

## Влияние взаимодействия внутренних солитонов на поверхностные проявления корабельного следа

К.Д. Сабинин<sup>1,2</sup>, О.Ю. Лаврова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт космических исследований РАН

<sup>2</sup> Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева

E-mails: ksabinin@yandex.ru; olavrova@iki.rssi.ru

Рассматривается уникальный случай резкого излома узкой сливовой полосы за движущимся судном, выявленный на радиолокационном изображении ASAR Envisat в западной части Черного моря. Скачок полосы наблюдался вдоль связанного с внутренними солитонами полосы супса на протяжении 2,3 км. Подобная необычная и трудно интерпретируемая картина может быть объяснена как результат сноса сливовой полосы орбитальными течениями сталкивающихся внутренних солитонов, которые в этом районе часто проявляются на спутниковых изображениях. Оценки степени нелинейности этих солитонов и образующих супса орбитальных скоростей подтверждают высказанную гипотезу происхождения наблюдённого скачкообразного искривления корабельного следа.

**Ключевые слова:** внутренние волны, внутренние солитоны, корабельные следы, слики, супсы, тонкая структура течений, ветровой снос, радиолокационное зондирование из космоса, ASAR Envisat, Черное море.

Бурное развитие дистанционных методов зондирования Земли из космоса в последние годы значительно расширило возможности изучения процессов в море и приводном слое атмосферы. В частности использование данных спутниковой радиолокации для исследования внутренних волн по их проявлениям на морской поверхности позволило оценивать такие трудно измеряемые обычными средствами параметры как пространственная структура волн, их длина и направление распространения. В то же время, в отличие от контактных методов измерений, дистанционные методы не дают возможность оценивать амплитуду внутренних волн, поскольку интенсивность их проявлений на радиолокационных изображениях зависит не только от амплитуды волн, но и от многих других не всегда хорошо контролируемых факторов. Некоторую помощь в решении этого вопроса может оказать анализ характера искривления следов за судами, пересекающих цуги внутренних волн.

Как показывает многолетний опыт спутниковых радиолокационных наблюдений, сливовые полосы или полосы выглаживания морской поверхности под действием локальных гидродинамических процессов изменяют свою форму, являясь, по существу индикаторами тонкой пространственной структуры течений (Лаврова, 2005; Gade et al., 2005). В частности, хорошо различимые на РЛИ темные узкие следы за движущимися судами, которые образуются на поверхности моря из-за сброшенных с судов загрязненных нефтепродуктами вод, часто подвергаются заметному сносу и искривлению под влиянием ветра и течений.

Наше внимание привлекло радиолокационное изображение ASAR Envisat поверхности Чёрного моря, полученное 13 апреля 2011 г. юго-восточнее дельты Дуная (рис.1а). На увеличенном его фрагменте (рис.1б) видны чередующиеся полосы супсов и сликов и пересекающий их узкий корабельный след выглаженной поверхности, тянувшийся за судном почти на 75 км без видимого расширения. Подобные чередующиеся полосы сликов и супсов являются типичным проявлением внутренних солитонов, которые часто наблюдаются в

данном районе (Лаврова и др., 2011). Тонкий долгоживущий и почти не расширяющийся корабельный след мог быть связан, либо со сбросом с движущегося судна вод, содержащих нефтепродукты, либо с эффектом всплыивания фитопланктона в центре кильватерной струи (Скворцов и др., 2010).

