

ОТЗЫВ
официального оппонента
доктора физико-математических наук Жмура Владимира
Владимировича
на диссертационную работу Вергелеса Сергея Сергеевича
«Генерация когерентных течений регулярными и хаотическими
источниками», представленной на соискание учёной степени доктора
физико-математических наук
по специальности 1.3.3 – Теоретическая физика

Самое крупное достижение в физической океанологии прошлого столетия – это открытие мезомасштабных вихрей океана. В то время такие вихри еще называли океанскими синоптическими вихрями по аналогии с циклонами и антициклонами в атмосфере. Открытие было сделано в 1970 в Атлантическом океане советскими учеными, название экспедиции – Полигон-70. Это событие во всей мировой науке об океанах послужило “спусковым крючком” для последующих теоретических, лабораторных и натурных исследований подобных вихрей и значительно продвинуло понимание глобальных физических процессов в океане и обогатило соответствующий раздел геофизической гидродинамики. Данная диссертация также является теоретическим продолжением этого научного движения.

Целью данной диссертации является построение и развитие теории взаимодействия вихревых структур с волнами, в частности: 1) построение теории, описывающей возбуждение приповерхностных вихрей поверхностными волнами в условиях покрытия поверхности жидкости тонкой жидкой плёнкой; 2) построение теории поддержания мелкомасштабным турбулентным течением когерентного геострофического вихревого течения; 3) теоретическое исследование статистики перемешивания скалярного поля случайным гладким потоком с сильной постоянной сдвиговой компонентой и теоретическое развитие методов измерения статистики поля скорости по наблюдаемой статистике перемешивания скалярного поля.

Структура диссертации.

Первая глава посвящена построению теории возбуждения приповерхностных вихрей поверхностными волнами в условиях покрытия поверхности жидкости тонкой жидкой плёнкой. Первые четыре положения, вынесенные на защиту, относятся именно к результатам первой главы. Плёнка

в диссертации описывается как бесконечно тонкая двумерная идеальная жидкость, имеющая конечный модуль сжимаемости. Линейная теория поверхностных волн в присутствии таких плёнок была разработана давно, однако автору диссертации пришлось дополнительно выписать величину завихренности, которая затем путём действия нелинейности перерабатывается в вертикальную завихренность медленного течения. Эффект генерации вихревых течений является квадратичным по амплитуде волн. Сначала автором диссертации приводится общее выражение для поля скорости вихревого течения. Это выражение, однако, достаточно сложное. и, чтобы прояснить его физический смысл, включая геометрические характеристики, автором рассматриваются частные варианты волнового течения. Первым вариантом является две ортогональные стоячие или бегущие волны, что экспериментально относительно легко реализуемо в бассейне прямоугольной формы. Построенная автором теория предсказывает, что влияние плёнки усиливает амплитуду течения в корень из добротности волновых колебаний на чистой поверхности. Приведённое в диссертации сравнение с экспериментальными данными весьма хорошо подтверждает это предсказание. Далее рассмотрен случай распространения волн под малым углом друг к другу. Показано, что в этом случае происходит дополнительное усиление амплитуды сгенерированного волнами вихревого течения, обратно пропорционально величине угла. Из научной литературы известно, что такая конфигурация волнового течения может быть реализована в экспериментальных условиях, так что это предсказание также представляет интерес с практической точной зрения.

Во **Второй главе** содержится первая часть исследования механизмов существования долгоживущих геострофических вихрей, поддерживаемых поглощением инерционных волн. Детально рассмотрена линейная динамика волн на фоне геострофического течения. В коротковолновом приближении рассмотрено распространение волны на фоне аксиально-симметричного геострофического вихря, течение которого локально в этом пределе моделируется как сдвиговое с однородным в пространстве градиентом. Показано, что в пределе малого числа Россби, когда сила сдвигового течения мала по сравнению со скоростью вращения жидкости, при распространении волны сохраняется её волновое действие, что является общим свойством волновым систем в движущихся средах. При непрерывном возбуждении волн некоторым источником рассчитана компонента тензора Рейнольдса, входящая в уравнение не среднее течения. Удельная энергия волнового движения, однако, оказывается формально расходящейся величиной, если не учитывать

