиянию погодных условий и условий освещенности. В данной работе исследования неоднородностей морской поверхности были выполнены с помощью комплекса МАРС [5], в состав которого входят два радиолокатора бокового обзора ($\lambda_1 \approx 0.8$ см, $\lambda_2 \approx 3$ см) с реальной апертурой РБО и два радиолокатора с синтезированной апертурой РСА ($\lambda_3 \approx 23$ см, $\lambda_4 \approx 180$ см).

Все радиолокаторы комплекса имеют примерно одинаковое пространственное разрешение 20...50 м, одинаковые средние излучаемые мощности 10...12 Вт, совмещенные полосы обзора шириной 30...50 км и обработку принятой информации в реальном времени.

ИССЛЕДОВАНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ, ВЫЗВАННЫХ РАЗЛИВОМ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Важными для понимания процессов гашения поверхностных волн пленками поверхностно-активных веществ были результаты многочастотного зондирования 14.08.90 участка Черноморского побережья Крымского полуострова (вблизи г. Орджоникидзе). На рис. 1 приведены синхронные изображения, полученные в сантиметровом (слева) и дециметровом (справа) диапазонах длин радиоволн. Состояние морской поверхности в момент измерений контролировалось по данным ближайших к месту наблюдений метеостанций. Скорость приводного ветра составляла 3—5 м/с, что совпадает с оценками скорости ветра по величине удельной эффективной поверхности рассеяния σ° в сантиметровом диапазоне длин радиоволн ($\sigma_{\text{моря}}^\circ \approx -26$ дБ при $\Theta = 65^\circ$). В отличие от обычно наблюдаемых проявлений разливов поверхностно-активных веществ одновременно в изображениях сантиметрового и дециметрового диапазонов длин радиоволн, в данном эксперименте только в дециметровом изображении с высоким радиолокационным контрастом $D_{\text{max}} \approx \approx 19$ дБ видна струя вытекающей с берега в море жидкости. Одним из возможных объяснений такого эффекта является влияние толщины пленки поверхностно-активного вещества ПАВ, активно гасящей более короткие поверхностные волны. В работе [4] отмечалось, что это возможно, если толщина пленки h становится сравнимой с глубиной затухания вязкой волны δ в пленке:

$$\delta \approx \sqrt{2\nu_1/\omega},$$

где ν_1 — коэффициент кинематической вязкости, ω — частота поверхностной волны. Оценки показывают, что при $h/\delta \geq 0.1$ пленка будет оказывать все возрастающее влияние на радиолокационный контраст более коротких длин волн. При этом с уменьшением длины поверхностной волны в пленке растет величина слоя δ , препятствующего передаче колебаний морской поверхности пленке. Это, в свою очередь, уменьшает реакцию пленки на колебания поверхности и снижает контраст между чистой и загрязненной поверхностью. Для нефтяной пленки толщиной $h = 0.03$ мм характерные значения $\nu_1 \approx 0.08...0.3$ см²/с [3]. При этом

для угла наблюдения $\Theta = 60^\circ$ на длинах радиоволн $\lambda_1 = 3$ см и $\lambda_2 = 23$ см отношение $(h/\delta)_1 = 0.11...0.21$ и $(h/\delta)_2 = 0.06...0.1$ соответственно. Из приведенных оценок можно сделать вывод, что наблюдаемые в эксперименте различия в радиолокационных контрастах изображений сантиметрового и дециметрового диапазонов длин радиоволн могут быть достигнуты только при больших значениях h/δ , т. е. при большой толщине пленки, появляющейся, например, на начальной стадии растекания нефти (или нефтепродуктов) по морской поверхности. Кроме того, на поверхности толстой пленки под действием ветрового возмущения могут возникать собственные колебания, что также способствует уменьшению контраста между чистой и загрязненной поверхностями. Поэтому в подобных случаях мониторинг в наиболее чувствительном к морскому волнению сантиметровом диапазоне может быть малоэффективным и только многочастотное зондирование позволяет устранить этот недостаток.

ИССЛЕДОВАНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В МОРСКИХ ТЕЧЕНИЯХ

При мониторинге акватории Баренцева и Карского морей течение Гольфстрим часто регистрировалось с более высоким положительным контрастом радиолокаторами дециметрового и метрового диапазонов длин волн. Отсутствие соответствующего контраста в наиболее чувствительном к состоянию морской поверхности сантиметровом диапазоне указывает на существование в акватории течения других (кроме ветровых) мощных механизмов генерации колебаний морской поверхности. Для анализа на рис. 2 приведены дециметровое и метровое изображения участка течения Гольфстрим в Баренцевом море ($71^\circ 32' \text{ N}$, $22^\circ 34' \text{ E}$, 05.08.93) и интерпретационная карта, построенная по данным съемки. Видно, что неоднородности с масштабами, соответствующими рассеянию радиоволн дециметрового диапазона, наблюдаются с примерно одинаковым контрастом ($D_{\text{max}} \approx 14.9$ дБ) на всей поверхности течения и на некотором удалении от границ. Неоднородности, соответствующие рассеянию радиоволн метрового диапазона, наблюдаются с меньшим контрастом ($D_{\text{max}} \approx 6.4$ дБ) преимущественно внутри основного потока течения, концентрируясь вблизи границ. Для оценки размеров наблюдаемых неоднородностей в этих зонах был проведен анализ пространственных энергетических спектров и автокорреляционных функций [2]. На рис. 3 приведены результаты оценок спектральной плотности мощности $S_{xx}(a)$ и автокорреляционной функции $R(x)$ в верхней I и нижней II части приграничной зоны