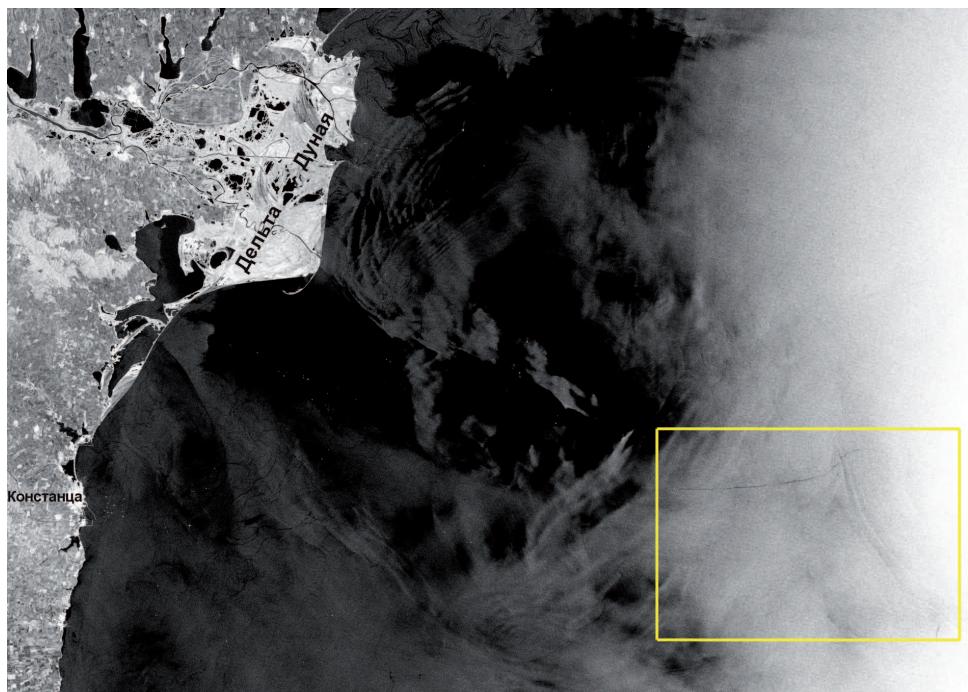


Рис. 1а. Изображение ASAR Envisat, полученное в западной части Черного моря 13.04.2011 в 08:15 UTC с разрешением в точке 75 м. Желтым прямоугольником отмечено положение фрагмента, представленного на рис. 1б

