

УДК 621.371.029

## ФОРМИРОВАНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ОБРАЗОВАНИЙ, СОЗДАВАЕМЫХ КОРАБЛЕМ

А. С. Запевалов

Морской гидрофизический институт РАН

Статья получена 30 июля 2015 г., после доработки – 24 сентября 2015 г.

**Аннотация.** Анализируются современные представления о физических механизмах формирования радиолокационных изображений поверхностных следов надводных объектов при зондировании с космических аппаратов. Рассмотрены такие типы гидродинамических образований как корабельные волны, пенный и турбулентный след. Основное внимание уделено образованию нового, недавно обнаруженного типа возмущений, создаваемых движущимся объектом, получившего название узкий V-образный корабельный след.

**Ключевые слова:** радиолокационное изображение, морская поверхность, искусственные гидродинамические образования, узкий V-образный корабельный след.

**Abstract.** Modern concepts of the physical mechanisms of formation of radar images of the surface wake of moving objects are examined, when sensing is carried out from the spacecraft. We considered these types of hydrodynamic formations as ship waves, foam and turbulent wake. The main attention is paid to the formation of a new, recently discovered type of disturbances, created by the moving object, it is called narrow V-like ship wake.

**Keywords:** radar image, artificial hydrodynamic patterns, sea surface, narrow V-like ship wake.

### Введение

В настоящее время одним из путей решения проблемы освещения надводной обстановки на больших акваториях является использование

установленных на аэро- и космических аппаратах радиолокаторов с высоким пространственным разрешением, которые регистрируют гидродинамические возмущения, создаваемые надводными объектами [1, 2]. Размещенные на борту космического аппарата радиолокаторы также позволяют получать информацию о приводном ветре [3], волновой обстановке и поверхностных течениях [4].

Разработка космических радиолокационных станций военного назначения началась в конце 50-х годов и интенсивно развивается до настоящего времени. В конце 90-х годов началась разработка радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) третьего поколения. Их особенностью является высокое пространственное разрешение (единицы метров) и возможность использования космических аппаратов малого и среднего класса (массой 700...1500 кг). В случае применения широкополосных радиосигналов может быть достигнуто сверхразрешение (примерно до 0.3 м [5]).

Задача радиолокационного обнаружения искусственных гидродинамических образований на морской поверхности имеет две составляющие. Первая составляющая – это построение теории рассеяния радиоволн на шероховатой морской поверхности. Основные положения этой теории были сформулированы в начале 70-х годов [6]. С развитием средств радиолокационного зондирования, повышения их разрешающей способности возросла интенсивность исследований особенностей обратного рассеяния радиоволн СВЧ диапазона гидродинамическими образованиями, созданными надводными объектами (см. работы [7, 8] и библиографию к ним). Вторая составляющая – исследования механизмов образования гидродинамических образований, возникающих при движении надводного объекта, интенсивно развивается в настоящее время [9, 10].

Целью настоящей работы является анализ современных представления о физических механизмах формирования радиолокационных изображений гидродинамических образований, создаваемых движущимися надводными объектами.

## Формирование поверхностного следа надводного объекта

До недавнего времени было принято считать, что поверхностный след составляют три типа возмущений. К первому типу возмущений относятся корабельные волны (волны Кельвина), симметрично распространяющиеся под углом  $19.5^\circ$  к курсу объекта, и поперечные волны, распространяющиеся в направлении движения объект [11]. Длины поперечных  $\lambda_{\perp}$  и продольных  $\lambda_{\parallel}$  волн однозначно определяются одним параметром, каковым является скорость объекта  $V$ , и описываются выражениями

$$\lambda_{\perp} = \frac{2\pi}{g} V^2 \quad \text{и} \quad \lambda_{\parallel} = \frac{2}{3} \lambda_{\perp}, \quad (1)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения. Волновой след является наиболее изученным проявлением возмущений морской поверхности, создаваемых кораблем. Исследованию корабельных волн уделялось большое внимание, поскольку мощность, затраченная на их генерацию, может составлять значительную часть мощности корабельных двигателей. То обстоятельство, что длины корабельных волн являются функцией одного параметра, позволяет оценивать скорость объекта по радиолокационным изображениям созданных им корабельных волн.

