Проявления инерционных колебаний на спутниковых изображениях морской поверхности

О.Ю. Лаврова, К.Д. Сабинин

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия E-mails: olavrova@iki.rssi.ru; ksabinin@yandex.ru

Статья посвящена разработке методики выявления инерционных колебаний (ИК) водных слоев на спутниковых изображениях морской поверхности. Поскольку таким колебаниям свойственно реализоваться в виде твердотельного вращения слоев, при котором неоднородности поверхностного слоя переносятся инерционными течениями без изменения конфигурации внутри всей области, охваченной ИК, то одномоментных спутниковых изображений недостаточно, и требуется несколько изображений внутри промежутка времени, равного инерционному периоду. Высказано предположение, что при наличии в поверхностном слое воды трассеров течений, представляющих собой любые плотно упакованные агрегации веществ, оставляющие следы на поверхности моря, ИК будут проявляться на спутниковых изображениях либо в виде круговых сликов, либо в виде шлейфов, окаймляющих границы областей, занятых ИК. Приводятся примеры образования «кольчатых трубок», предположительно сформированных ИК на границах струй субмезомасштабных вихрей.

Высказанная в статье гипотеза подтверждается результатами подспутниковых измерений течений с помощью дрейфующих буев. Сравнение поверхностных проявлений струй течений в субмезомасштабных вихрях, хорошо заметных на радиолокационных изображениях морской поверхности, с данными буйковых измерений показало, что эти струи сопровождаются ИК.

Ключевые слова: инерционные колебания, вихри, трассеры течений, спутниковые изображения, дрейфующие буи

> Одобрена к печати: 11.08.2016 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-60-73

Введение

Играющие исключительно важную роль в жизни океана и повсеместно распространённые инерционные колебания водных слоёв (ИК) имеют особенно большое экологическое и хозяйственное значение в прибрежных акваториях. Вблизи берегов ИК не только переносят примеси и донные осадки и меняют структуру вод, перемещая положение любых неоднородностей, в том числе фронтов речных вод, загрязнителей, биогенов и т.п., но и непосредственно влияют на подводные объекты и сооружения.

Инерционные колебания возникают при изменении действующих сил и представляют собой вращающиеся в горизонтальной плоскости антициклональные течения со скоростью V_{in} , переносящие частицы воды по окружностям с радиусом круга инерции $R_{in} = V_{in}/f$, где f – параметр Кориолиса ($f = 2\Omega \sin \varphi$, где φ – географическая широта места, а $\Omega = 7,292 \times 10^{-5} c^{-1}$ – угловая скорость вращения Земли). В случае сложения ИК с другими видами течений (будем называть их фоновыми течениями) годографы инерционных течений, измеренных в фиксированных относительно Земли координатах, могут существенно отличаться от круговых.

Экспериментальное изучение ИК ведётся давно и достаточно эффективно, но оно опирается, главным образом, на контактные измерения течений в фиксированных точках

и посвящено физике ИК. Основное внимание при этом обращается на роль инерционных волн в перемешивании вод.

Наблюдения с помощью поплавков SOFAR, успешно выполненные в открытом океане в глобальном масштабе и проанализированные в (Elipot et al., 2010), как и измерения течений системами доплеровских локаторов типа CODAR (см., например, Горбацкий и др., 2011) – прекрасные, но требующие специального дорогостоящего оборудования средства.

Хорошую информацию об ИК дают и свободно дрейфующие поплавки – дрифтеры, траектории которых прослеживаются с помощью спутниковых систем позиционирования.

Что же касается непосредственного проявления ИК на спутниковых изображениях, то здесь, насколько нам известно, пока нет никаких сведений, кроме недавней публикации (Сабинин, Лаврова, 2015), в которой сообщается о похожих на инерционные круги и предположительно связанных с ИК кольцевых структурах на синхронных изображениях западной части Чёрного моря, полученных 23 июня 2011 г. с помощью TM Landsat-5 и ASAR Envisat.

В первой части данной статьи анализируются особенности контактных измерений ИК, как средства их изучения и валидации спутниковых наблюдений, возможностям которых посвящена вторая часть.

1. Анализ данных контактных измерений

1.1. Измерения в фиксированных точках

Широко используемые при изучении морских течений измерения в фиксированных точках могут дать неправильные представления об ИК в районах сильной неоднородности течений. Из-за влияния адвективной составляющей в величинах измеренных скоростей – «сдвигового загрязнения», исследованного в (Фомин, 1978; Сабинин, 1976; Бондур и др., 2016), годографы ИК могут менять не только форму, но и знак вращения. Наблюдённая частота вращения может также более или менее значительно отличаться от теоретического её значения, близкого к параметру Кориолиса f (Eliot et al., 2010; Бондур и др., 2013).