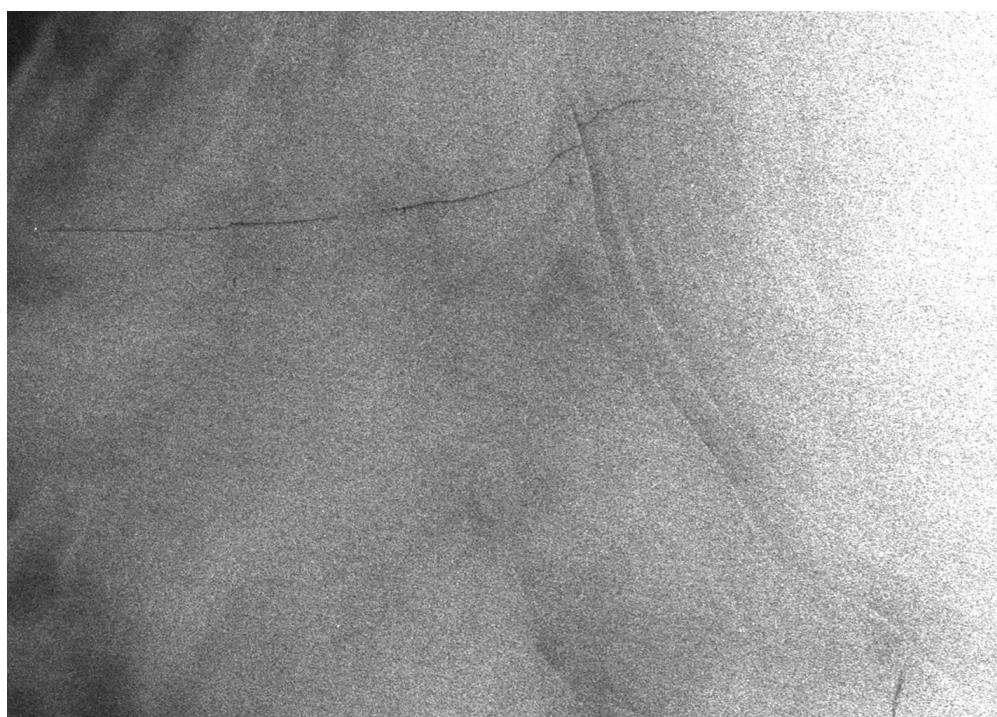
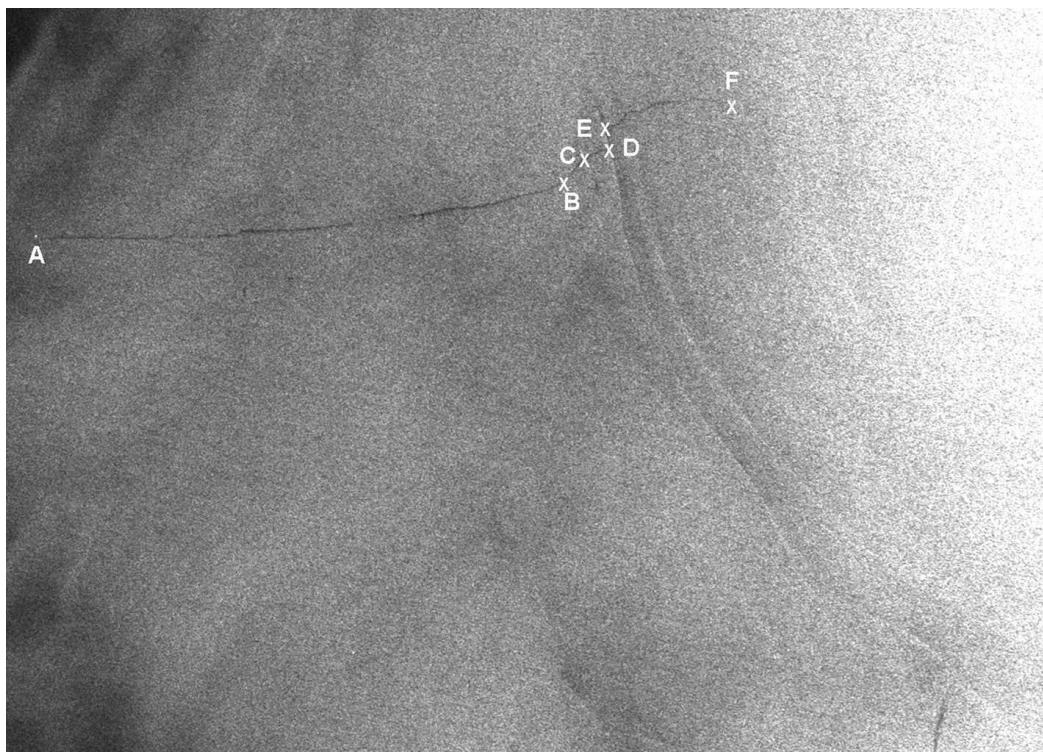


Рис. 1б. Узкий корабельный след, пересекающий полосы супоев, соответствующих поверхностным проявлениям внутренних солитонов. Увеличенный фрагмент ASAR Envisat изображения, представленного на рис. 1а