Радиолокационные изображения корабельных волн определяют два фактора. Первым фактором является модуляция уровня шероховатости вдоль профиля корабельной волны, под воздействием генерируемых ею знакопеременных орбитальных скоростей. Еще один фактор – это изменение корабельной волной локального наклона морской поверхности, в результате чего береговские (резонансные) волны распространяются по криволинейной поверхности [12].

Численное моделирование показывает [13], что при радиозондировании в L-диапазоне корабельные волны видны лучше, чем при зондировании в C-диапазоне. Длины радиоволн, в которых работают устанавливаемые на

космических аппаратах локаторы, соответствующие основным диапазонам, согласно принятым стандартам IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), приведены в табл. 1.

Табл. 1.

Диапазоны радиоволн по стандарту IEEE

Наименование диапазонов	Границы диапазонов	
	по частотам	по длинам волн
<i>L</i>	1 – 2 ГГц	30 – 15 см
<i>S</i>	2 – 4 ГГц	15 – 7.5 см
<i>C</i>	4 – 8 ГГц	7.5 – 3.75 см
<i>X</i>	8 – 12 ГГц	3.75 – 2.5 см

Вторым типом возмущений морской поверхности является пенный след. Он образуется в результате обрушений длинных гравитационных волн вблизи носовой части движущегося объекта. При обрушении волн, как показано в работе [13], вблизи гребня могут возникать фокусирующие структуры, которые дают высокий уровень отраженного радиосигнала. Этот эффект имеет место только при малых углах скольжения. При зондировании с космических аппаратов максимальные углы падения для радаров с синтезированной апертурой не превышают 50°-60° (соответственно углы скольжения больше 30°-40°), поэтому эффект фокусировки можно не учитывать.

Возмущения третьего типа возникают в результате взаимодействия зоны повышенной турбулентности в кильватерной струе с полем коротких ветровых волн. Физическими механизмами, ответственными за появление зоны повышенной турбулентности позади движущегося объекта, являются: обрушение ветровых волн и зыби в носовой части объекта, обтекание водным потоком корпуса объекта, работа движителя.

Анализ данных, полученных с помощью спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой ASAR Envisat и SAR ERS-2, показал, что

турбулентные корабельные следы являются долгоживущими образованиями и имеют длины в десятки, а иногда и в сотни километров [15]. На радиолокационных изображениях след выглядит как более темная, чем окружающий фон, полоса, которая начинается непосредственно за кораблем. При зондировании морской поверхности, в ситуациях, когда регистрируемый сигнал определяется резонансным рассеянием, темный цвет полосы на радиолокационных изображениях соответствует более низкому, чем в окрестности следа, уровню шероховатости.

Схематично традиционное представление возмущений морской поверхности, создаваемых движущимся по ней объектом, представлено на рис. 1. Здесь черными линиями показаны корабельные волны: 1 – продольные волны, 2 – поперечные волны. Красными штриховыми линиями показан клин Кельвина. Синий пунктир – это продолжение корабельных волн за границу клина Кельвина, поскольку на этой границе гребни волн не обрываются, а спадают экспоненциально [11]. Желтым цветом отмечен турбулентный след. Зеленым цветом показана область пены. Этот вид следа является короткоживущим, по сравнению с двумя другими типами возмущений.

Первые радиолокационные изображения следов надводных кораблей были получены со спутника SEASAT в 1978 г. [16]. С появлением радаров с синтезированной апертурой аппаратура этого типа, имеющая высокое пространственное разрешение, начала активно использоваться для исследования корабельных следов. Проведенные исследования позволили выявить новый тип возмущений морской поверхности, который получил название узкий V-образный корабельный след (narrow V-like ship wake) [17]. Он представляет собой две полосы, расходящиеся под углом  $2-3^\circ$  к курсу объекта. На радиолокационных изображениях длина следа достигала нескольких десятков километров, и менялась в зависимости от погодных условий, типа и скорости судна, а также от длины волны, на которой работал локатор [2].

