

Д.Н.Елкин, А.Г.Зацепин

*Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, г.Москва***ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ОБРАЗОВАНИЯ СУБМЕЗОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕЙ НА ШЕЛЬФЕ ЧЕРНОГО МОРЯ**

Проведено лабораторное исследование механизма образования вихрей на шельфе в результате сдвиговой неустойчивости при обтекании течением препятствия в виде мыса с крутым обводом и при пространственно-неоднородном ветровом воздействии. Эксперименты проводились на вращающейся платформе в цилиндрическом или квадратном бассейне, заполненном жидкостью. Установлены условия вихреобразования. Полученные результаты успешно сопоставлены с данными натурных наблюдений, полученными в экспедициях 2009 – 2011 гг. в прибрежной зоне г.Геленджика.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *Черное море, субмезомасштабные вихри, лабораторное моделирование*

В практику экологического мониторинга прибрежной (шельфовой) зоны северо-восточной части Черного моря в недавнем прошлом был внедрен новый инструментально-методический подход, обеспечивающий высокое пространственно-временное разрешение в измерении поля течений. Важным результатом использования этого подхода явилось частое обнаружение субмезомасштабных (диаметром 2 – 10 км) интенсивных вихрей, как циклонического, так и антициклонического знака вращения. По-видимому, эти вихри играют важную роль в кросшельфовом водообмене и в диссипации энергии крупномасштабных течений. Существуют три возможных механизма вихреобразования.

Первый механизм – сдвиговая неустойчивость вдольберегового течения: при северо-западном вдольбереговом течении (Основное Черноморское течение) на шельфе доминируют антициклонические вихри, а при юго-восточном направлении (антициклонические мезомасштабные вихри) на шельфе – циклонические вихри. Эксперименты проводились в цилиндрическом бассейне радиусом 30 см или 27 см и толщиной водного слоя 6 см, расположенном на вращающейся платформе. Период вращения платформы составлял 5 или 10 с (параметр Кориолиса  $f = 2,5$  или  $1,25 \text{ с}^{-1}$  соответственно). Для создания сдвигового течения вблизи стенки бассейна в его центральной части параллельно дну размещался диск радиусом 24 см. Диск приводился в дифференциальное вращение относительно бассейна с помощью мотора постоянного тока с регулируемой скоростью вращения. При вращении диска в направлении вращения платформы над ним формировалось циклоническое течение, а вблизи стенки – область горизонтального антициклонического сдвига скорости. При вращении диска в направлении, противоположном вращению платформы, над ним формировалось антициклоническое течение, а вблизи стенки – область горизонтального циклонического сдвига. Частота вращения диска от опыта к опыту изменялась в

достаточно широких пределах, для того чтобы исследовать закономерности вихреобразования не только в зависимости от знака, но и от величины сдвига скорости.

Второй механизм – периодическое образование вихрей за мысами вследствие отрыва потока при наличии интенсивного прибрежного течения. Эксперименты проводились в том же цилиндрическом бассейне, в котором исследовалась сдвиговая неустойчивость. Бассейн был заполнен однородной жидкостью, толщина слоя около 5 см. У стенки бассейна было сконструировано препятствие в виде мыса с крутым обводом толщиной 5 см. В начале каждого эксперимента жидкость в бассейне раскручивали до состояния твердотельного вращения. Для создания течения частоту вращения платформы  $\Omega_1$  уменьшали до  $\Omega_2$ . В результате сформировалось циклоническое течение со скоростью  $V_{max} = (\Omega_1 - \Omega_2) \cdot R_0$ . Это течение затухало со временем за счет трения жидкости об дно. Однако времени было достаточно, чтобы наблюдать периодическое вихреобразование.