действия вязкости. Вязкость, таким образом, обеспечивает необратимость поглощения волн течением. Далее, рассмотрено распространение инерционных волн в цилиндрической геометрии в том же коротковолновом пределе. Этот анализ является в определённом смысле более физически наглядным. Он позволяет продемонстрировать, как сходящиеся цилиндрические волны распространяются на фоне аксиально-симметричного геострофического вихревого течения, отражаясь и поглощаясь им.

В Третьей главе изучаются радиальные профили среднего течения в долгоживущих вихрях в зависимости от контрольных безразмерных параметров течения и граничных условий. Таким образом, вторая и третья главы посвящены изучению условий существования вихрей и выявлению роли инерционных колебаний в поддержании вихрей. Сначала рассмотрен наиболее простой предел, который может быть реализован только в численном моделировании: отсутствие границ течения и малое число Россби. Возбуждение инерционных волн производится модельным источником равномерно о всему объёму. В этом случае аналитически получен линейно-логарифмический профиль. Число Россби, однако, не должно быть слишком малым, снизу оно ограничено определённым образом безразмерной длиной волны возбуждаемых волн. Далее рассматривается случай конечного по величине числа Россби. В этом случае полностью аналитическое рассмотрение динамики волн провести не удаётся, так что величина тензора Рейнольдса автором находится численно как функция двух параметров – числа Россби и безразмерной вязкости. В результате решения уравнения Рейнольдса на средний профиль показано, что максимум скорости в циклонах смещён к центру по сравнению с линейно-логарифмическим профилем, тогда как в антициклонах это смещение происходит в обратную сторону – от центра. Далее рассмотрено влияние горизонтальных границ на структуру геострофических долгоживущих вихрей. Вблизи этих границ образуется пограничный вязкий слой Экмана, влияние которого приводит к возникновению эффективного члена в виде “трения о дно” в уравнении Навье-Стокса на геострофическое течение. На больших расстояниях именно трение о дно определяет структуру геострофических вихрей. Проведено качественное сравнение с экспериментом, подтверждающее качественный критерий на условие поглощения волн геострофическим течением: фазовая скорость волн должна быть меньше, чем скорость геострофического течения. Последним пунктом в 3-й главе является исследование динамики аксиально-симметричных медленных возмущений в геострофическом вихре в предположении, что главным источником течения является мелко-

масштабное геострофическое течение. Показано, что в этом случае эти возмущения распространяются как волны, если трение о дно доминирует над объёмной вязкостью.

В Четвертой главе развита теория, устанавливающая связь между корреляционными функциями скаляра и размешивающего его гладкого в пространстве и хаотического во времени поля скорости, в том числе, имеющего сильную постоянную сдвиговую компоненту. Мотивация этого рассмотрения, с одной стороны, состоит в том, что это есть скалярный вариант задачи о распространении инерционных волн на фоне геострофического течения. Задача о скаляре технически более проста, однако вследствие схожести структуры векторного и скалярного уравнений результат рассмотрения скалярной задачи даёт возможность распространить качественные оценки на векторную задачу. С другой стороны, следует отметить, что, поскольку под скаляром могут пониматься, например, поле температуры или концентрация примеси, задача о скаляре представляет и самостоятельный интерес. Сначала автором рассмотрено перемешивание скаляра в статистически изотропной случае, где для распадной задачи ему удалось связать между собой пространственную зависимость разноточечных корреляционных функций со статистикой ляпуновских экспонент течения. Далее рассмотрено перемешивание скаляра в сдвиговом течении со слабой случайной гладкой компонентой. Показано, как эта задача может быть качественно сведена к уже рассмотренной статистически изотропной модели. Получены выражения для одноточечных моментов скаляра.