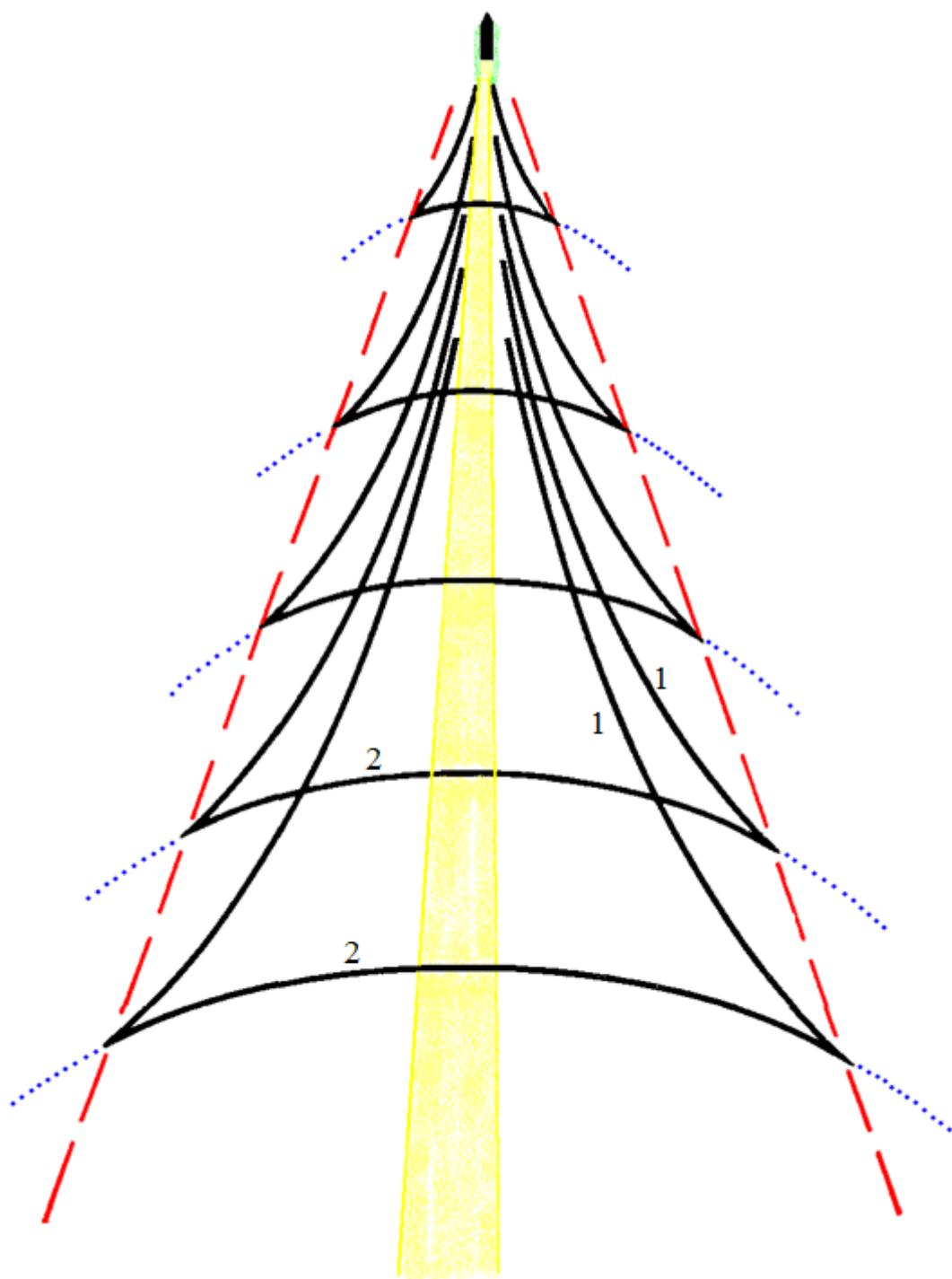


Рис. 1. Типы возмущений морской поверхности, создаваемые движущимся надводным объектом

Узкий V-образный след впервые был обнаружен в 1978 г., на изображениях, полученных с помощью радара с синтезированной апертурой, который был установлен на космическом аппарате SEASAT [18]. Хотя, как и корабельные волны, он имеет клиновидную форму, его характеристики сильно

отличались от характеристик традиционно регистрируемых корабельных волн.

Изображения, полученные с помощью радаров с синтезированной апертурой, интерпретируются в рамках модели резонансного (брегговского) рассеяния. Для радара, установленного на космическом аппарате, SEASAT длина резонансной составляющей поля поверхностных волн приблизительно равнялась 30 см [18].