Третий механизм – пространственно-неоднородное ветровое воздействие. Прибрежная зона Черного моря окружена холмами или горными массивами, в которых имеются долины. Ветер, направленный с берега на море, в долинах более сильный и распространяется над морем в виде воздушных струй, проникающих на значительное расстояние от берега (10 км и более). Наличие долинных ветровых струй, разделяемых областями с более слабыми ветрами, приводит к возникновению вихрей в прибрежной зоне моря. Было проведено две серии опытов в бассейнах разной формы и размера. Первая серия экспериментов проводилась в цилиндрическом бассейне диаметром 60 см и высотой 8 см, расположенном на вращающейся платформе и заполненном водой. Использовалась как однородная по плотности вода, так и двухслойная по солености и плотности. Для создания стратификации бассейн изначально наполнялся слоем воды толщиной 5 см и соленостью 20 ‰. Затем, когда нижний слой был раскручен до состояния твердотельного вращения с угловой частотой  $\Omega$ , поверх него из дополнительного источника аккуратно наливался слой пресной воды толщиной 2 см. Это позволяло минимизировать перемешивание между слоями. Возле стенки бассейна по кругу размещались четыре воздуходувки, три из которых располагались под углом к радиусу бассейна и использовались для генерации прибрежного кольцевого течения. Четвертая воздуходувка была направлена по радиусу к центру бассейна и использовалась для создания нормальной к берегу воздушной струи. Другая серия опытов была проведена в квадратном бассейне шириной 70 см с той же высотой. В этой серии опытов нормально к одной из стенок бассейна устанавливались 2 воздуходувки на расстоянии  $L$  друг от друга, которое изменялось от опыта к опыту ( $L = 20; 30$  и  $40$  см). Для того чтобы уменьшить влияние противоположной стенки на результаты опытов, приблизительно треть поверхности воды вблизи нее закрывалась пластиной оргстекла. Для сравнения с результатами предыдущей серии некоторые опыты проводились с одной воздуходувкой, расположенной посередине задней стенки. Опыты проводились без вращения и с вращением платформы с периодами 15; 10 или 5 с (параметр Кориолиса  $f = 2\Omega = 0,8; 1,25$  или  $2,5 \text{ с}^{-1}$  соответственно). Скорость ветра  $v$  на расстоянии 5 см от сопла меня-

лась в диапазоне от 2 до 8 м/с, а на расстоянии 15 см от сопла – от 1 до 5 м/с. При этом скорость индуцированного ветром течения  $U$  менялась в диапазоне от 2 до 10 см/с. Каждый опыт регистрировался с помощью видеокамеры, расположенной на вращающейся платформе сверху.

**Результаты экспериментов по исследованию вихреобразования вследствие сдвиговой неустойчивости.** В опытах, где вдольбереговое течение было циклоническим, а сдвиг скорости между берегом и стрежнем течения – антициклоническим, антициклонические пристеночные вихри формировались только при относительно небольших значениях сдвига скорости течения, когда  $-0,5 > Ro_s > -1,5$ , где  $Ro_s = -\omega R_1 / fd$  – число Россби,  $d = R_1 - R_0$  – ширина зазора между диском и стенкой бассейна. При больших значениях сдвига скорости, когда  $Ro_s < -1,5$ , течение в зазоре между краем диска и стенкой бассейна было хаотически турбулентным, когерентных вихревых структур не наблюдалось. В опытах, где течение было антициклоническим, а сдвиг – циклоническим, пристеночные вихри формировались при значениях сдвига скорости  $0,5 < Ro_s < 5$  (рис.1, а). Результат соответствует с результатами теоретического анализа сдвиговой неустойчивости во вращающейся жидкости. При  $Ro_s > 5$  течение в зазоре между краем диска и стенкой бассейна было турбулентным. С увеличением числа Россби количество вихрей уменьшается, а размер увеличивается (рис.2, а). Эти вихри образовывали цепочку и располагались примерно на одинаковом расстоянии друг от друга. Они двигались вдоль стенки бассейна в направлении вращения диска, но со скоростью меньшей, чем линейная скорость вращения его края [1].