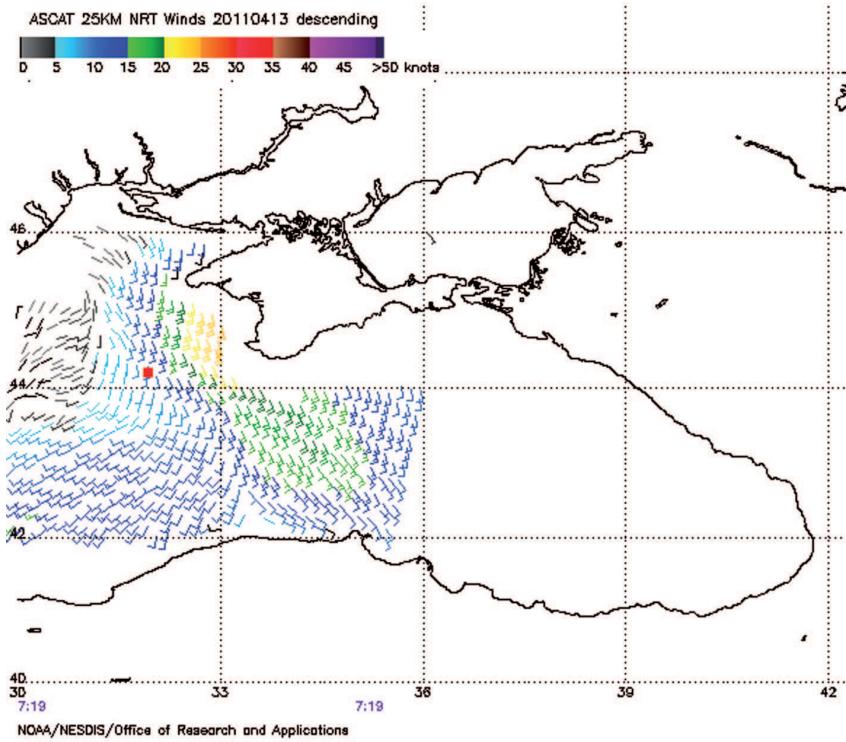


*Рис. 1в. ASAR Envisat изображение, представленное на рис. 1б. Буквами отмечены точки, в которых наблюдаются основные искривления корабельного следа.*

*A – положение судна в момент радиолокационной съемки, DE – резкий излом следа вдоль сулоя. AB = 52,4 км; BC = 3,7 км; CD = 3,6 км; DE = 2,3 км; EF = 14,6 км.*

Поражает довольно резкое искривление следа в 52-63 км от судна (кривая BCDE рис. 1в), распадающееся на несколько мелкомасштабных ступенек. Особенно загадочен скачок следа на 2,3 км вдоль наиболее яркой полосы сулоя. Даже более плавное искривление следа (кривая BCD) на расстоянии 52 – 60 км от точки А (положения судна на момент радиолокационной съемки) вряд ли можно связывать с маневрированием такого крупного судна, т.к. экономия времени, суда обычно не отклоняются от заданного курса. Тем более немыслим резкий манёвр судна на 2,3 км, при котором оно должно было дважды (в точках Е и D, рис. 1в) повернуть практически мгновенно на углы 140 и 90 градусов соответственно.

Попытаемся объяснить полученную картину, считая, что судно следовало постоянным курсом 270°, соответствующим прямолинейному отрезку следа вблизи судна (у точки А). Таким курсом следуют суда, идущие из Туапсе в Констанцу. Первоначально слабый изгиб следа между точками А и В резко усилился, что могло быть следствием увеличения ветрового сноса. Принимая скорость судна равной 28 км/ч (что соответствует 15 узлам), можно оценить скорость ветрового сноса на различных участках следа, которая слабо возрастила от 0,2 до 0,7 м/с на участке АВ, после чего она резко увеличилась до 1,1 м/с на участке ВD (рис. 1в). Соответствующее пространственное изменение ветра наблюдалось в этом районе и на карте ветрового поля (рис. 2), полученной по данным сенсора ASCAT (Advanced Scatterometer) европейского спутника MetOp часом ранее. Оцененное нами пятикратное увеличение скорости сноса от 0,2 м/с до 1,1 м/с хорошо согласуется с дистанционными данными об увеличении скорости ветра в рассматриваемом районе от 1-2 м/с до 5-10 м/с. Естественно, что скорость ветрового сноса сливовой полосы уступает скорости самого ветра.