На *рис. 1* приведены годографы ИК, измеренные донным акустическим доплеровским профилографом течений (ADCP) в эксперименте на Черноморском шельфе вблизи Геленджика, который проводился с 29 сентября по 11 октября 2009 г. (Бондур и др., 2016).

Как видно из *рис.* 1, наблюдается сильная изменчивость годографов (условимся называть их «орбитами», понимая, что форма орбит ИК совпадает с формой годографов лишь при однородных фоновых течениях). Наибольшие и хорошо развитые, но всё же не круговые, а эллипсоидные орбиты, вытянутые с ССЗ на ЮЮВ, встречаются в трёх местах: вверху – вблизи 40 ч, в слое 18–21 м по глубине – вблизи 70 ч и на глубине 30 м – вблизи 85 ч.

Течения в этих относительно «хороших» орбитах вращаются по солнцу (антициклонально) только вверху, тогда как на промежуточных глубинах 24–25 м и в вытянутых почти по параллели придонных орбитах течения вращаются против солнца. В целом наблюдается изменение знака вращения течений с отрицательного (антициклонического) вращения в верхней половине слоя воды на положительное (т.е. не свойственное ИК) – в нижней половине при повсеместном значительном отклонении формы орбит от круговой.



Рис. 1. Годографы («орбиты») наблюдённых ИК, рассчитанные по 18-часовым отрезкам со сдвигом 8 часов на горизонтах, глубины которых в метрах обозначены на вертикальной оси. Точки соответствуют началам «орбит», время которых обозначено под горизонтальной осью. Толстыми линиями выделены большие орбиты правого (антициклонального) вращения, пунктиром – некоторые хорошо выраженные «орбиты» левого вращения. Центры годографов обозначены крестиками

1.2. Измерения с помощью дрейфующих буев

Изучая морские течения с помощью свободно дрейфующих буев, можно получить ценные данные об ИК. При этом в напоминающем инерционные кольца виде ИК проявляются, только если нет ощутимых фоновых течений. Присутствие последних осложняет ожидаемую кольцеобразную траекторию буев, придавая ей вид циклоиды (эвольвенты) с высотой, равной удвоенному радиусу круга инерции (Лебедев, 1968). При преобладании фонового течения U над инерционным U_{ik} циклоида и/или эвольвента (т.е. перевёрнутая циклоида) сглаживаются и приобретают волнообразный характер, в противоположной ситуации – обостряются и увенчиваются петлями. *Рис.* 2, изображающий траекторию частицы под влиянием ослабевающих инерционных и фоновых течений, даёт представление о различных формах циклоиды при меняющемся соотношении амплитуд ИК (U_{ik}) и фоновых (U) течений. В начале записи, когда это соотношение U_{ik} / U было около единицы, траектория была близка к циклоиде с острыми впадинами, тогда как в конце записи при $U_{ik} > U$ во впадинах появлялись петли. Круги инерции, показанные пунктиром, как и расстояния между вершинами траектории (длины «волн»), уменьшались в соответствии с общим ослаблением течений.



Рис. 2. Траектория частицы при возрастающей роли ИК и общем ослаблении течений (модель)

Похожие на циклоиды траектории свободно дрейфующих буев в маловетренную погоду наблюдаются нередко. Подобные движения наблюдали, например, при проведении дрифтерных экспериментов в Черном море вблизи Геленджика в июне 2014 г. (Сильвестрова и др., 2016). 24 июня 2014 г. были запущены 12 дрифтеров вдоль двух перпендикулярных берегу галсов: в 16:20–16:50 на первом галсе и в 17:25–17:50 на втором. Паруса дрифтеров располагались на глубине 3–4 м. Первоначально все дрифтеры двигались в юго-восточном направлении со скоростью порядка 15 см/с. Ветер был слабый, 2–3 м/с переменного направления. В ночь с 24 на 25 июня траектории 10 из 12 дрифтеров синхронно развернулись в сторону открытого моря, а через 2 часа все траектории вернулись к состоянию, близкому к начальному (*puc. 3*).