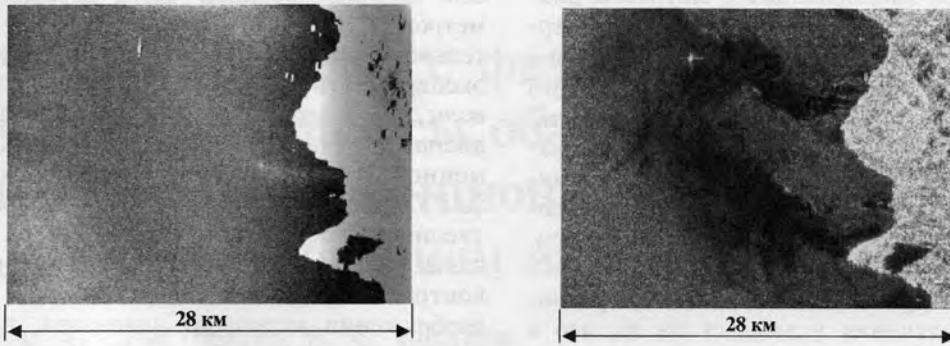


Рис. 1. Синхронные изображения Черноморского побережья, полученные с помощью комплекса МАРС в см- и дм-диапазонах (слева и справа)

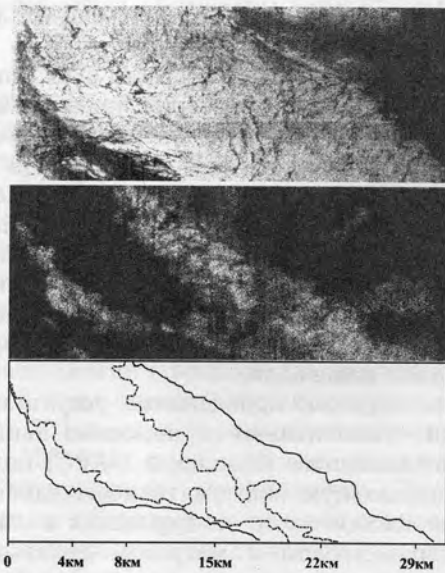


Рис. 2. Синхронные изображения в дм- и метровом диапазонах участка течения Гольфстрим в Баренцевом море и интерпретационная карта

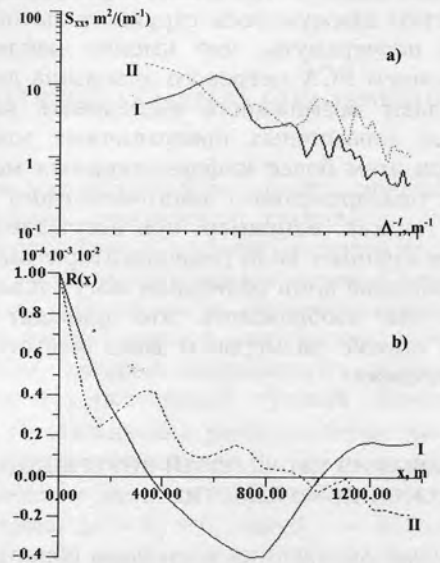


Рис. 3. Спектральная плотность мощности и АКФ по данным зондирования течения в метровом диапазоне

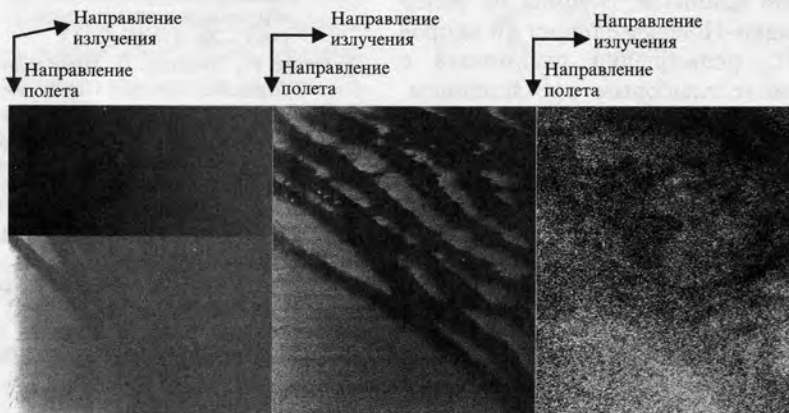


Рис. 4. Синхронные изображения неоднородностей морского волнения, полученные с помощью комплекса МАРС по результатам зондирования в см-, дм- и метровом диапазонах длин радиоволн

течения по данным зондирования в метровом диапазоне. Вид S_{xx} и $R(x)$, а также отсутствие контраста в изображениях сантиметрового диапазона (что соответствует скорости приповерхностного ветра менее 3—5 м/с), позволяют предположить, что неровности поверхности, резонансно рассеивающие метровые радиоволны, принадлежат к возмущениям неветрового происхождения, которые содержат как резонансно рассеивающие компоненты, так и крупномасштабные (до 1000 м и более).

