Кольчатые структуры на спутниковых изображениях и вероятная причина их образования (феноменологическая модель)

К.Д. Сабинин ^{1,2}, О.Ю. Лаврова ²

¹ Акустический институт имени академика Н. Н. Андреева, Москва, Россия E-mail: ksabinin@yandex.ru ² Институт космических исследований РАН, Москва, Россия E-mail: olavrova@iki.rssi.ru

Статья посвящена рассмотрению своеобразных кольчатых трубок, поверхностные проявления которых были выявлены на практически синхронных изображениях ASAR Envisat и TM Landsat-5, полученных 23 июня 2011 г. над западной частью Черного моря. Концентрация образующих трубки сликов вдоль почти правильных окружностей позволяет предположить, что первопричиной явления являются инерционные движения. Авторы считают, что источник появления подобной картины связан с существованием периодических полос или комков поверхностно-активных веществ (ПАВ), шлейфы от которых, вовлекаемые в круговое движение, прорисовывают на поверхности моря кольцевые слики. Подобные слики можно связывать с различными квазипериодическими в пространстве неоднородностями в верхнем слое моря – вихрями Лэнгмюра, тонкой структурой струй течений, термическим неоднородностям верхнего слоя и другими т.п. явлениями, не обязательно сопровождающимися хорошо выраженными полосками сликов, но, несомненно, влияющими на уже существующие полосы скопления ПАВ. На основе модели Лебедева В.Л. (Лебедев, 1968), описывающей появление неоднородностей в поле инерционных колебаний, разработана феноменологическая модель, объясняющая вероятную причину образования кольчатых трубок.

Ключевые слова: инерционные колебания, морская поверхность, дистанционное зондирование из космоса, поверхностно активные вещества, Черное море, TM Landsat-5.

Помимо таких хорошо известных процессов, проявляющихся на поверхности моря, как внутренние солитоны (BC) у края шельфа и над подводными порогами, гидрологические фронты и вихри, вихревые дорожки и волны за препятствиями и т. п., на спутниковых изображениях морской поверхности встречаются неоднородности, специфическая форма которых не всегда и не везде объяснима в рамках сложившихся представлений. Один из таких случаев рассматривается в данной статье.

На спутниковых изображениях TM Landsat-5 и ASAR Envisat, полученных с разницей в 9 минут 23 июня 2011 г. над дунайским шельфом Черного моря (*puc. 1, 2*) были обнаружены ранее не встречавшиеся структуры, форма которых напоминала изображения кольчатых червей. Отметим, что на радиолокационном изображении данные структуры проявляются менее отчетливо, что вызвано в первую очередь худшим пространственным разрешением (разрешение в точке ASAR Envisat изображения – 75 м). Рассмотрим фрагмент цветосинтезированного изображения TM Landsat-5, имеющего более высокое по сравнению с радиолокационным изображения TM Landsat-5, имеющего более высокое по сравнению с радиолокационным изображения тМ Landsat-5, имеющего более высокое по сравнению с радиолокационным изображения то в будем называть «кольчатыми трубками» (*puc. 2a*). Точка пересечения двух верхних трубок – 45⁰ 06' 40'' с.ш., 31⁰ 04' 45'' в.д. Трубки обозначены буквами *A*, *B*, *C*, *D* (начиная с севера). В самой длинной 38-ми километровой трубке *B* отчетливо прослеживается почти 40 колец диаметром от 3 до 4 км, вложенных друг в друга со сдвигом около 0,3 км. Происхождение этих загадочных структур не ясно, и наши попытки связать их с антропогенной деятельностью или какими-либо известными естественными процессами в воздухе и воде, оказались безуспешными в силу таких не встречавшихся ранее особенно-



Puc. 1. Положение кадра TM Landsat-5 от 23 июня 2011 г. на карте западной части Черного моря. Звездочкой отмечено место поверхностных проявлений кольчатых трубок

стей, как вытягивание в длинные полосы мало меняющихся по ширине кольцевых организованных повторяющихся структур и т. п. В то же время концентрация образующих трубки сликов вдоль почти правильных окружностей навела нас на мысль, что первопричиной явления являются инерционные движения.