*Рис. 2. Поле ветра на момент времени 07:19 UTC 13.04.2011, восстановленное из данных ASCAT MetOP. Пространственное разрешение 25 км. Красной точкой отмечено место максимального ветрового сноса корабельного следа (Область BD рис. 1б)*

На фоне общего сноса резко выделяется скачок следа вдоль сулоя на 2,3 километровом отрезке ED (рис.1,в), который уже невозможно объяснить никаким ветровым сносом, поскольку для этого потребовалось бы предположить нереально резкое и сильное усиление ветра. Маловероятен и столь резкий манёвр судна, а странная привязка скачка к полосе сулоя также заставляет искать другие объяснения этой необычной картины.

Среди различных вариантов наименее противоречивой, хотя и непростой, кажется гипотеза о переносе следа орбитальными течениями солитонов, идущих навстречу друг другу и столкнувшихся на этом отрезке. В самом деле, при внимательном рассмотрении рис. 1б можно заметить две системы сулоев, которые схематично представлены на рис. 3:

- основная система, проявляющаяся в виде, по крайней мере, двух больших дуг сулоев, отстоящих друг от друга на 1 – 3 км и выпуклых к WSW (система 1 на рис. 3)
- система из нескольких хорошо заметных в нижней части рис.1б менее протяжённых дуг, выпуклых к NE и вытянутых в направлении SE-NW вдоль большой дуги лидирующего сулоя первой системы (система 2 на рис. 3). Нечто похожее на «ножка Маха» (типичное проявление столкновения солитонов) можно усмотреть и в слабом отроге сулоя, отходящем от наиболее яркой части сулоя несколько южнее точки D в юго-юго-западном направлении (дуга 3 на рис. 3).

Первую систему естественно связать с солитонами, идущими на WSW от удалённого источника, тогда как второй системе соответствуют относительно «молодые» солитоны, идущие почти навстречу первой системе от сравнительно близких нескольких источников. Сулои этой второй группы выстраиваются вдоль лидирующего солитона первой группы, свидетельствуя о столкновении обоих систем, особенно хорошо проявляющимся вблизи пересечения со следом (отрезок ED). Об относительной «молодости» этих идущих с западной

стороны солитонов (обозначим их скорость  $C_w$ ) свидетельствует более сильная кривизна их фронтов. Скорость идущих с востока солитонов первой системы обозначим  $C_e$ . Соответствующие орбитальные течения обозначим  $V_e$  и  $V_w$ .

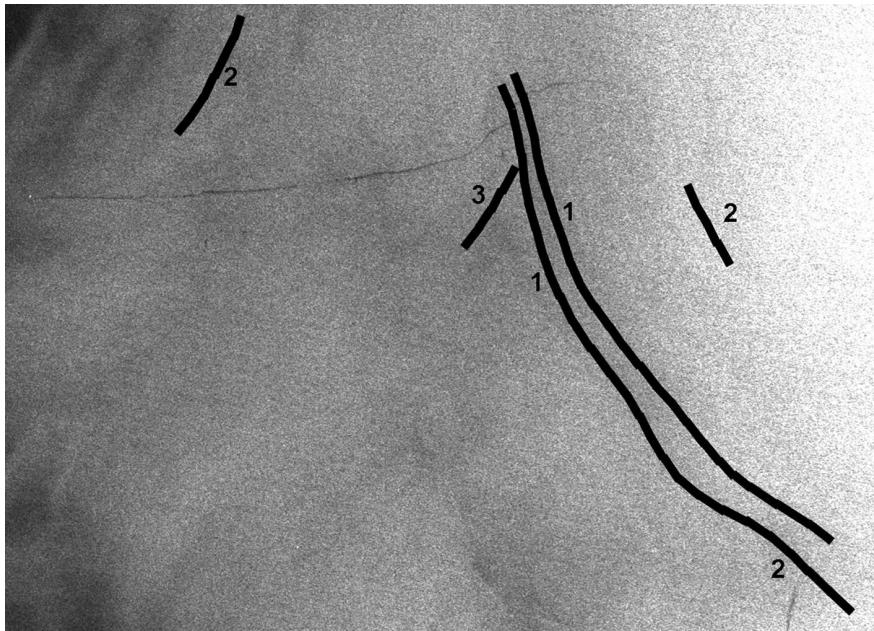


Рис. 3. Схема поверхностных проявлений солитонов внутренних волн, выявленных на ASAR Envisat изображении (рис. 1б). 1 – система супоев, распространяющаяся на юго-запад; 2 – система супоев «молодых» внутренних солитонов, распространяющихся на северо-восток; 3 - «ножка Маха»