Эксперименты с использованием дрейфующих буев осуществлялись также в юговосточной части Балтийского моря в июле—августе 2015 и 2016 годов. В ходе проведения подспутниковых натурных измерений с маломерного судна параметров прибрежных течений с помощью ADCP в 7–10 км от м. Таран (Самбийский полуостров) запускались дрифтеры с парусом на глубине 5 м. В Гданьском заливе и вблизи м. Таран регулярно формируются вихревые структуры, которые имеют свои проявления как на радиолокационных, так и на оптических спутниковых изображениях морской поверхности (Гинзбург и др., 2015; Lavrova et al., 2016). На изображении MODIS Aqua от 8 августа 2015 г. наблюдался вихревой диполь, циклоническая часть которого находилась северо-восточнее м. Таран (*puc. 4a*). Запущенный 2 августа в этом районе дрейфующий буй попал в зону влияния струй данного грибовидного течения. Часть траектории дрифтера имела вид антициклонических петель (*puc. 4б*), что, скорее всего, указывает на ИК струй эволюционирующего вихревого диполя.



Рис. 3. Траектории движения дрейфующих буев в эксперименте 24.06.2014–25.06.2014 (Сильвестрова и др., 2016)

Подобная ситуация наблюдалась и в экспериментах 2016 г. На *рис. 5а* представлен фрагмент изображения MODIS Aqua от 27 июля 2016 г., на котором стрелкой отмечен вихревой диполь, квадрат отмечает положение траектории дрифтера за период 30–31 июля 2016 г. Запущенный 28 июля в районе м. Таран дрифтер был вынесен в Гданьский залив (до 30 июля с ним была потеряна связь), 30–31 июля его траектория представляла собой трохоиду, или, как еще называют такую кривую, удлиненную циклоиду (*рис. 5б*). Исходя из модельных представлений (*рис. 2* и пояснения к нему), выполнялось соотношение для амплитуд ИК (U_{ik}) и фоновых (U) течений: $U_{ik} > U$, когда во впадинах циклоиды появляются петли. Фоновое течение имело направление с северо-востока на юго-запад, судить о влиянии струй вихревого диполя не представляется возможным, поскольку из-за облачной погоды спутниковые изображения видимого диапазона были не информативны.

Некоторое более простое подобие буйковых измерений можно осуществить и с помощью видеокамер, установленных на прибрежных возвышенностях и следящих за плавающими на поверхности предметами в штилевую погоду. Может оправдать себя, в частности, слежение за смещениями сликовых полос (выглаженных участков) на поверхности моря в области гидрологических фронтов, скоплений мусора и т.п. плавающих предметов. Подобные смещения равны по величине диметрам кругов инерции, которые на широте Чёрного моря могут достигать многих километров.



Рис. 4. Инерционные колебания струй эволюционирующего вихревого диполя: (a) проявление вихревого диполя на цветосинтезированном изображении MODIS Aqua от 8 августа 2015 г. и траектория движения дрифтера за период 2–11 августа 2015 г. Красным отмечена часть траектории, попадающая в дни спутниковых наблюдений; (б) увеличенное изображение траектории движения дрифтера. Стрелками отмечено направление движения



Рис. 5. Дрейф буя в зоне влияния вихревого диполя: (a) проявление вихревого диполя (отмечено стрелкой) на цветосинтезированном изображении MODIS Aqua от 27 июля 2016 г.; квадрат отмечает положение траектории дрифтера за период 30–31 июля 2016 г.; (б) увеличенное изображение траектории движения дрифтера. Стрелками отмечено направление движения

2. Спутниковые наблюдения

Как следует из раздела 1, контактные измерения не вполне подходят для мониторинга ИК в прибрежных акваториях, где часто господствуют сильные неоднородные и изменчивые течения. Тем не менее именно здесь мониторинг ИК особенно необходим в интересах экологии и хозяйственной деятельности. Прекрасным, но требующим специального дорогостоящего оборудования средством дистанционного мониторинга ИК в прибрежной зоне являются измерения течений системами береговых доплеровских локаторов типа CODAR (Горбацкий и др., 2011). Учитывая, однако, отсутствие на российских берегах подобных систем, целесообразно обратить основное внимание на спутниковые изображения морской поверхности, на которых хорошо проявляются многие явления и процессы в приповерхностных слоях.

Однако слежение за ИК с помощью спутниковых изображений осложняется свойственной таким колебаниям тенденцией реализоваться в виде твердотельного (т.е. бездивергентного) вращения, при котором неоднородности поверхностного слоя переносятся инерционными течениями без изменения конфигурации внутри всей области, охваченной ИК. Понятно, что одномоментных спутниковых изображений для обнаружения признаков ИК в этом случае уже недостаточно и требуется несколько изображений внутри промежутка времени, равного инерционному периоду.