Инерционные колебания, возникающие при исчезновении движущих сил, представляют собой движение частиц по окружностям с радиусом круга инерции R=V/f и периодом T_f , равным с достаточной точностью $T_f=12$ ч/sin(φ), где φ – географическая широта места, V – скорость орбитального течения, а f – параметр Кориолиса. В нашем случае диаметру наиболее хорошо выраженных колец 4 км соответствует скорость $V \approx 0,2$ м/с.

Инерционные колебания в перемешанном верхнем слое моря обычно синфазны по глубине и по горизонтали, имея характер движения в виде вращающегося как единое целое пласта (van der Lee and Umlauf, 2011). Поскольку при этом в охваченной колебаниями области отсутствуют градиенты скорости и, следовательно, вергенции (т.е. ди-и/или кон-вергенции), не действуют и обычные механизмы скопления плавающих на поверхности моря частиц (поверхностно-активных веществ, ПАВ) в местах схождения течений (Gade et al., 2013; Лаврова и др., 2013). При этом трудно представить себе, каким образом инерционные колебания оставляют следы на поверхности моря, не говоря уже о весьма специфической их форме в виде вложенных друг в друга колец (кольчатых трубок).

Объяснение, видимо, следует искать в локализации инерционных колебаний внутри неких областей, на границах которых возможны вергенции. Такие области возникают, в частности, если внутри них существует меняющаяся во времени движущаяся сила (Ekman, 1905; Лебедев, 1968).





Рис. 2. Проявление «кольчатых трубок» на спутниковых изображениях, полученных 23 июня 2011 г.: а) фрагмент (60 км х 40 км) цветосинтезированного изображении TM Landsat-5 (3, 2, 1 каналы); б) фрагмент (72 км х 43 км) ASAR Envisat WSM изображения, полученного на VV-поляризации с разрешением в точке 75 м

Используя приведенные в (Лебедев, 1968) формулы для расчета траектории частицы под совокупным влиянием меняющейся во времени движущей силы и сил инерции, рассмотрим случай, когда движущая сила, пропорциональная ускорению G_y , связана с повышением уровня моря в восточном направлении с наклоном 5·10⁻⁶, уменьшающимся во времени по экспоненте $G_y = A \cdot exp(-a \cdot f \cdot t)$, где a = 0,02, параметр Кориолиса $f = 6,28 \cdot 0,06$ рад/ч, t – время в часах, A = 0,635 км/ч² – ускорение в начальный момент. Впоследствии будет показано, что выбранные параметры в общих чертах соответствуют условиям, существовавшим в районе.

Частица 1, траектория которой изображена сплошной линией на *рис. За*, начинает свое движения вблизи начала координат, перемещаясь сначала в северном направлении (как и изображенная штрихами несколько сдвинутая от нее частица 2) по траектории в виде ци-



Рис. 3. Результаты расчета по модели: (а) траектории двух частиц; (б) кольчатая трубка (точки даны через каждый час); (в) восточная компонента скорости (точками выделены данные, использованные при построении кольчатой трубки)



Рис. 4. Кольцевые движения частицы у границы ее максимального удаления (здесь 110 км) от начала траектории. Точками и стрелками обозначено ежечасное положение частицы. Между 160-ым и 190-ым часами движения (стрелки), частица движется практически по одной и той же окружности с радиусом около 2 км, чему соответствуют орбитальные скорости инерционных колебаний 0,2 м/с



Рис. 5. а) Фрагмент ИК-изображения, полученного 23 июня 2011 г. (NOAA-18); б-в) Изменение уровня поверхности Черного моря по результатам спутниковых альтиметрических измерений (получено на основе алгоритмов CCAR, USA; ©НИЦ "Планета"). Звездочками отмечено место поверхностных проявлений кольчатых трубок

клоид с плоскими вершинами, которые постепенно приобретают форму кривых с петлями во впадинах. Приближаясь к самой северной точке своего распространения по траекториям с уже развившимися вплоть до круговых петлями, частицы меняют генеральное направление на южное, перемещаясь по кривой с острыми вершинами малой амплитуды.

