



Лабораторное исследование влияния подводного хребта на перемещение антициклонических вихрей над наклонным дном во вращающейся жидкости под действием топографического бета-эффекта¹

Елкин Д.Н., Зацепин А.Г.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

При наблюдениях за эволюцией «Севастопольского» антициклонического вихря в Черном море, перемещающимся вдоль изобат над континентальным склоном в юго-западном направлении было обнаружено, что движение вихря замедляется в области подводного хребта, образованного локальным поднятием батиметрии между двумя каньонами — палеоруслом Дуная и палеоруслом Западного Днепра. В связи с этим была поставлена задача лабораторного экспериментального исследования влияния подводного хребта расположенного на наклонном дне и направленного вдоль склона на антициклонические вихри, перемещающиеся вдоль изобат за счет топографического бета-эффекта [1, 2].

Эксперимент производился в цилиндрическом бассейне сделанном из оргстекла и размещенном в центре вращающейся против часовой

стрелки, платформе, в который был вставлен вписанный конус вершиной вверх (Рис. 1). Угол между образующей конуса и горизонталью составлял 15° . Бассейн заполнялся однородной по плотности водой, пресной, или с определенной соленостью, не более 4 %. Уровень слоя жидкости в бассейне был таков, что вершина конуса находилась под поверхностью воды. Антициклонические вихри создавались с помощью локального источника постоянного расхода воды той же плотности (солености), что в бассейне — баротропные вихри, или, меньшей плотности (солености) — бароклинные вихри. Этот источник представлял собой вертикальную трубку, конец которой располагался на поверхности водного слоя на расстоянии половины радиуса бассейна от его центра. Он снабжался водой из закрепленной на стойке платформы объемной бюретки, заполненной пресной водой, подкрашенной красителем в ярко синий цвет. Половина опытов проводилась над гладким конусом, а другая половина — при наличии хребта, закрепленного на поверхности конуса вдоль его образующей. Хребет представлял собой правильную треугольную призму. Он располагался на расстоянии от источника, приблизительно равном радиусу бассейна в антициклони-

¹Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 21-77-10052 и в рамках темы госзадания FMWE-2021-0002.

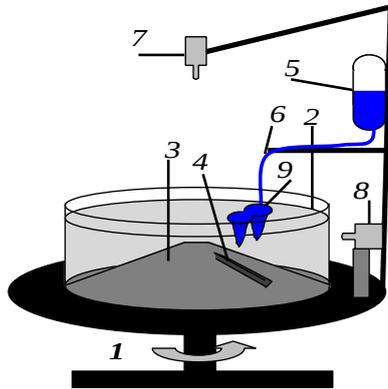


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – циклонически вращающаяся платформа; 2 – цилиндрический бассейн из оргстекла; 3 – усеченный конус; 4 – барьер; 5 – объемная бюретка с краном; 6 – трубка; 7 – видеокамера сверху; 8 – видеокамера сбоку; 9 – вытекающая из источника вода и образующиеся под ним антициклонические вихри

ческом направлении и его высота по отношению к общей глубине слоя воды в области распространения вихрей составляла 0.1–0.2. Таким образом, хребет представлял собой небольшое препятствие, приблизительно подобное своему черноморскому аналогу. Для видеозаписи эксперимента сверху, на платформе располагалась верхняя видеокамера, а для видеозаписи сбоку – боковая видеокамера.

Когда вода в бассейне раскручивалась до состояния твердотельного вращения, включались видеокамеры, и источник, через который пресная вода с квазипостоянным расходом поступала на поверхность воды. Вследствие этого под источником образовывались антициклонические вихри, которые в баротропном случае достигали дна, а в бароклинном заканчивались на некоторой глубине, образуя антициклоническую приповерхностную плотностную линзу. В этом случае, из-за закона сохранения потенциального вихря, под линзой формировалась антициклоническая вихревая колонка, достигавшая дна. Вследствие топографического бета-эффекта баротропные и бароклинные вихри, образующиеся под источником перемещались над конусом в «западном» — антициклоническом направлении. По поверхности водного слоя рассыпались мелкие бумажные пелетки, видеосъемка которых позволяла определить скорость орбитального вращения воды в вихрях.

После каждого опыта, на основе обработки данных видеосъемки, определялись следующие параметры вихревого течения: трансляционная скорость распространения вихрей от источника в ан-

тициклоническом направлении; максимальная орбитальная скорость вращения воды в вихрях; радиус вихрей (по расстоянию от центра вихря до орбиты максимальной скорости) и выявлялось влияние хребта на параметры вихревого течения.