Тем не менее в сликовых «узорах» на спутниковых изображениях морской поверхности иногда можно заметить кольцевые структуры, подобные кругам инерции, как, например, в случае уникальной и чрезвычайно странной картины в виде многочисленных подобных кругам инерции колец – «кольчатых трубок» (*рис. 6*), приведённой в работе (Сабинин, Лаврова, 2015). В этой работе предполагалось, что ИК локализованы, т.е. инерционным движением охвачена только часть рассматриваемой акватории, а кольцевые структуры связаны с существованием периодических полос поверхностно-активных веществ (ПАВ) или агрегаций плавающих веществ, следы-шлейфы от которых, вовлекаемые в инерционное круговое движение, прорисовывают на поверхности моря кольцевые слики.

И хотя такое проявление сликовых полос уникально, некоторые признаки шлейфов,



Рис. 6. «Кольчатые трубки» на цветосинтезированном изображении TM Landsat-5 от 23 июня 2011 г. (Сабинин, Лаврова, 2015)

окаймляющих хорошо выраженные полосы сликов, которые, возможно, связаны с линиями конвергенций течений, можно обнаружить и на других спутниковых изображениях морской поверхности.

Не вдаваясь в подробности описания предложенного в работе (Сабинин, Лаврова, 2015) механизма проявления на спутниковых снимках кольцевых структур, обратимся к вопросу о том, как вообще на поверхности моря могут сохраняться какие-либо следы

вращающихся инерционных движений, если ИК вращают весь поверхностный слой как единое целое? При этом даже обильно сочащийся маслянистым веществом комок, плавающий на поверхности воды и вращающийся вместе с охваченным ИК слоем, выглядит на одномоментном спутниковом изображении только как отдельное сликовое пятно, если слико-образующее вещество вокруг комка не долговечно. В противном случае истекающее из комка вещество может оставить сликовый след, форма, ширина и интенсивность которого зависит от особенностей эволюции проявления слика на спутниковом изображении.

Здесь мы не можем останавливаться на рассмотрении различных факторов естественного и технического происхождения, определяющих такую эволюцию, и заметим только, что в силу разнообразия этих факторов вид следов ИК на снимках может принимать самые разные, в том числе и кольцеобразные, формы. Краткое описание подобных разнообразных форм и их вид на снимке субмезомасштабного вихря Балтийского моря (Лаврова, Сабинин, 2016) приводятся ниже (см. *рис.* 7).

Если, например, полоса ПАВ тянется вдоль границы, разделяющей области существования и отсутствия ИК, и содержит неоднородности, то на ней появляются небольшие отростки, имеющие вид неких шлейфов-зубцов, сужающихся по мере удаления от границы. На *рис.* 7*a*, где хорошо видны струи течений в субмезомасштабном вихре, можно заметить подобные шлейфы, окаймляющие ближайший к центру вихря длинный спиралеобразный слик (*рис.* 7*б*).

Подобные шлейфы, как и проявление другого вызываемого ИК явления – цуга вну-



Рис. 7. (а) Проявление субмезомасштабного вихря на радиолокационном изображении ERS-2 SAR Гданьского залива Балтийского моря, полученного 23 июня 2011 г. Квадрат отмечает положение фрагмента, представленного на рис. 76, стрелка указывает на полосы вложенных друг в друга мелкомасштабных сликовых дуг; (б) шлейфы-зубцы, окаймляющие спиралеобразный слик (отмечены стрелками)

тренних солитонов, можно заметить на радиолокационном изображении, полученном в северо-восточной части Черного моря вблизи Туапсе 13 июня 2006 г. и подробно описанном в работе (Лаврова и др., 2009). На *рис.* 8 видно, как от филаментов движущегося нестационарного вихря вытягиваются инерционные шлейфы (отмечены стрелками), направление распространения которых совпадает с направлением распространения цуга внутренних волн (на юго-восток). В пользу предположения о генерации этого цуга инерционными движениями вихря говорит конгруэнтность полос сликов в цуге и струях вихря.



Рис. 8. (а) Проявление субмезомасштабного вихря на радиолокационном изображении Envisat ASAR северо-восточной части Черного моря, полученного 13 июня 2006 г. Квадрат отмечает положение фрагмента, представленного на рис. 86, стрелка указывает на полосы вложенных друг в друга мелкомасштабных сликовых дуг; (б) инерционные илейфы, вытягивающиеся от филаментов вихря (отмечены желтыми стрелками), и цуг внутренних волн (отмечен красной стрелкой)

На рис. 7а и 8а обращают на себя внимание и длинные полосы вложенных друг в друга мелкомасштабных сликовых дуг, окаймляющих струи субмезомасштабных вихрей (отмечены белыми стрелками). Подобные структуры регулярно наблюдаются на границах вихрей, проявляющихся на спутниковых изображениях за счет сликового механизма (*рис. 9*).