Локализация круговых движений в месте смены генерального направления переноса воды создает условия, при которых возможна визуализация инерционных колебаний. В самом деле, по мере своего продвижения к северу, частицы приносят с собой к зоне смены направления течения все встретившиеся на ее пути скопления ПАВ, под которыми мы будем понимать не только собственно пленки ПАВ, но и агрегации различных плавающих на поверхности моря веществ, участвующих в образовании пленок. Все эти агрегации и пленки аккумулируются здесь из-за конвергенции у северной границы потока из-за его столкновения с покоящимися водами. Представляется вероятным, что касающиеся этой полосы концентрации ПАВ инерционные течения вовлекают в свое движение частицы ПАВ, формируя дугообразные слики на поверхности моря. Подобное вовлечение в круговое движение тем более вероятно, что частицы воды могут проходить по круговым траекториям неоднократно, выхватывая каждый раз все новые агрегации ПАВ из их скопления у зоны конвергенции (*puc. 4*).

Оставаясь в рамках гипотезы проявления локализованных инерционных колебаний за счет вовлечения ПАВ из полос их скоплений, попытаемся объяснить, каким образом образуются кольчатые трубки, т. е. системы периодически вложенных друг в друга кольцевых сликов. Для этого, прежде всего, нужно изучить фоновые условия в районе, как предшествовавшие снимку, так и существовавшие во время его получения (08:33 GMT, 23 июня 2011 г.), когда стояла ясная маловетренная погода.

Согласно спутниковым данным температура поверхности моря в районе колебалась в пределах 24-26°С с наиболее резким возрастанием в полосе шириной около 30 км, вытянутой вдоль меридиана (*puc. 5a*). Подобным образом была расположена и полоса резкого из-



Рис. 6. Фрагмент изображения TM Landsat-5, на котором стрелками указана подходящая к трубке **D** периодическая система из нескольких почти параллельных друг другу сликов с расстоянием между ними около 0,4 км

менения уровня моря, возраставшего с запада на восток (*puc. 56*). Соответствующий этому возрастанию наклон уровня, сглаженный по пространству и осредненный за 3 предшествовавших нашему снимку дня (с 20 по 22 июня), был около 10^{-6} . За последующие трое суток, как это видно из *puc. 56*, этот наклон существенно уменьшился.

В приблизительном соответствии с таким характером пространственно-временных изменений динамических условий в районе были выбраны параметры модели Лебедева, использованные выше при расчете траекторий частиц (см. *рис. 3*). Геострофическое течение считалось направленным на север с начальным значением ускорения A=0,635 км/ч², которому соответствует наклон $5\cdot10^{-6}$ и скорость течения 0,4 м/с, а затухание движущей силы определялось параметром a=0,02. При таких параметрах радиус модельных инерционных колец оказался близким к наблюденному значению. Многосуточная длительность распространения частиц к северному пределу их проникновения, как и протяженность траекторий, могут показаться неприемлемо большими, но искать кажущиеся более правдоподобными значения путем подбора подходящих параметров не имеет смысла, потому что траектории меняются не только под влиянием изменений движущих сил во времени, но и при изменениях в пространстве, учесть которые практически невозможно. Наличие нескольких по-разному расположенных трубок вполне объяснимо различиями в положении траекторий частиц, как это продемонстрировано для случая двух частиц на *рис. 3*.

Возвращаясь к вопросу о механизме возникновения периодичности кольцевых движений, образующих кольчатые трубки, предположим, что источник появления подобной картины связан с существованием периодических полос или комков ПАВ, шлейфы от которых, вовлекаемые в круговое движение, прорисовывают на поверхности моря кольцевые слики.

В этой связи обратим внимание на периодическую систему из нескольких почти параллельных друг другу сликов у южного края трубки *D*, где они получают продолжение в виде дугообразных образований такой же периодичности внутри трубки (*puc. 6*).

Подобные слики можно связывать с различными квазипериодическими в пространстве неоднородностями в верхнем слое моря – вихрями Лэнгмюра, тонкой структурой струй течений (Chashechkin, 2013; Sabinin, 2007; Lavrova et al., 2012), термическим неоднородностям верхнего слоя (Федоров, 1983) и другими т.п. явлениями, не обязательно сопровождающимися хорошо выраженными полосками сликов, но, несомненно, влияющими на уже существующие полосы скопления ПАВ.

