

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
Институт водных проблем Российской
академии наук
(ИВП РАН)
119333 г. Москва, ул. Губкина, 3
тел.: 8-499-135-54-56
E-mail: iwapr@iwp.ru
<http://www.iwp.ru/>
ОКПО 02698884, ОГРН 1027739512305
ИНН/КПП 7701003690/773601001

“Утверждаю”

Директор ИВП РАН,
д. ф.-м. н. А. Н. Гельфан

09 июля 2019 г.

22.07.2019 № 13202-2171/207
на № _____ от _____ г.



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Е.А. Рыжова “Динамика квазигеострофических вихрей при наличии сдвиговых потоков и топографических преград”, представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.28 – Океанология

Диссертационная работа Е.А. Рыжова посвящена исследованию квазигеострофической динамики вихрей с учетом влияния рельефа дна, кривизны береговой черты и внешних сдвиговых потоков. Полученные автором результаты, безусловно, представляют важное теоретическое и прикладное значение.

Объем диссертации из 6 глав составляет 222 страницы, включая 90 рисунков и список литературы из 597 наименований.

Во **введении** дается обоснование актуальности темы, избранной автором, формулируюся цели работы, научная новизна; отмечаются основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов; указываются методология и методы исследования; фиксируется личный вклад автора в совместных публикациях; описываются структура и объем диссертации.

Первая глава является обзорной. В ней приводится обзор лагранжевых методов (экспериментальных и теоретических) исследования влияния когерентных вихревых структур на процессы перемешивания в океане; изучается структура полей скорости с помощью данных спутниковой альtimетрии и с использованием вихреразрешающих моделей. Здесь же дается обзор последних работ, в которых рассматриваются модели переноса и перемешивания жидких частиц вихрями, волнами и струйными течениями.

Вторая глава посвящена описанию процесса переноса жидких частиц в модельных средах, учитывающих кусочно-постоянное распределение топографических возмущений. Анализ вспомогательной спектральной задачи и последующее численного решения с привлечением метода инвариантного погружения позволили построить модель тороидального трехмерного топографического вихря, образующегося над осесимметричной мезомасштабной цилиндрической возвышенностью во вращающейся вязкой жидкости.

В третьей главе рассматривается класс задач о взаимодействии монопольных и дипольных вихрей с изолированной подводной возвышенностью. Параграф **3.1** посвящен анализу движения жидких частиц в поле скорости, индуцированном одиночным (циклоническим или антициклоническим) дискретным вихрем, локализованном в верхнем или среднем слое трехслойной вращающейся жидкости, в поле сингулярного топографического возвышения дна в вертикально однородном стационарном внешнем потоке. Определяются области захвата вихря топографией и эффективность регулярного и хаотического перемешивания жидких частиц. Далее, задача обобщается на случай малой периодической добавки к скорости внешнего потока. Показано, что нестационарность потока допускает появление хаотических траекторий вихря. В параграфе **3.2** рассматривается поведение самодвижущейся пары дискретных вихрей в окрестности сингулярной возвышенности в однородной жидкости. В случае симметричного начального расположения, когда сохраняется угловой момент, выделяются области слабого и существенного рассеяния вихрей в зависимости от первоначального расположения вихрей пары. Если начальная конфигурация несимметрична, угловой момент не является инвариантом, и возникают возможности формирования ограниченных (в частности, периодических) режимов. В параграфе **3.3** подробно изучается процесс перемешивания жидких частиц в окрестности пары, взаимодействующей с возвышенностью. Показано, что если при взаимодействии диполя с возвышенностью он через некоторое время покидает ее окрестность, то одна часть жидких частиц может оставаться захваченной, а вторая уносится вместе с удаляющейся парой. В параграфе **3.4** рассматривается задача о взаимодействии распределенной двухслойной пары (хетона) с цилиндрическим возвышением дна. В отличие от пары вихрей в однородной жидкости, хетон с «вертикальной» осью не является сингулярным. Поэтому здесь проведено исследование топографического воздействие как на движущуюся пару, так и первоначально неподвижную.

В **четвертой главе** исследуется динамика дискретных вихрей в окрестности твердых вертикальных границ. В параграфе 4.1 дается обобщение классической задачи Фёпplя об устойчивости симметричного волнового следа в невязком потоке за цилиндром. Дан исчерпывающий анализ режимов регулярной и хаотической адвекции жидких частиц под совместным воздействием вихревой пары и цилиндра. Эти результаты имеют важное прикладное значение в плане понимания процессов смешения водных масс при обтекании островов. Параграф 4.2 посвящен решению задачи о движении вихря в пульсирующем прямолинейном вдольбереговом потоке при наличии выемки в форме кругового сектора. Рассматриваются случаи попутного и встречного течений по отношению к собственному движению вихря, индуцируемому его взаимодействием с твердой границей. Получены критерии существования регулярных (в частности, периодических) и нерегулярных режимов. Возможны очевидные приложения этих результатов в задачах о вихревых движениях в окрестности открытых и частично замкнутых бухт на побережьях окраинных морей.