На радиолокационных изображениях узкий V-образный след выглядит как две светлых линии. Пример изображения такого следа приведен на рис. 2, который является фрагментом рис. 3, представленного в работе [18]. Обратим внимание на то, что на данном изображении не видны корабельные волны и турбулентный след.

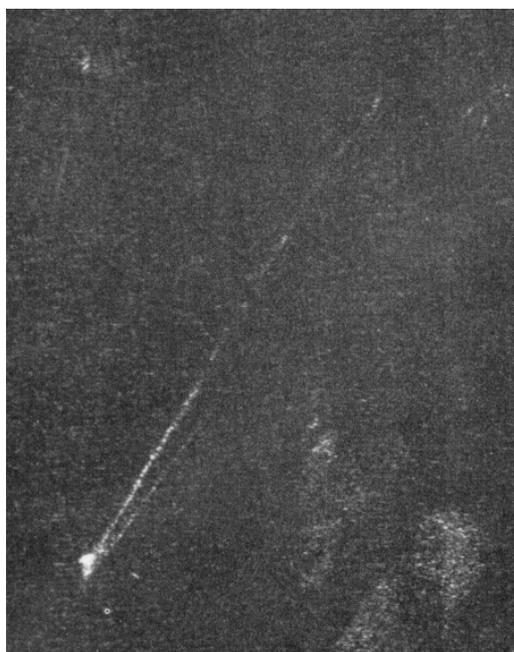


Рис. 2. Радиолокационное изображение узкого V-образного следа, полученное с помощью радара с синтезированной апертурой, установленного на космическом аппарате SEASAT

Следует отметить, что наблюдения морской поверхности в оптическом диапазоне, где физическим механизмом, формирующим изображение морской поверхности, является зеркальное отражение, также подтвердили существования узкого V-образного следа [18].

## Физические модели формирования узкого V-образного корабельного следа

Обнаружение нового типа поверхностного корабельного следа потребовало построение модели, описывающей его образование. Были предложены несколько физических механизмов, ответственных за появление узкого V-образного корабельного следа.

Внутренние волны. В работе [19] была предложена модель образования узкого V-образного корабельного следа в результате генерации в приповерхностном слое кораблем внутренних волн и их взаимодействии с короткими ветровыми волнами. Как правило, корабельные внутренние волны наблюдаются при средних скоростях ветра при наличии в приповерхностном слое моря значительного вертикального градиента плотности. В указанных условиях они хорошо видны на изображениях морской поверхности, полученных при радиозондировании в С-диапазоне, и несколько хуже в Х-диапазоне (см. табл. 1).

По мнению авторов работы [19] различие в контрастах изображений внутренних волн, полученных в разных диапазонах, связано с тем, что время жизни более длинных брегговских компонент для С-диапазона больше, чем для Х-диапазона. Отметим, однако, что релаксация коротких поверхностных волн имеет характерные периоды порядка десятков секунд, т.е. для существования достаточно длинного узкого V-образного корабельного следа необходим физический механизм, поддерживающий его образование. Это означает, что генерируемые кораблем внутренние волны также должны существовать достаточно длительный промежуток времени.

Вихри. Возможным физическим механизмом образования узкого V-образного корабельного следа могут также являться вихри, образующиеся позади движущегося объекта и имеющие горизонтально ориентированную ось [20]. Азимутальная ориентация оси вихрей близка к курсу корабля. Индуцированное вихрями поле горизонтальных скоростей приводит к модуляции энергии коротких поверхностных волн, что, в свою очередь,

приводит к появлению темных и светлых полос на радиолокационных изображениях морской поверхности.

Граница зоны повышенной турбулентности. Как отмечалось выше, позади движущегося объекта образуется зона повышенной турбулентности, которая имеет достаточно хорошо выраженную границу. Эта граница не является прямой линией, она имеет волнистую форму и подвержена колебаниям. Эти колебания, возможно, связаны с взаимодействием зоны повышенной турбулентности с длинными энергонесущими составляющими поля естественных поверхностных волн. В работе [17] предложена модель, согласно которой появление узкого V-образного корабельного следа обусловлено существованием этой границы.