Следует также отметить, что цепочки субмезомасштабных циклонических вихрей на периферии мезомасштабного антициклона в северо-восточ-

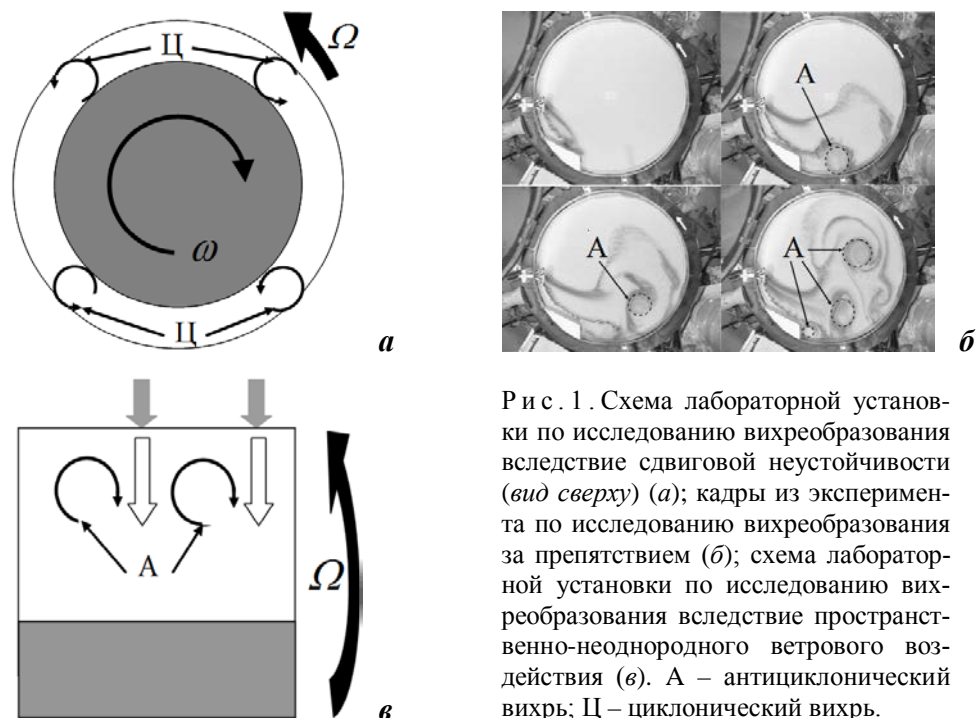


Рис. 1. Схема лабораторной установки по исследованию вихреобразования вследствие сдвиговой неустойчивости (вид сверху) (а); кадры из эксперимента по исследованию вихреобразования за препятствием (б); схема лабораторной установки по исследованию вихреобразования вследствие пространственно-неоднородного ветрового воздействия (в). А – антициклонический вихрь; Ц – циклонический вихрь.