В **пятой главе** изучаются свойства движения двух вихрей, помещенных во внешний деформационный поток, определяемый, в первом приближении, как суперпозиция сдвиговой и вращательной компонент для случая баротропной жидкости. В параграфе 5.1 отдельно изучается поведение центра завихренности вихревой структуры. Показано, что движения могут носить как финитный, так и инфинитный характер. В частности, получены условия существования линейного параметрического резонанса. В параграфе 5.2 эти выводы обобщаются на случай произвольного числа вихрей в слоисто стратифицированной жидкости. Параграф 5.3 посвящен исследованию поведения двух точечных вихрей произвольных интенсивностей под воздействием стационарного деформационного потока. Дан качественный анализ возможных типов движения вихрей и изучено распределение частот вращения для локализованных режимов одного из вихрей (характеристики движения второго вихря аналогичны). В параграфе 5.4 получены параметры параметрической неустойчивости в окрестностях эллиптических точек фазового портрета. В параграфах 5.5 и 5.6 проведен подробный анализ свойств адвекции жидких частиц в окрестности двух вихрей, помещенных в стационарное и нестационарное деформационное внешнее поле соответственно. В первом случае получен любопытный результат, показывающий, что хаотизация становится более эффективной при существенном преобладании вращения над сдвигом. Во втором случае показана возможность параметрической неустойчивости при условии, что компоненты сдвига и вращения внешнего потока имеют разные амплитуды гармонических возмущений. Параграф 5.7 посвящен

исследованию эффекта глобальной хаотизации движения жидких частиц в системе двух точечных вихрей, помещенных в нижний слой двухслойной жидкости, подверженной воздействию баротропного стационарного деформационного потока. В отличие от предыдущего случая, здесь сингулярности кинематического поля сосредоточены только в нижнем слое. Это обстоятельство приводит к тому, что зоны возникновения резонансов отодвигаются от сепаратрис фазовой плоскости, что, в свою очередь, обеспечивает условия реализации механизма эффективной (глобальной) хаотизации. В параграфе 5.8 изучается процесс хаотизации движения жидких частиц в вихревой атмосфере вихревой пары среднего слоя в рамках трехслойной модели. Деформационный поток является нестационарным, но по-прежнему вертикально однородным. Получено выражение для средней скорости, как функции параметров возмущенного внешнего потока.

Шестая глава посвящена результатам исследований динамики эллиптических и эллипсоидальных вихрей с постоянной потенциальной завихренностью в баротропном и линейно-стратифицированном бароклинном деформационных потоках. В параграфе 6.1 показано, что при малых периодических возмущениях внешнего потока устойчивость эллиптического вихря в окрестности эллиптической точки фазовой плоскости зависит только от сдвига фонового потока и не зависит от возмущений его вращательной составляющей. Получены области параметрической неустойчивости эллипса, в которых вихрь вытягивается таким образом, что преодолевается критическое (для устойчивости) значение отношения его полуосей. В параграфе 6.2 изучается совместное влияние механизмов хаотического и горизонтального диффузионного переноса и перемешивания жидких частиц в окрестности эллипсоидального вихря. Показано, что обмен жидкими частицами между ядром вихря и окружающей жидкостью происходит неравномерно по пространству, а преимущественно вдоль оси сдвига. Учет вертикальной составляющей диффузионного переноса в параграфе 6.3 дает неожиданный результат, показывающий сопоставимость влияния горизонтальной и вертикальной компонент.

В **Заключении** приводятся основные результаты работы, выносимые на защиту.

В целом, диссертация представляет собой научный труд, вносящий крупный вклад в теорию вихревых и адvectionных процессов в геофизической гидродинамике. Основные результаты имеют очевидные перспективы приложения к задачам океанологии. Иллюстрационные материалы наглядны и в достаточной мере отражают основные результаты.

Укажем **замечания** по работе:

1. Два замечания, касающиеся ошибочности следующих утверждений в водных частях диссертации и автореферата:
 - 1а. «Известно, что изолированные монопольные вихревые структуры, находящиеся в однородном потоке с ровным дном, не перемещаются в пространстве». Это утверждение справедливо только для осесимметричных монопольных вихрей. В общем случае изолированный монопольный вихрь может обладать свойством самодвижения.
 - 1б. «Окрестности топографически-захваченных вихрей известны своей высокой биопродуктивностью, так как наличие практически стационарной замкнутой рециркуляции увеличивает концентрацию био- и зоопланктона». Это неверно. Само по себе наличие стационарных замкнутых вихревых структур не может увеличить концентрацию взвеси в поверхностных слоях. В увеличении содержания био- и зоопланктона основную роль играют индуцируемые донной топографией вертикальные движения, приносящие вещество из продуктивных глубинных горизонтов. Полагаем, что термин «рециркуляция» здесь и в других местах диссертации следует понимать как просто «циркуляция».
2. В начале первой главы приводится фраза: «Основная тема настоящей работы – изучение взаимодействия изолированных вихрей между собой...». Вообще говоря, следовало бы объяснить, что имеется в виду под понятием «изолированный вихрь», которое не является общепринятым. По-видимому, речь идет о гауссовых когерентных вихревых структурах. С другой стороны, рассматриваемые во второй главе вихри с постоянным горизонтальным распределением потенциальной завихренности никак не могут быть отнесены к разряду изолированных. Позднее, в третьей главе, говорится об изолированной подводной возвышенности, что вполне понятно и логично.
3. В главе 2 указывается, что интегральное представление азимутальной скорости (2.1) должно удовлетворять примитивным уравнениям для вращающейся вязкой жидкости, но при этом перечисляется ряд вводимых ограничений модели. Получающиеся при этих допущениях уравнения (2.6), очевидно, не являются примитивными.
4. В заголовке параграфа 3.1 говорится о «трехслойном потоке при наличии плоского внешнего потока». В действительности речь идет не о плоском, а вертикально однородном внешнем потоке в трехслойной жидкости.

5. В пояснениях к уравнению (5.4) необходимо добавить условие $\alpha \neq \beta$, а к уравнениям (5.31) и (5.46) условия $i \neq j$.
6. На стр. 96, где анализируются решения уравнения Хилла, говорится, что «пара вихрей движется в ограниченной области при произвольных значениях интенсивностей». Очевидно, что под «парой вихрей» здесь имеются в виду просто два вихря, для которых, кстати, исключен случай выполнения условия «пары», поскольку обычно «парой вихрей» называют структуру из двух вихрей противоположных знаков с нулевой суммарной интенсивностью.
7. Параграф 5.2 выпадает из структуры главы 5, поскольку в нем рассматривается случай произвольного числа вихрей, тогда как глава называется «Динамика двух точечных вихрей и жидких частиц в их окрестности в постоянном или переменном сдвиговом потоке». С другой стороны, уравнения (5.31) этого параграфа было бы полезно привести в водной части главы, добавив комментарий, что уравнения адвекции жидких частиц получаются из них при условии равенства нулю интенсивностей всех вихрей кроме двух выделенных.
8. Недостатки диссертации в целом: (а) в заключительных частях каждой из глав отсутствуют сводки основных результатов данного раздела, что способствовало бы лучшему пониманию вклада автора в решении рассматриваемых задач; (б) к сожалению, текст диссертации написан очень небрежно, он изобилует большим количеством грамматических, стилистических, смысловых и пунктуационных ошибок.
9. Недостатки автореферата: в нем приводится цитирование только авторских работ, и полностью отсутствуют какие-либо ссылки на работы других авторов.

Приведенные замечания носят в основном редакционный характер и никак не отражаются на положительной оценке работы.

Диссертация соответствует Положению о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842 (ред. от 01.10.2018). Она является квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как **научное достижение**. Содержание диссертации соответствует пункту паспорта специальности 25.00.28: «Главная задача океанологии – выявление физических, химических, биологических и иных процессов, определяющих состояние и изменчивость Мирового океана, построение моделей этих процессов с целью прогнозирования эволюции его состояния, выработки практических

рекомендаций в области экономического использования пространств и ресурсов Мирового океана и сохранения его природных условий».

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и отражает ее основные выводы. Результаты прошли всестороннюю апробацию на многочисленных Российских и Международных конференциях и симпозиумах. Результаты опубликованы в 34 статьях в рецензируемых журналах. Своими работами Е.А. Рыжов уже заслужил высокий международный авторитет.

Полученные результаты могут быть использованы в научных разработках Института океанологии РАН, Института физики атмосферы РАН, Института водных проблем РАН, Института прикладной физики РАН, Морского гидрофизического института РАН.

Считаем, что данная работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАКом к докторским диссертациям, а ее автор, Евгений Андреевич Рыжов, безусловно, заслуживает присвоения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.28 – океанология.

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании Ученого совета ИВП РАН 09 июля 2019 г. Протокол № 5 от 09.07.2019 г.

Заведующий Лабораторией гидродинамики,
д. ф.-м. н., профессор, специальность 25.00.28 -оceanология

Адрес: 119333, Москва, ул. Губкина, 3, Институт водных проблем РАН
Служ. тел. (499): 87833756, доб. 235, моб. тел. +79161595135,
e-mail: zyryanov@iwp.ru

 В.Н. Зырянов

Главный научный сотрудник, д. ф.-м. н., специальность 25.00.28 -оceanология
Адрес: 119333, Москва, ул. Губкина, 3, Институт водных проблем РАН
Служ. тел. (499): 87833756, доб. 225, моб. тел. +79263785783,
e-mail: sokolovskiy@iwp.ru

 М.А. Соколовский