Рис. 9. Пример проявлений полос вложенных друг в друга мелкомасштабных сликовых дуг (отмечены стрелками) на изображении Landsat-5 ТМ от 03.07.2009, полученном над акваторией в районе дельты Дуная с разрешением 30 м

Как и в описанном в (Сабинин, Лаврова, 2015) случае, эти структуры, возможно, были сформированы ИК на границах сликовых полос, окаймляющих охваченные инерционными движениями области. Продольные квазипериодические неоднородности этих полос, сущес-

твование которых необходимо для расчленения отдельных колец трубки, здесь, возможно, тоже имели место, хотя в рамках изложенного ниже другого возможного механизма прочерчивания подобных сликовых узоров на поверхности моря предположения о такой квазипериодичности не требуется.

Допустим существование в поверхностной плёнке воды трассеров течений, представляющих собой любые плотно упакованные агрегации веществ, оставляющие следы на поверхности моря. Это могут быть скопления частиц нефти, мазута, любые скопления ПАВ, достаточно плотно слепленные воедино комки организмов микропланктона во время цветения воды и т.п. (и даже плавающий на воде мусор). Для краткости будем их называть маслянистые трассеры (МТ). Главным условием использования подобных трассеров для наших целей является их достаточно плотная структура, благодаря чему они переносятся сдвиговым течением как единое или почти единое целое. Более или менее значительная толщина подводной части трассеров обеспечивает заметное отличие их траектории от движения поверхностной плёнки. Предположим также настолько резкое изменение приповерхностных течений с глубиной, по-разному действующих на разные части МТ, что движение последних будет отличаться от движения плёнки. Благодаря этому каждый отдельный МТ прочерчивает свой зависящий от формы масляный (т.е. сликовый) след на поверхности моря, который может проявляться и на однократных спутниковых изображениях акватории.

В предельном случае, когда источник маслянистых ПАВ фиксирован в земных координатах, его след в поверхностной плёнке моря, вращающейся как единое целое мимо такого источника, будет иметь форму инерционных колец.

Какие-то следы прочертятся на поверхности моря и при любом другом движении источника ПАВ относительно поверхностной плёнки воды. Но возникает вопрос, возможно ли существование достаточных вертикальных градиентов течений в слоях, толщина которых сопоставима с размерами МТ? Положительный ответ на этот вопрос может быть найден при рассмотрении формирования ветровых и инерционных течений при слабых ветрах, которые, кстати, господствовали при получении спутниковых изображений, представленных на *рис. 6* и 7. Ветровые течения возникают в виде спирали Экмана, сопровождающейся долгоживущими и быстроменяющимися с глубиной ИК. В маловетреную погоду эти движения практически ламинарны (Шулейкин, 1968) и испытывают требуемые сильные изменения с глубиной в очень тонком приповерхностном слое. Векторы развивающегося ветрового течения приближаются к спирали Экмана медленно, испытывая постепенно проникающие вглубь и быстро слабеющие с глубиной ИК, амплитуда которых при слабых ветрах уменьшается на порядок на расстоянии в несколько миллиметров от морской поверхности.

Вернёмся к движению МТ в условиях резкого изменения приповерхностных течений ИК с глубиной, из-за чего движение трассера отличается от движения поверхностной плёнки воды. Ситуация поясняется *puc. 10*, где изображён след, который прочерчивает увлекаемый слабеющими с глубиной инерционными течениями МТ на поверхности моря. Предполагается, что МТ движется с тангенциальной скоростью 8 см/с, на 20% меньшей, чем поверхностная плёнка моря. Видно, что радиус следа существенно меньше радиуса круга инерции на поверхности моря (синий круг), который на широте, например, Геленджика при скорости 10 см/с близок к 1 км. С уменьшением радиуса вращения МТ радиус его следа приближается к радиусу круга инерции.