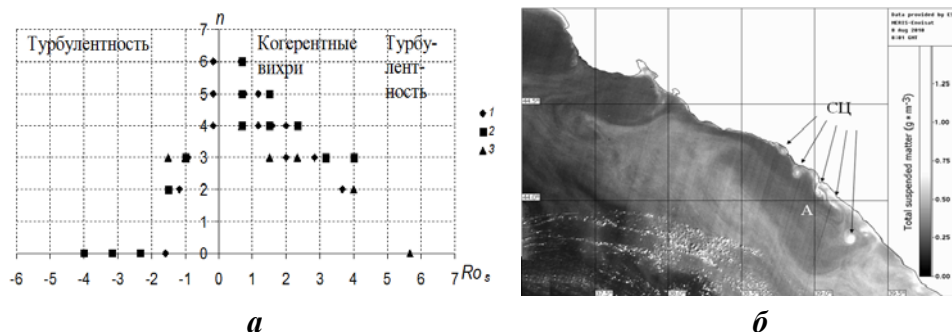


Рис. 2. Диаграмма режимов вдольберегового течения в зависимости от значения  $Ro_s$ , как для циклонического, так и для антициклонического сдвига скорости:  $f = 2,5 \text{ c}^{-1}$ ,  $d = 6 \text{ см}$  (1);  $f = 1,25 \text{ c}^{-1}$ ,  $d = 6 \text{ см}$  (2);  $f = 2,5 \text{ c}^{-1}$ ,  $d = 3 \text{ см}$  (3). По оси ординат отложено число  $n$  – количество наблюдавшихся вихрей (а); субмезомасштабные циклоны (СЦ) на периферии мезомасштабного антициклона (А) в северо-восточной части Черного моря (спутниковый снимок *MERIS-Envisat* от 8 августа 2010 г., концентрация взвешенного вещества) (б).

ной части Черного моря неоднократно наблюдались на спутниковых снимках *MERIS-Envisat* (рис.2, б). В северо-восточной части Черного моря образуется антициклонический вихрь, возникает сдвиговая неустойчивость, образуются циклонические вихри.

**Результаты экспериментов по исследованию вихреобразования за препятствием.** Антициклонические вихри периодически формировались за препятствием только в случае затухающего циклонического течения. После формирования вихрь двигался вниз по течению, направлялся в центр бассейна и на месте его образования формировался новый вихрь. В течение времени затухания формировались 3 – 4 вихря (рис.1, б) [2]. Безразмерная частота вихреобразования – число Струхалия  $St = D/VT$  ( $D$  – толщина препятствия,  $V$  – значение прибрежной скорости течения,  $T$  – период вихреобразо-

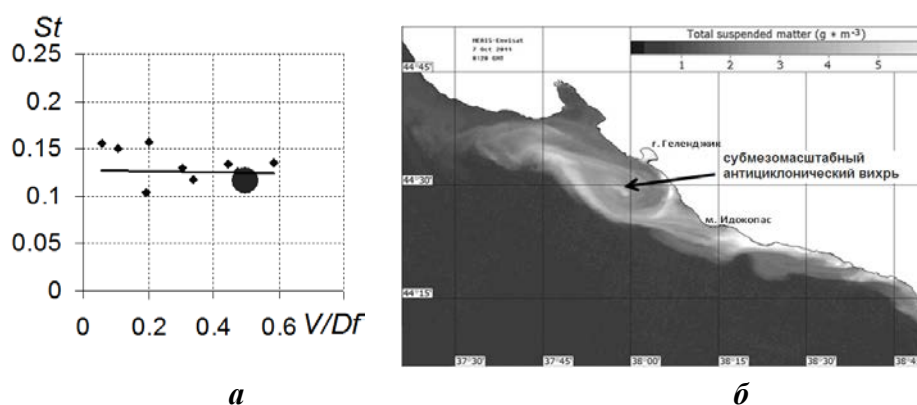


Рис. 3. Зависимость безразмерной частоты вихреобразования (число Струхалия) за препятствием в случае затухания циклонического вдольберегового течения от  $V/Df$  (● – наблюдения в Черном море; ◆ – лабораторные эксперименты; — – линия тренда (а); субмезомасштабный антициклонический вихрь за м.Идокопас на спутниковом снимке *MERIS-Envisat* от 7 октября 2011 г., 07:52, концентрация взвешенного вещества) (б).

вания). На рис.3, а представлена зависимость числа Струхаля для лабораторных экспериментов и наблюдений в прибрежной зоне г.Геленджика. Субмезомасштабные антициклонические вихри за м.Идокопас в прибрежной области северо-восточной части Черного моря неоднократно наблюдались на спутниковых снимках *MERIS-Envisat* (рис.3, б).