Научная новизна: Все результаты, выносимые на защиту, являются новыми. В частности, впервые исследовано влияние поверхностной плёнки на генерацию поверхностными волнами вихревых течений, взаимное влияние ансамбля инерционных волн и среднего геострофического вихревого течения, а также связь разноточечных корреляционных функций пассивного скаляра со статистикой градиента поля скорости. Работа имеет теоретический характер, что, в частности, должно позволить в будущем распространить и обобщить её результаты на более сложные течения.

На мой взгляд самым значительным результатом работы является вывод о роли инерционных волн в жизни геострофических вихрей. Как впервые показал автор вихри энергетически подпитываются за счет захвата инерционных колебаний. Следует отметить, что инерционные волны являются собственными колебаниями гидродинамической системы, поэтому существуют в любой точке Мирового океана. В энергетических спектрах

реального океана на частоте инерционных колебаний всегда присутствует сильный энергетический всплеск, зачастую сравнимый с энергией приливных движений. Как показал автор – геострофические вихри захватывают инерционные волны и, следовательно, поглощают их энергию. Отметим, что сильные геострофические вихри живут очень долго – до 2-3 лет, за это время они пересекают океан по широте, по размерам такой как Атлантический океан. Вопрос об источнике энергии, об их энергетической подпитке возник еще очень давно. Главным источником энергии вихрей считалась подпитка от бароклинной неустойчивости крупномасштабных течений, при которой доступная потенциальная энергия течения преобразуется в кинетическую энергию вихря. Автор диссертации предложил еще один реальный механизм энергетической подпитки вихрей. Жизнь и дальнейшие исследования покажут значимость этого эффекта. Возможно, он окажется главным.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 13 печатных изданиях, все издания являются журналами, рекомендованными ВАК.

Замечания

Замечание №1. В диссертации не освещен вопрос о вертикальной компоненте скорости, наличие или отсутствие которой заметно влияет на все рассматриваемые в диссертации явления. Особенно это важно для мезомасштабных вихрей, где вертикальная скорость участвует в формировании лагранжевого инварианта – потенциальной завихренности вихревого ядра.

Замечание-вопрос №2. На мой взгляд недостаточно детально изложен вопрос о том, влияют ли захваченные инерционные волны на момент количества движения вихря и, если да, то как. Чем отличаются циклоны и антициклоны при таком захвате. Возможна ли ситуация погашения момента количества движения вихря инерционными волнами?

Замечание №3. Автор в качестве результатов, выносимых на защиту, фактически представил основные выводы по диссертации в количестве 12 пунктов. Это очень много. Достаточно двух-трех, чтобы решить главный вопрос – достоин ли соискатель степени доктора наук. Их бы и следовало формулировать.

Замечание-вопрос №4. В главе 4 недостаточно полно сформулированы физические ограничения, которые могут не позволить наблюдать в эксперименте или численном счёте полученное автором диссертации

соответствие между разноточечными корреляционными функциями и функцией распределения экспонент Ляпунова. Каковы эти ограничения?

Эти замечания не снижают достоинств диссертации. Диссертация выполнена на высоком научном уровне и отвечает требованиям ВАК. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Все результаты диссертационной работы опубликованы в открытой печати в журналах, входящих в перечень ВАК. Результаты доложены на большом количестве конференций международного уровня. Я поддерживаю представленную работу и даю ей высокую положительную оценку.

Итак, могу с уверенностью констатировать, что докторская диссертация Вергелеса С.С. представляет собой законченное научное исследование, которое соответствует всем критериям, установленным в части II Положения о порядке присуждения учёных степеней № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 25.01.2024), а её автор, Вергелес Сергей Сергеевич заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3 – Теоретическая физика.

Главный научный сотрудник, руководитель
лаборатории морских течений ИО РАН
чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор

Владимир Владимирович Жмур

28 апреля 2025 г.

117997, г. Москва, Нахимовский пр., д.36,
тел: +7(499)124-63-83 e-mail: zhmur-vladimir@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, 117997, г. Москва, Нахимовский проспект, д.36, тел: +7 (499) 124-61-47, сайт: <https://ocean.ru/>, e-mail: office@ocean.ru