Рис. 10. Траектории частиц при инерционном вращении поверхностной плёнки воды (синяя линия) и трассера (красные точки). Предполагается, что тангенциальная скорость частиц поверхности равна 10 см/с, а МТ – 8 см/с. Пунктиром показан след, прочерчиваемый МТ на поверхности моря. Кружочком обозначено начало движения



Рис. 11. Модель движения МТ под влиянием ИК в присутствии слабого однонаправленного потока. Длины даны в у.е. Треугольниками обозначены агрегации ПАВ граничного слика (толстая линия), вовлекаемые в инерционное движение. Начальное положение МТ обозначено чёрным кружком

В присутствии однонаправленного потока испытывающие ИК частицы воды смещаются по траекториям, подобным циклоидам (см. раздел 1.2), причём при сильном превосходстве амплитуд ИК над скоростью потока частицы описывают почти кольцевые петли. На *рис. 11* схематически изображён такой случай движения, когда одна частица с течением времени описывает серию вложенных друг в друга с небольшим смещением почти правильных инерционных колец. Если эта частица – МТ, а амплитуды ИК и потока убывают с глубиной достаточно быстро, то на спутниковом изображении становится заметным сликовый след, подобный «кольчатой трубке» при условии, что источник ПАВ в МТ сохраняется достаточно долго, а сликовый след не слишком быстро растекается по поверхности.

Оставляя пока требующий специального рассмотрения вопрос о растекании сликового следа, обратим внимание на то важное обстоятельство, что при каждом касании МТ сликовой полосы, обычно окаймляющей границу занятой ИК области, частицы ПАВ этой граничной сликовой полосы могут вовлекаться в инерционное движение, подпитывая интенсивность следа. В результате становится возможным формирование «кольчатой трубки» даже и одним МТ, без существования множества периодических неоднородностей в граничном слике, как это требовалось в рамках механизма, предлагавшегося в работе (Сабинин, Лаврова, 2015). В свете вышесказанного может быть объяснена и причина формирования уже упоминавшихся структур в виде изогнутых «кольчатых трубок» (*puc. 7a, 8a, 9*). Эти длинные полосы вложенных друг в друга мелкомасштабных сликовых дуг тоже могут быть следствием прочерчивания колец при движении МТ под совокупным влиянием ИК и струи течения вдоль соответственно изогнутого граничного слика, если только и течение, и ИК резко менялись с глубиной, как это бывает в маловетреную погоду.

Обобщая высказанные выше соображения о возможности проявления ИК на спутниковых изображениях, можем констатировать, что главное условие этого проявления состоит в дифференцированности трассеров по размерам и форме содержащихся в них частиц вблизи границ областей, занятых ИК. При этом, если граница колеблется, то за граничным сликом тянутся шлейфы. В случае стабильности границы между зонами отсутствия и наличия ИК в колеблющейся зоне могут прочерчиваться структуры, подобные «кольчатым трубкам». Заметим также, что по-разному выступающие из воды трассеры, обладая различной «парусностью», по-разному увлекаются ветром, так что в различиях скорости трассеров относительно поверхности воды есть вклад и от ветрового воздействия.

Заключение и выводы

Учитывая, что конечной целью наших исследований ИК является изучение не столько явления ИК как такового, сколько разработка основ для их мониторинга в прибрежных акваториях морей, мы кратко оценили возможности использования различных методов наблюдений ИК для целей такого мониторинга. При анализе данных радиофизического зондирования водной поверхности со спутников были обнаружены проявления ИК на спутниковых изображениях у границ между зонами существования и отсутствия инерционных движений, что открывает новые возможности не только для мониторинга, но и при исследованиях пока ещё плохо изученных ИК в ограниченных областях. Сравнение поверхностных проявлений струй течений в субмезомасштабных вихрях, хорошо заметных на радиолокационных изображениях морской поверхности, с данными буйковых измерений показало, что эти струи сопровождаются ИК.

Поскольку некоторые промежуточные замечания уже были сделаны в различных разделах статьи, мы ограничимся здесь только следующими общими выводами:

- 1. Установлено, что наблюдение колебаний течений в фиксированных точках наименее адекватный метод мониторинга ИК в прибрежных акваториях.
- 2. Обнаружены специфические формы проявления ИК на спутниковых изображениях и исследованы причины появления таких форм.
- Учитывая отсутствие на российских берегах стационарных систем доплеровских локаторов, являющихся оптимальным средством мониторинга ИК, в настоящее время в России целесообразно использовать комбинацию всех иных возможных методов наблюдений, упомянутых в статье.

4. Главное внимание в будущем должно быть уделено поиску проявлений ИК на спутниковых изображениях, поскольку только спутниковый дистанционный мониторинг ИК, если таковой удастся разработать, мог бы быть воплощён в России без излишних затрат сил и средств.