**Результаты экспериментов по исследованию вихреобразования вследствие пространственно-неоднородного ветрового воздействия.** В отсутствие вращения платформы воздействие одиночной воздушной струи на изначально покоящуюся жидкость приводило к формированию симметричной дипольной вихревой структуры в водной среде. При наличии вращения платформы воздушная струя также порождала в жидкости между ними дипольную вихревую структуру. Но эта структура была асимметричной: в области с антициклонической завихренностью формировался компактный антициклонический вихрь. При значении  $U/f < 0,3R$  ядро вихря имело радиус  $R_e = U/f$ , где  $R$  – радиус бассейна. При значении  $U/f > 0,3R$   $R_e = 0,3R$ . В циклонической части диполя компактных вихрей не наблюдалось. При наличии интенсивного прибрежного кольцевого течения во вращающейся жидкости воздействие воздушной струи не приводило к вихреобразованию. Однако при угасании этого течения длительное воздействие воздушной струи все же приводило к формированию дипольной вихревой структуры. При этом формировался примерно такой же компактный вихрь, как и без прибрежного течения. В экспериментах с двухслойной жидкостью (с вращением или без вращения) наблюдались те же течения, какие в экспериментах с однородной жидкостью, но в однородной жидкости течения быстрее затухали, чем в двухслойной жидкости. В квадратном бассейне при наличии двух воздуходувок безразмерный параметр расстояния между воздуходувками  $Lf/U$  варьировался в диапазоне от 1 до 100. Если  $Lf/U \leq 5$ , то компактные вихри не наблюдаются. Если  $Lf/U > 5$ , то наблюдаются компактные вихри, радиус которых  $R_e = U/f$ . В области с циклонической завихренностью компактных вихрей не наблюдалось (рис.1, в) [3].

Обнаруженная асимметрия в образовании циклонических и антициклонических вихрей при воздействии одной или нескольких воздушных струй на вращающуюся жидкость имеет определенные натурные подтверждения. Прибрежная зона Черного моря окружена холмами или горными массивами, в которых имеются долины. Ветер в долинах более сильный и распространяется над морем в виде воздушных струй, проникающих на значительное расстояние от берега (10 км и более). Над поверхностью воды несколько струй ветра, они направлены параллельно. В результате образуются вихри, в том случае, когда расстояние между долинами большое или скорость течения реки маленькая. Однако для более определенных выводов о реализации данного механизма в реальных морских условиях необходимы дальнейшие целенаправленные наблюдения.

Работа выполнялась в рамках соглашения № 14.604.21.0044 с Министерством образования и науки РФ, Программы 23 РАН, проекта РНФ 14-17-00382, а также грантов РФФИ № 13-05-41450 и 14-05-00159.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Елкин Д.Н., Зацепин А.Г.* Лабораторное исследование механизма сдвиговой неустойчивости морского вдольберегового течения // *Океанология.*– 2014.– т.54, № 5.– С.614-621.
2. *Елкин Д.Н., Зацепин А.Г.* Лабораторное исследование механизма периодического вихреобразования за мысами в прибрежной зоне моря // *Океанология.*– 2013.– Т.53, № 1.– С.29-41.
3. *Elkin D.N., Zatsepin A.G., Kremenetskiy V.V., Nizov S.S.* Laboratory study of the generation mechanism of coastal eddies in the Black Sea due to the spatially non-uniform wind impact // *Fluxes and structures in fluids. Selected Conference Papers.*– 2010.– P.117-121.

Материал поступил в редакцию 12.02.2016 г.  
После доработки 31.08.2016 г.

D.N.Elkin, A.G.Zatsepin

#### **LABORATORY STUDY OF THE MECHANISM OF SUBMESOSCALE VORTICES FORMATION ON THE BLACK SEA SHELF**

A laboratory study of the mechanism of vortices formation on the shelf as a result of shear instability in case the flow of obstacle like a cape with steep bypass and spatially nonuniform wind influence is carried out. A rotating platform in a cylindrical or square basin filled with liquid is used in the experiments. The conditions for vortex formation are determined. The results are successfully compared with in situ data obtained in the cruises near the coastal zone in Gelendzhik in 2009 – 2011.

**KEYWORDS:** *the Black Sea, submesoscale vortices, laboratory simulation*