На Рис. 2 а)–г) и 2 д)–з) представлены кадры видеосъемки распространения вихревого течения в антициклоническом направлении над конусом без хребта и с хребтом, соответственно. Хребт сильно замедляет распространение вихревого течения и способствует ослаблению индивидуальных вихрей. Расчеты показали, что при пересечении хребта азимутальная скорость вихревого течения уменьшается в два раза и более. Наиболее сильное замедление течения происходит в случае баротропных вихревых колонок. Плотностная стратификация несколько ослабляет действие топографического бета-эффекта, но не подавляет его полно-

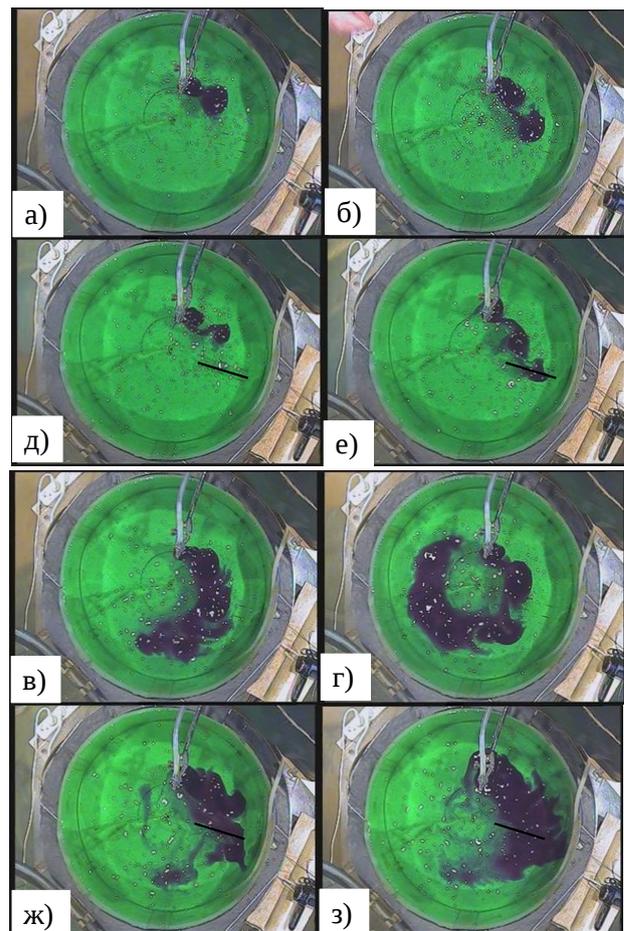


Рис. 2. Вид сверху. Опыт без хребта: а) 12 лаб. сут.; б) 18 лаб. сут.; в) 42 лаб. сут.; г) 66 лаб. сут. Опыт с хребтом: д) 12 лаб. сут.; е) 18 лаб. сут.; ж) 42 лаб. сут.; з) 66 лаб. сут. Соленость воды в бассейне $S = 1 \%$

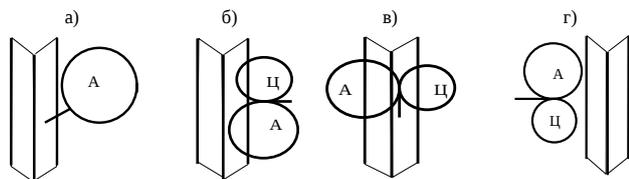


Рис. 3. Схема прохождения антициклонического вихря над хребтом (пояснение в тексте)

стью. Хребет уменьшает глубину проникновения бароклинного вихревого течения и уменьшает величину орбитальной скорости вихрей.

Схема прохождения антициклонического вихря над хребтом показана на Рис. 3. Рис. 3 а) отображает момент времени, когда вихрь (обозначен буквой «А») подходит вплотную к хребту. Стремясь перемещаться вдоль изобаты, заполняя на хребте, антициклонический вихрь смещается вниз по склону. При этом выше него образуется циклонический вихрь (обозначен буквой «С») меньшего диаметра (Рис. 3 б)). Данная вихревая пара имеет тенденцию к перемещению в циклоническом направлении, поэтому перемещение антициклона в антициклоническом направлении замедляется. Поскольку антициклон является более крупным и мощным вих-

рем, по сравнению с циклоном, он «прокручивает» последний вокруг себя (Рис. 3 в)). В конце концов, оба вихря пересекают хребет (Рис. 3 г)). Вскоре после этого циклон диссипирует, а антициклон в ослабленном виде продолжает перемещаться в антициклоническом направлении за счет топографического бета-эффекта.

В целом, результаты эксперимента подтвердили натурные наблюдения, а также результаты численного моделирования [3] свидетельствующие о влиянии вдольсклонового подводного хребта, расположенного в западной части Черного моря на процесс распространения и орбитальную скорость «Севастопольского» антициклонического вихря.

Список литературы

- [1] Зацепин А.Г., Дидковский В.Л. Об одном механизме формирования мезомасштабных вихревых структур в склоновой зоне океана // ДАН, 1996. Т. 347(1). С. 109–112.
- [2] Зацепин А.Г., Дидковский В.Л., Семенов А.В. Автоколебательный механизм формирования периодической вихревой структуры от стационарного локального источника на наклонном дне во вращающейся жидкости // Океанология. 1998. Т. 37(1).
- [3] Kubryakov A.A., Mazyuk A.I., Stanichny S.V. Stationarity and separation of the Sevastopol eddies in the Black Sea: the role of eddy-topographic interaction and submesoscale dynamics // Journal of Marine Systems. 2023. V. 241. P. 103911.