Авторы благодарят коллег, участвующих в проведении подспутниковых экспериментов, в первую очередь Мысленкова С.А. (МГУ им. М.В. Ломоносова), изготовившего дрейфующие буи. Экспедиционные работы и анализ полученных результатов проводились при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант 14-17-00555. Исследование проявлений инерционных колебаний на спутниковых изображениях проводилось при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 14-05-00520.

Литература

- 1. *Бондур В.Г., Сабинин К.Д., Гребенюк Ю.В.* Аномальная изменчивость инерционных колебаний океанских вод на Гавайском шельфе // ДАН. 2013. Т. 450. № 1. С. 100–104.
- Бондур В.Г., Сабинин К.Д., Гребенюк Ю.В. Характеристики инерционных колебаний по данным экспери-2. ментальных измерений течений на российском шельфе Черного моря // Известия РАН, Физика атмосферы и океана. 2016 (в печати).
- Гинзбург А.И., Булычева Е.В., Костяной А.Г., Соловьев Д.М. Вихревая динамика в Юго-Восточной Балтике 3. по данным спутниковой радиолокации // Океанология. 2015. Т. 55. № 6. С. 893–902.
- 4. Горбацкий В.В., Гудошников Ю.П., Нестеров А.В. Измерения течений на морской поверхности доплеровским радаром, установленным на судне // Сборник докладов XXVII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». Санкт-Петербург, 2011.
- 5. Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Сабинин К.Д. Проявление внутренних волн на морской поверхности в северо-восточной части Черного моря // Исследование Земли из космоса. 2009. № 6. С. 49–55. (+2 цветные вкладки)
- *Лаврова О.Ю., Сабинин К.Д.* Проявление тонкой структуры течений на спутниковом радиолокационном изображении Балтийского моря // ДАН. 2016. Т. 467. № 6. С. 713–717. 6.
- Лебедев В.Л. Среднемасштабные черты структуры геострофического течения // Вестник Московского 7. университета. 1968. № 2. С. 36-42.
- Сабинин К.Д. О сдвиговом искажении данных по орбитальным скоростям во внутренних волнах // Океанология. 1976. Т. 16. № 3. С. 397–402. Сабинин К.Д., Лаврова О.Ю. Кольчатые структуры на спутниковых изображениях и вероятная причина 8.
- 9. их образования (феноменологическая модель) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 93–101.
- 10. Сильвестрова К.П., Мысленков С.А., Зацепин А.Г., Краюшкин Е.В., Баранов В.И., Самсонов Т.Е., Куклев С.Б. Возможности использования GPS-дрифтеров для исследования течений на шельфе Черного моря // Океанология. 2016. Т. 56. № 1. С. 159–166.
- 11. Фомин Л.М. Об инерционных колебаниях в горизонтально неоднородном поле скорости течений в океане // Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана. 1978. Т. 9. № 1. С. 147–157.
 12. Шулейкин В.В. Физика моря, 4-е издание. М.: Наука, 1968. 1084 с.
 13. Elipot S., Lumpkin R., Prieto G. Modification of inertial oscillations by the mesoscale eddy field // Journal Geo-
- phys. Res. 2010. No. 115. C09010. DOI:10.1029/2009JC005679.
- 14. Lavrova O., Krayushkin E., Golenko M. Golenko N. Effect of wind and hydrographic conditions on the transport of Vistula Lagoon waters into the Baltic Sea: results of a combined experiment // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2016. Vol. 9. Issue 9. DOI:10.1109/JSTARS.2016.2580602.

Manifestations of inertial oscillations in satellite images of the sea surface

O.Yu. Lavrova, K.D. Sabinin

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia E-mails: olavrova@iki.rssi.ru; ksabinin@yandex.ru

The paper develops a technique for the detection of inertial oscillations (IOs) of water layers in satellite images of the sea surface. These oscillations are typically realized in solid body rotation of layers when the non uniformities of the surface layer are transferred by inertial currents without configuration change within the whole region encompassed by the IO. Therefore, to reveal an IO, a single time satellite image is insufficient, it is necessary to obtain a series of images within the time interval equal to the inertial period. We suggest that if current tracers, represented by any densely packed substance capable to aggregate in zones of convergence, are present at the water surface, IOs will be manifested in satellite images either as circular slicks or plumes hemming the IO boundaries. Examples of corrugated pipe-like structures presumably formed by IOs at stream edges of submesoscale eddies are presented. The hypothesis is supported by the results of concurrent buoy measurements. A comparison of surface manifestations of stream flows of submesoscale eddies, distinctly visible in radar images, with drifting buoy data demonstrated that the streams were accompanied by IOs.