В ходе проведения исследований изменения уровня шероховатости морской поверхности при переходе от штиля к ветровому волнению [21] нередко наблюдались ситуации, в которых переход слик-рябь (выглаженная – шероховатая поверхность) не описывался одной ступенькой. На границе зоны слика наблюдалась узкая хорошо выраженная полоса повышенной шероховатости. К сожалению ее характеристики было сложно зафиксировать при измерениях in-situ неподвижным лазерным уклономером. Однако визуальные наблюдения вдоль зоны слика полосы более шероховатой поверхности, чем в прилегающей зоне ряби, являются косвенным подтверждением справедливости предложенной в работе [17] модели образования узкого V-образного корабельного следа.

Отмечу, что в доступных литературных источниках не удалось найти работы, в которых для одного и того же радиолокационного изображения сравнивались характеристики турбулентного следа и узкого V-образного корабельного следа.

### **Наблюдения корабельных следов в разных метеоусловиях**

Сигнал, получаемый с помощью установленных на космических аппаратах радиолокаторов с синтезированной апертурой, определяют коротковолновые составляющие поля поверхностных волн. Динамические

образования, создаваемые движущимися надводными кораблями, возмущают структуру морской поверхности, создавая пространственные неоднородности волнового поля. Эти неоднородности и являются следами надводных кораблей.

Анализируя метеорологические условия, при которых след корабля будет наиболее отчетливо виден на радиолокационном изображении, прежде всего, необходимо оценить роль ветра, который является основным фактором, определяющим энергию коротких волн. При скоростях ветра менее 1.7 м/с его воздействие на морскую поверхность является слабым и не приводит к генерации волн ряби. При таком условии вся поверхность является штилевым сликом. При скорости ветра в диапазоне от 1.7 м/с до 5 м/с на морской поверхности могут одновременно наблюдаться как сликовые области, так и области ряби [21]. При скоростях ветра более 8-10 м/с начинается интенсивное обрушение поверхностных волн, маскирующее корабельные следы. Таким образом, наиболее благоприятным для наблюдения волнового и турбулентного следов является диапазон скоростей от 5-8 м/с. Диапазон скоростей ветра от 1.7 м/с до 5 м/с также благоприятен, хотя на поверхности существуют природные образования, маскирующие корабельные следы. В силу того, что корабельные следы имеют четкие геометрические характеристики, они достаточно легко могут быть выделены на фоне естественных неоднородностей.

Согласно существующим в настоящее время представлениям о механизме появления узкого V-образного следа, он образуется в результате взаимодействия с морской поверхностью динамических возмущений приповерхностного слоя. Этот механизм, в частности, лежит в основе трех рассмотренных выше моделей его появления. Возмущения поля скорости в приповерхностном слое моря сами являются источником возмущений морской поверхности, т.е. даже при штилевых условиях, когда ветровая рябь отсутствует, поверхность становится шероховатой. Подобные явления наблюдаются в природе. Когда интенсивные внутренние волны взаимодействуют с морской поверхностью, возникает сулой, область с резко возросшей шероховатостью.

Основываясь на механизме образования узкого V-образного следа, а также на приведенных оценках воздействия ветра на морскую поверхность, можно ожидать, что след будет хорошо виден на радиолокационных изображениях при скоростях ветра менее 1.7 м/с, когда наблюдения волнового и турбулентного следа затруднены. Это подтверждает рис. 2, где на темном фоне, который соответствует штилевым условиям, можно отчетливо распознать узкий V-образный след. При скоростях ветра выше 1.7 м/с особенности наблюдения узкого V-образного следа такие же, как при наблюдении волнового и турбулентного следов.

### **Заключение**

В современных условиях охрана и защита морских и прибрежных объектов требуют надежного освещения надводной обстановки в любое время суток, в любых метеорологических условиях. Основным средством, используемым для этих целей, являются радиолокационные системы. Применение на маломерных объектах покрытий, снижающих коэффициент отражения радиоволн, изготовление корпусов из слабо отражающих радиоволны материалов, существенно ограничивает возможности их обнаружения радиолокационными средствами. Альтернативным способом контроля акваторий является обнаружение объектов, по возмущениям структуры морской поверхности, которые они создают при своем движении.

В настоящее время наиболее эффективно процедура обнаружения движущихся по морской поверхности объектов осуществляется по корабельным волнам и турбулентному следу. Пенный след является коротко живущим и хуже различим на фоне естественных неоднородностей морской поверхности. Перспективы использования узкого V-образного корабельного следа для обнаружения надводных объектов нуждаются в дальнейших исследованиях.