Рассмотрим взаимодействие обеих систем солитонов, используя для простоты, как это часто делается (см., например, Филиппов, 1990), аналогию со столкновением двух мячей. Если  $C_e \sim -C_w$ , то центр масс этих мячей (солитонов) остаётся неподвижным. После столкновения в течение некоторого времени  $t_{deform}$  мячи сминаются, а затем отскакивают друг от друга.

Подобное происходит и при столкновении направленных навстречу (или почти навстречу) друг другу солитонов, как это, видимо, было в рассматриваемом случае. Верхняя, наиболее резкая часть супоя (участок ED), по-видимому, является местом деформации передних фронтов солитонов, где образуется малоподвижная «стена» супоя, к которой направленные навстречу друг другу орбитальные течения  $V_e \sim -V_w$  обоих солитонов, подгоняя направленную под углом к супою плёнку. Нетрудно понять, что нижняя часть следа на отрезке ED при этом должна переносится орбитальным течением  $V_w$  «молодого солитона» к ENE, тогда как северная часть, течением  $V_e$  основного солитона – к WSW, в результате чего плёнка концентрируется вдоль зоны деформации обоих солитонов, проявляющейся в виде полосы интенсивного супоя (рис. 4).

Предлагаемая интерпретация происхождения резкого скачка нуждается в подкреплении в виде сложного численного моделирования, но в данной работе мы ограничимся только следующими оценками. Наклонный след (угол  $\alpha$  между следом и «стеной», который можно оценить, как угол между отрезками ED и CE), подгоняемый направленными навстречу друг другу орбитальными течениями  $V_{orb}$  сталкивающихся солитонов вытягивается вдоль застывшей на некоторое время  $t_{deform}$  на одном месте «стены». Путь частиц в каждой из половин скачка за это время

$$Track = \pm \tan \alpha \times ED / 2, \text{ и } V_{orb} = \pm Track / t_{deform}.$$

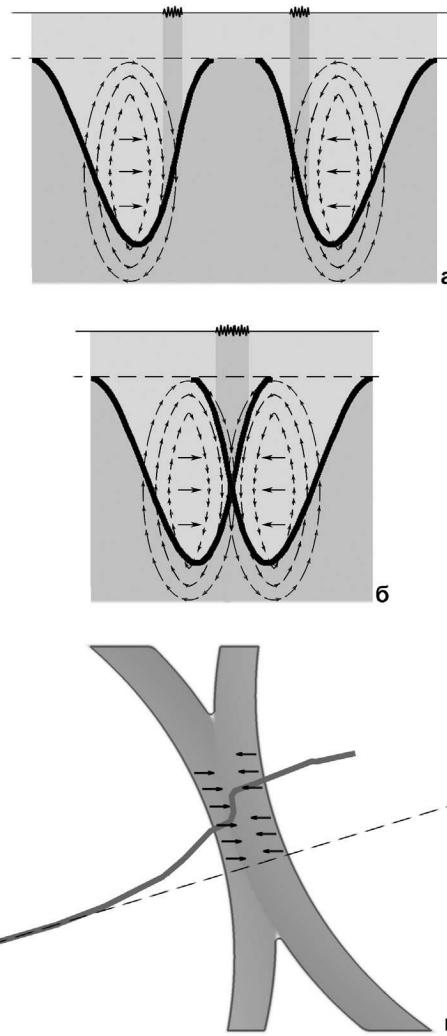


Рис. 4. Схематичное изображение двух систем солитонов и влияния их столкновения на корабельный след.