В нашем случае хорошо заметны мелкомасштабные квазипериодические искривления очерчивающего границу трубки **D** толстого слика в местах пересечения его с системой сликовых полосок, показанных на *puc*. *6*, а сами первоначально прямолинейные полоски получают свое продолжение в виде дугообразных сликов внутри кольчатой трубки.

Итак, мы предполагаем, что собравшиеся в полосе кольцевых движений за счет конвергенции ПАВ, разбиваются на отдельные агрегации периодической системой вергенций мелкомасштабных течений вдоль этой полосы, и именно эти периодически расположенные агрегации вовлекаются в инерционное движение, «прочерчивая» на поверхности моря кольчатую трубку.

Теперь можно кратко сформулировать предложенное в статье объяснение происхождения кольчатых трубок следующим образом:

1. причиной проявления инерционных движений на поверхности моря в виде колец является их локализация у границы проникновения ослабевающего со временем потока, когда за счет конвергенции у этой границы образуется полоса ПАВ, вовлекаемых в инерционное вращение;

2. причиной образования многих вложенных друг в друга колец является расчленение сплошной граничной полосы ПАВ на отдельные агрегации вергенциями относительно мел-комасштабных течений вдоль этой полосы;

3. причиной периодичности колец в кольчатых трубках является периодичность вергенций в поле мелкомасштабных течений вдоль граничной полосы ПАВ.

В заключение обратим внимание на приблизительно конгруэнтные кольчатым трубкам дугообразные квазипериодические полосы, напоминающие проявление цугов внутренних солитонов на поверхности моря. Представляются, что появление этих цугов связано с кольцевыми движениями частиц у северной границы их проникновения, где они наталкиваются с инерционной периодичностью на лежащую к северу покоящуюся воду, каждый раз излучая цуг солитонов. Самый северный цуг с типичными изломами следов проходивших здесь судов (темные линии) виден наверху *рис. 2*, а самый южный цуг, видимо, только-только зарождался у северной части трубки **D**, проявляясь в виде светлой полосы на ее границе. Расстояние между этими цугами было около 26 км, что при периодичности излучения 17 ч соответствовало скорости распространения цугов около 0,4 м/с – довольно типичному для внутренних солитонов значению при резком и неглубоком пикноклине, свойственном Черному морю в летний период (Лаврова и др., 2011).

Авторы не претендуют на полную обоснованность выдвинутой в статье гипотезы о происхождении кольчатых трубок, в особенности, в части предположения о причинах периодического расчленения сликовой полосы у границы проникновения частиц, но главной целью данной публикации было привлечение внимания исследователей к описанным нами и ранее не встречавшимся странным «узорам» на спутниковых снимках моря.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 14-05-00520.

Литература

- 1. Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Сабинин К.Д. Исследование особенностей генерации и распространения внутренних волн в бесприливных морях по данным спутниковой радиолокации // Доклады Академии Наук, 2011, том 436, № 3, с. 407–411.
- Лаврова О.Ю., Серебряный А.Н., Митягина М.И., Бочарова Т.Ю. Подспутниковые наблюдения мелкомас-2. штабных гидродинамических процессов в северо-восточной части Черного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т.10. № 4. С. 308-322.
- 3. Лебедев В.Л. Среднемасштабные черты структуры геострофического течения // Вестник Московского университета, 1968. №2. С. 36-42.
- 4. Федоров К.Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1983. 296 c.
- 5. Chashechkin Yu. D. The Complex Structure of Wave Fields in Fluids // Procedia IUTAM. 2013. Vol. 8. P. 65-74. (Special Issue: IUTAM 2012 Symposium on Waves in Fluids: Effects of Nonlinearity, Rotation, Stratification and Dissipation).
- Ekman V. W. On the influence of the Earth's rotation on ocean-currents // Arkiv för matematik, astronomi och 6 fysik, Bd. 2. No. 11. 1905.
- 7. Gade, M., V. Byfield, S. Ermakov, O. Lavrova and L. Mitnik. Slicks as Indicators for Marine Processes // Oceanography, 2013. 26(2), P. 138-149.
- 8. Lavrova O., Serebryany A., Bocharova T. and Mityagina M. Investigation of fine spatial structure of currents and submesoscale eddies based on satellite radar data and concurrent acoustic measurements // Proc. SPIE 8532, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2012, 85320L (October 19, 2012); doi:10.1117/12.970482.
- Sabinin K. Divergence and filamentation of the sea currents at the shelf edge // Abstracts. Int. Conf. "Fluxes and Structures in Fluids". St-Petersburg, 2007. P.100-101.
 van der Lee, E. M., and L. Umlauf. Internal wave mixing in the Baltic Sea: Near-inertial waves in the absence of
- tides // J. Geophys. Res., 2011. 116, C10016, doi:10.1029/2011JC007072.