## Литература

1. Lyden J.D., Hammond R.R., Lyzenga D.R., Shuchman R.A., Synthetic aperture radar imaging of surface ship wakes // J. of Geophysical Research. 1988. V. 93. P. 12293-12300.
2. Shemdin O.H. Synthetic aperture radar imaging of ship wakes in the Gulf of Alaska // J. of Geophysical Research. 1990. V. 95. P.16 319-16 338.
3. Запевалов А.С., Показеев К.В., Пустовойтенко В.В. О предельной точности альтиметрического определения скорости приводного ветра // Исследование Земли из космоса. 2006. № 3. С. 49-54.
4. Пустовойтенко В.В., Запевалов А.С. Оперативная океанография: Спутниковая альтиметрия – Современное состояние, перспективы и проблемы // Серия. Современные проблемы океанологии, Севастополь: НПЦ “ЭКОСИ-Гидрофизика”. 2012. Вып. № 11. 218 с.
5. Спутники радиолокационного зондирования Земли / Приложение № 1 к “Спутниковые системы связи и вещания” под. ред А.А. Кучейко. 1999. 84 с.
6. Басс Ф.Г., Брауде С.Я., Калмыков А.И., Мень А.В., Островский И.Е, Пустовойтенко В.В., Розенберг А.Д., Фукс И.М. Методы радиолокационных исследований морского волнения (радиоокеанография) // Успехи физических наук. 1975. № 116. С.741–743.
7. Pichel W. G., Clemente-Colón P., Wackerman C.C., Friedman K.S. Ship and wake detection // Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual (Ed. C. R. Jackson J. R. Apel). 2004. P. 277-304.
8. Гутник В.Г., Горобец В.Н., Гутник А.В., Курекин А. С., Некоторые особенности обратного рассеяния радиоволн СВЧ диапазона гидродинамическими образованиями надводных объектов // Радиофизика и радиоастрономия. 2005. Т.10, № 3, С. 325-333.
9. Ермаков С.А., Капустин И.А., О законе расширения турбулентного следа за надводным судном. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т.1, № 6. С. 364-372.

10. Peltzer R.D., Griffin O.M., Barger W.D., and Kaiser J.A.C. High resolution measurements of surfaceactive film redistribution in ship wakes // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. No. C4. P. 5231-5252.
11. Лайтхилл Дж. Волны в жидкости: Пер. с англ. - М.: Мир, 1981. - 598 с.
12. Запевалов А.С. Моделирование берегового рассеяния электромагнитного излучения сантиметрового диапазона морской поверхностью. Влияние волн более длинных, чем береговые составляющие // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45, № 2. С. 266-275.
13. Hennings R., Romeiser R., Alpers W., Viola A. Radar imaging of Kelvin arms of ships wakes // Int. J. Remote sensing. 1999. V. 20, No. 13. P.2519-2543.
14. Гутник В.Г., Кулемин Г.П., Шарапов Л.И., Горбач Н.В. Энергетические спектры радиолокационных отражений от взволнованной морской поверхности при малых углах скольжения // Радиофизика и электроника. 2002. Т. 7, № 3. С. 474-483
15. Митягина М.И., Лаврова О.Ю. Особенности проявления на спутниковых радиолокационных изображениях корабельных следов в областях интенсивного цветения фитопланктона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 73–87.
16. Fu L.-L., Holt B. Seasat views oceans and sea ice with synthetic-aperture radar. JPL Publication 81-120. NASA and JET Propulsion Lab. C.I.T. 1982. 200 p.
17. Gu D., Phillips O.M. On narrow V-like ship wakes // J. Fluid Mech. 1994, Vol. 225, P. 301-325.
18. Munk W.H., Scully-Power P., Zachariasen F. Ships from Space // Proc. R. Soc. A. 1987. V. 412. P. 231-254.
19. Lyden J.D., Hammond R.R., Lyzenga D.R., Shuchman R.A. Synthetic aperture radar imaging of ships waves // J. Geophys. Res. 1988, Vol. 95, C10, P. 12293-12303.
20. Swanson C V. Radar observability of ship wakes // Report. Cortana Corporation. 1984. 87 p.

21. Христофоров Г.Н., Запевалов А.С., Бабий М.В. Измерения параметров шероховатости морской поверхности при переходе от штиля к ветровому волнению // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1992. Т. 28, № 4. С. 424-431.