Keywords: inertial oscillations, eddies, current tracers, satellite images, drifting buoys

Accepted: 11.08.2016 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-60-73

References

- Bondur V.G., Sabinin K.D., Grebenvuk Yu.V., Anomalous variation of the ocean's inertial oscillations at the Ha-1. waii shelf, Doklady Earth Sciences, 2013, Vol. 450, Issue 1, pp. 526-530.
- Bondur V.G., Sabinin K.D., Grebenyuk Yu.V., Kharakteristiki inertsionnykh kolebanii po dannym eksperimen-2 tal'nykh izmerenii techenii na rossiiskom shel'fe Chernogo morya (Characteristics of inertial oscillations according to experimental measurements of currents in the Russian Black Sea shelf), Izvestiya RAN, FAO, 2016 (in print).
- Ginzburg A.I., Bulycheva E.V., Kostianoy A.G., Solovyov D.M., Vortex dynamics in the southeastern Baltic Sea from satellite radar data, *Oceanology*, 2015, Vol. 55, No. 6, pp. 805–813. Gorbatskii V.V., Gudoshnikov Yu.P., Nesterov A.V., Izmereniya techenii na morskoi poverkhnosti doplerovskim 3.
- 4. radarom, ustanovlennym na sudne (Measurements of sea surface currents by the Doppler radar installed on board of the vessel), Sbornik dokladov XXVII Vserossiiskogo simpoziuma "Radiolokatsionnoe issledovanie prirodnykh *sred*" (Proc. XXVII Symp."Radar Investigation of Natural Media"), Saint-Petersburg, 2011. Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Sabinin K. D., Proyavlenie vnutrennikh voln na morskoi poverkhnosti v severo-
- 5. vostochnoi chasti Chernogo moray (Manifestations of internal waves on the sea surface in North-Eastern part of the Black Sea), Issledovanie Zemli iz kosmosa, 2009, No. 6, pp. 49-55.
- Lavrova O. Yu., Sabinin K. D., Fine spatial structure of flows on satellite radar image of the Baltic Sea, Doklady 6. *Earth Sciences*, 2016, Volume 467, Issue 2, pp. 427–431. Lebedev V.L., Srednemasshtabnye cherty struktury geostroficheskogo techeniya (Medium-sized structure of a
- 7. geostrophic flow features), Vestnik Moskovskogo universiteta, 1968, No. 2, pp. 36-42.
- Sabinin K.D., O sdvigovom iskazhenii dannykh po orbital'nym skorostyam vo vnutrennikh volnakh (On the shear 8 distortion of data on the orbital velocities of internal waves), Okeanologiya, 1976, Vol. 16, No. 3, pp. 397-402.
- 9 Sabinin K.D., Lavrova O.Yu., Kol'chatye struktury na sputnikovykh izobrazheniyakh i veroyatnaya prichina ikh obrazovaniya (fenomenologicheskaya model') (Corrugated-pipe-like structures on satellite images of the sea surface and phenomenological model of their origin), Sovrementy problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2015, Vol. 12, No. 1, pp. 93-101.
- Silvestrova K.P., Myslenkov S.A., Zatsepin A.G., Krayushkin E.V., Baranov V.I., Samsonov T.E., Kuklev S.B., GPS-drifters for study of water dynamics in the Black Sea shelf zone, *Oceanology*. 2016, Volume 56, Issue 1, pp. 150-156.
- 11. Fomin L.M., Ob inertsionnykh kolebaniyakh v gorizontal'no neodnorodnom pole skorosti techenii v okeane (On inertial oscillations in a horizontally inhomogeneous field flow velocity in the ocean), Izv. AN SSSR, Fizika *atmosfery i okeana*, 1978, Vol. 9, No. 1. pp. 147–157. 12. Shuleikin V.V., *Fizika morya* (Sea physics), 4-th Edition, Moscow: Nauka, 1968. 1084 p.

- Blatenin V.V., Fizha morya (Sea physics), Full Eanton, Mosclow Fuldada, 1966, 1661-p.
 Elipot S., Lumpkin R., Prieto G., Modification of inertial oscillations by the mesoscale eddy field, *Journal Geophys. Res.*, 2010, No. 115, C09010. DOI:10.1029/2009JC005679.
 Lavrova O., Krayushkin E., Golenko M., Golenko N., Effect of wind and hydrographic conditions on the transport of Vistula Lagoon waters into the Baltic Sea: results of a combined experiment, *IEEE Journal of Selected Topics*. in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, Vol. 9, Issue 9. DOI:10.1109/JSTARS.2016.2580602.