Corrugated-pipe-like structures on satellite images of the sea surface and phenomenological model of their origin

K.D. Sabinin ^{1,2}, O.Yu. Lavrova ²

¹N.N. Andrevev Acoustics Institute, Moscow, Russia *E-mail: ksabinin@yandex.ru* ² Space Research Institute RAS, Moscow, Russia *E-mail: olavrova@iki.rssi.ru*

The article considers peculiar structures whose surface manifestations were identified in the virtually simultaneous images of Envisat ASAR and TM Landsat-5 acquired 23 June 2011 over the Western part of the Black Sea. These corrugated-pipe-like structures are shaped by multiple quasi-regular circular slicks. We suggest that these structures are composed of surfactants involved in circular motion by inertial currents. Such slicks may be related to many spatially quasi-periodic phenomena near the sea surface, such as Langmur vortices, sea current fine structure, thermal inhomogeneities, etc. According to V.L. Lebedev model (Lebedev, 1968), we suppose that these slicks are formed at the border of an inertial-rotated water body in presence of a sea level slope. A phenomenological model explaining the origin of the corrugated-pipe-like structures on the sea surface is proposed.

Keywords: inertial oscillations, sea surface, remote sensing from space, surface-active materials, the Black Sea, TM Landsat-5.

References

- Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Sabinin K.D., Study of Internal Wave Generation and Propagation Features in 1. Non-Tidal Seas Based on Satellite Synthetic Aperture Radar Data, Doklady Earth Sciences, 2011, Vol. 436, Part 1, pp. 165–169.
- Lavrova O.Yu., Serebryany A.N., Mityagina M.I., Bocharova T.Yu., Podsputnikovye nablyudeniya melkomasshtabnyx gidrodinamicheskix processov v severo-vostochnoj chasti Chernogo morya (Subsatellite 2. observations of small-scale hydrodynamic processes in the northeastern Black Sea), Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2013, Vol. 10, No 4, pp. 308-322.
- Lebedev V.L., Srednemasshtabnye cherty struktury geostroficheskogo techeniya (Mesoscale features of the 3. structure of the geostrophic flow), Vestnik moskovskogo universiteta, 1968. No 2, pp. 36-42.
- Fedorov K.N., Fizicheskaya priroda i struktura okeanicheskikh frontov (The physical nature and structure of the 4. oceanic fronts), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983, 296 p.
- Chashechkin Yu. D., The Complex Structure of Wave Fields in Fluids, Procedia IUTAM, 2013, Vol. 8, pp. 65-74. 5. (Special Issue: IUTAM 2012 Symposium on Waves in Fluids: Effects of Nonlinearity, Rotation, Stratification and Dissipation).
- Ekman V.W., On the influence of the Earth's rotation on ocean-currents, Arkiv för matematik, astronomi och fysik, 6.
- Bd. 2, No 11, 1905. Gade, M., V. Byfield, S. Ermakov, O. Lavrova and L. Mitnik, Slicks as Indicators for Marine Processes, 7 *Oceanography*, 2013, 26(2), pp. 138-149. Lavrova O., Serebryany A., Bocharova T. and Mityagina M., Investigation of fine spatial structure of currents
- 8 and submesoscale eddies based on satellite radar data and concurrent acoustic measurements, Proc. SPIE 8532, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2012, 85320L (October 19, 2012), doi:10.1117/12.970482.
- 9. Sabinin K. Divergence and filamentation of the sea currents at the shelf edge, Abstracts. Int. Conf. Fluxes and Structures in Fluids, St-Petersburg, 2007, pp.100-101.
 10. van der Lee, E. M., and L. Umlauf, Internal wave mixing in the Baltic Sea: Near-inertial waves in the absence of
- tides, J. Geophys. Res., 2011, 116, C10016, doi:10.1029/2011JC007072.