Стрелочками отмечены направления орбитальных скоростей

- а) до взаимодействия;
- б) во время взаимодействия;
- в) резкий излом следа в области взаимодействия солитонов

Поскольку «стена» стоит, второй (к востоку от первого) солитон основной системы приближается к ней со скоростью  $C = L_{deform} / t_{deform}$ , где  $L_{deform}$  – ширина зоны деформации сталкивающихся солитонов, которую можно оценить как сужение расстояния между суплюми основной системы в области «стены»  $L_1$  и вне неё  $L_2$ :  $L_{deform} = L_2 - L_1$ . Получаем величину, характеризующую степень нелинейности

$$V_{obr}/C = \pm Track / L_{deform}.$$

Пространственная картина, представленная на радиолокационном изображении (рис. 1б), позволяет оценить необходимые величины:  $L_1 \sim 1$  км;  $L_2 \sim 3$  км;  $L_{deform} \sim 2$  км;  $\tg A \sim 1,3$ ; откуда:  $Track \sim 1,5$  км;  $V_{obr}/C \sim 0,75$ . Используя достаточно типичную для солитонов скорость распространения  $C = 0,5 - 1$  м/с, получаем вполне реальные значения образующих суплюи орбитальных скоростей  $V_{obr} = 0,375 - 0,75$  м/с.

Таким образом, сделав ряд более или менее обоснованных предположений, мы получили непротиворечивое, хотя и непростое объяснение наблюдённой странной картины резкого излома следа судна. Заметим также, что попутно удалось оценить его ветровой снос, характеризующий поле ветра в рассматриваемом районе.

Авторы благодарят д.ф.-м.н. А.Н. Серебряного (АКИН) за полезные обсуждения и к.б.н. А.Я. Строчкова (ИКИ РАН) за помощь в подготовке статьи. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ №10-05-00428-а и №11-05-12047-офи-м. Данные Envisat ASAR получены в рамках проектов Европейского космического агентства C1P6342.

## Литература

1. *Лаврова О.Ю.* Слики как индикаторы вихревой активности в прибрежной зоне // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса, 2005. Вып.2. Т.2. С. 118-123.
2. *Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А.* Комплексный спутниковый мониторинг морей России. - М., ИКИ РАН, 2011 – 471 с.
3. *Скворцов Е.И., Раев М.Д., Булатов М.Г., Шарков Е.А., Лаврова О.Ю., Силкин В.А.* Радиофизические микроволновые исследования образования скоплений фитопланктона на морской поверхности // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 3. С. 35-40.
4. *Филиппов А.Т.* Многоликий солитон. - М., Наука, 1990 — 288 с.
5. *Gade M., Lavrova O.Yu., L.M. Mitnik, J.C.B. da Silva, S.A. Ermakov, and D.K. Woolf.* SIMP: Slicks as Indicators for Marine Processes // Proceedings of 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. 20-24 June 2005, Saint Petersburg, Russia. 2005.

## Impact of internal solitons interaction on surface manifestation of a ship wake

K.D. Sabinin<sup>1,2</sup>, O.Yu. Lavrova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup> N.N. Andreyev Acoustics Institute, Moscow, Russia

E-mails: ksabinin@yandex.ru, olavrova@iki.rssi.ru

A unique case of sharp distortion of a narrow slick wake of a moving ship manifested in an Envisat ASAR image obtained over the west Black Sea is discussed. A 2,3-km shift of the wake was observed along a rip band formed by internal solitons. It is suggested that the phenomenon was the result of interaction of two internal solitons that propagated towards each other from opposing directions. Estimates of the internal soliton non-linearity and orbital current velocities are made. The obtained results implicitly prove the suggested hypothesis about the origin of the phenomenon.

**Keywords:** internal waves, internal solitons, nonlinear interaction, ship wakes, slick, rips, radar satellite observation, ASAR Envisat, the Black Sea.