Наличие таких крупномасштабных неоднородностей в акватории течения указывает на то, что в период наблюдения одним из наиболее вероятных механизмов формирования спектра поверхностных колебаний являлись процессы, порожденные турбулентностью движущегося струйного потока. Необходимо подчеркнуть, что именно наблюдения с применением РСА метрового диапазона длин радиоволн дают возможность исследовать явления в наиболее динамичных приграничных зонах течения. При этом более информативными могут быть данные одновременного многочастотного зондирования, так как, например, при отсутствии ветра и наличии крупных волн радиолокаторы сантиметрового диапазона длин радиоволн могут давать слабоконтрастные изображения. Это приводит к различиям в оценке размеров и даже местоположения русла течения.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЯВЛЕНИЙ ВНУТРЕННИХ ВОЛН НА МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Проявление внутренних волн было обнаружено радиолокаторами комплекса МАРС в Баренцевом море вблизи северной части острова Новая Земля (77°15' N, 64°40' E). Возможность образования внутренних волн в районе наблюдений подтверждается гидрологическими данными: глубина не более 200 м, течение (Западно-Новоземельное) со скоростью около 25 см/с, рельеф дна равнинный с мелкохолмистым и мелкоглыбовым расчленением. На рис. 4 приведены синхронные изображения неоднородностей морского волнения, полученные по результатам зондирования в сантиметровом, дециметровом и метровом диапазонах длин радиоволн. Их анализ показывает, что с максимальным (по абсолютной величине) контрастом ($|D| = 11...16$ дБ) внутренние волны наблюдаются только в L-изображении. При этом волны имеют квазипериодическую структуру с периодом около 3 км. Сла-

бый контраст верхней части изображения сантиметрового диапазона свидетельствует о незначительном морском волнении в момент проведения эксперимента. Увидеть проявление внутренних волн на поверхности при зондировании в этом диапазоне удалось только после выключения временной автоматической регулировки усиления ВАРУ приемника (нижняя часть изображения), что увеличило потенциал радиолокатора в ближней части полосы обзора на 12 дБ. Несмотря на слабый контраст внутренних волн ($|D| = 2.5 ... 5.4$ дБ) в изображении метрового диапазона, данные одновременного зондирования в дециметровом и метровом диапазонах длин радиоволн несут информацию о энергонесущей части спектра морского волнения. Одним из возможных механизмов наблюдаемого проявления внутренних волн могут быть особенности динамики приповерхностного слоя в поле обрушения ветровых волн, которые приводят к подавлению волнения в областях дивергенции течения [1]. Очевидно, что при достаточном ветровом волнении проявление внутренних волн можно будет наблюдать и с помощью радиолокатора сантиметрового диапазона. Поэтому наиболее информативным для наблюдения проявлений внутренних волн на морской поверхности является синхронный мониторинг в сантиметровом, дециметровом и метровом диапазонах длин радиоволн.

Таким образом, приведенные результаты исследований, выполненных с помощью авиационного радиолокационного комплекса МАРС, подтверждают максимальную информативность одновременного радиолокационного зондирования в сантиметровом, дециметровом и метровом диапазонах трех основных типов неоднородностей морской поверхности.

1. Дулов А. В., Запелалов А. С., Большаков А. Н., Смолов В. Е. Проявление динамики воды в прибрежной зоне в поле обрушений ветровых волн // Морской гидрофиз. журн.—1999.—№ 4.—С. 3—17.
2. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. Основные методы: Пер. с англ. — М.: Мир, 1982.—482 с.
3. Субботина Е. П. Сборник физических констант и параметров. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1967.—148 с.
4. Boyev A. G., Karvitsky G. E., Matveyev A. Ya., Tsymbal V. N. Evaluation of Oil Film Parameters on the Sea Surface Using Multifrequency Radar Data // Telecommunications and Radio Engineering.—1997.—51, N 8.—P. 4—12.
5. Kalmykov A. I., Tsymbal V. N., Matveev A. Ya., et al. The Two-Frequency Multipolarisation L/VHF Airborne SAR for Subsurface Sensing // AEU Internat. J. Electronics and Communications. Archiv für Electronik und Übertragungstechnik.—1996.—50, N 2.—P. 145—149.