

**Сведения**  
об официальном оппоненте

Фамилия, имя, отчество	Зацепин Андрей Георгиевич
Гражданство	РФ
Ученая степень	Доктор наук
Отрасль науки	Физико-математические науки
Специальность	25.00.28 – океанология
Ученое звание	Доцент
Должность	Главный научный сотрудник
Место работы	Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН
Организационно-правовая форма	ФГБУН
Структурное подразделение	Лаборатория экспериментальной физики океана
Адрес электронной почты	zatsepin@ocean.ru
Телефон	8-499-124-63-92

**СПИСОК**

опубликованных работ в рецензируемых научных изданиях  
официального оппонента по защите диссертации Огородникова Леона Леонтьевича  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему:  
«Статистические свойства когерентных вихревых и волновых турбулентных течений»,  
по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

№	Название публикации	Тип	Соавторы	Выходные данные	Перечень ВАК
1	«Предварительные результаты лабораторных исследований эволюции нефронтальных вихрей в двуслойной вращающейся жидкости»	Научная статья	Зацепин А.Г., Елкин Д.Н., Шварцман Д.Р.	Океанологические исследования, 2023. Т. 51. № 1. С. 5-35	Да
2	Automated tethered profiler for hydrophysical and bio-optical measurements in the black sea carbon observation site	Научная статья	Ostrovskii A.G., Kochetov O.Y., Kremenetskiy V.V., Shvoev D.A., Volkov S.V., Zatsepin A.G., Olchev A.V., Emelianov M.V., Korovchinsky N.M., Olshanskiy V.M.	Journal of Marine Science and Engineering, 2022. Т. 10. № 3.	Scopus
3	Опыт одновременных измерений параметров течения и гидрологической структуры вод с борта	Научная статья	Куклев С.Б., Зацепин А.Г., Пака В.Т., Баранов В.И., Куклева О.Н., Подымов О.И., Подуфалов А.П., Корж А.О., Кондрашов А.А.,	Океанология. 2021. Т. 61. № 1. С. 147-155.	Да

	движущегося судна		Соловьев Д.М.		
4	Thermohaline anomalies and fronts in the Black Sea and their relationship with the vertical fine structure	Научная статья	Zatsepin A.G., Podymov O.I.	Oceanology. 2021. Т. 61. № 6. С. 757-768	Да
5	Study of the effects of Ekman dynamics in the bottom boundary layer on the Black Sea continental slope	Научная статья	Zatsepin A.G., Kremenetskiy V.V., Podymov O.I., Ostrovskii A.G.	Russian Journal of Earth Sciences. 2020. Т. 20. № 1. С. ES1005.	Да
6	Seasonal and interannual variability of vertical turbulent exchange coefficient in the Black Sea pycnocline in 2013–2016 and its relation to variability of mean kinetic energy of surface currents	Научная статья	Podymov O., Zatsepin A., Ostrovskii A., Kubryakov A.	Ocean Dynamics. 2020. Т. 70. № 2. С. 199-211.	Scopus
7	Variability of the thickness of the mixed layer in the Black Sea and its relationship with water dynamics and atmospheric effects	Научная статья	Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Belokopytov V.N., Zatsepin A.G., Piotukh V.B.	Physical Oceanography. 2019. Т. 35. № 5. С. 233.	Да
8	Пространственно-временная изменчивость инерционных течений в восточной части Черного моря в штормовой период	Научная статья	Дианский Н.А., Фомин В.В., Григорьев А.В., Чаплыгин А.В., Зацепин А.Г.	Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35. № 2 (206). С. 147-159.	Да
9	Physical mechanisms of submesoscale eddies generation: evidences from laboratory modeling and satellite data in the	Научная статья	Zatsepin A., Kubryakov A., Elkin D., Kukleva O., Aleskerova A.	Ocean Dynamics. 2019. Т. 69. № 2. С. 253-266.	Scopus

	Black Sea				
10	Изменчивость толщины перемешанного слоя в Черном море и её связь с динамическим и атмосферным воздействием	Научная статья	Кубряков А.А., Белокопытов В.Н., Зацепин А.Г., Станичный С.В., Пиотух В.Б.	Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 5. С. 449–468.	Да

д.ф.-м.н., г.н.с.

*Зацепин*

Зацепин Андрей Георгиевич  
20 августа 2023 г.

Зам. ученого секретаря ФГБУН Институт океанологии имени П.П. Ширшова Российской академии наук (ИО РАН) 117997, Российская Федерация, Москва, Нахимовский проспект, дом 36, тел. (499)124-59-92, [outgoing@sendrecurring.com](mailto:outgoing@sendrecurring.com)  
к.ф.н.

*Артемяева*

Артемяева Мария Александровна

**Верно:**

Зав. канцелярией ИО РАН



## ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Огородникова Л.Л.

«Статистические свойства когерентных вихревых и волновых турбулентных течений» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности

1.3.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника

Квазигеострофические вихревые структуры (синоптические, или мезомасштабные вихри) являются одним из основных элементов динамики океана и атмосферы. Они определяют изменчивость течений и ветров на пространственных масштабах порядка бароклинного радиуса деформации Кибеля-Россби и определяют «погоду», как в атмосфере, так и в океане. Поскольку за время их существования, включенные в них частицы, совершают, как минимум, несколько оборотов вокруг вихревого центра, эти вихри логично отнести к разряду когерентных.

Проблемы формирования и длительного существования синоптических вихревых структур в атмосфере и в океане еще далеки от полного физического понимания и, тем более, от математического описания. Очевидно, что они, некоторым образом, связаны с взаимодействием относительно крупномасштабных сдвиговых течений и более мелкомасштабных турбулентных пульсаций, всегда присутствующих в движущихся воздушной и водной средах. Важной особенностью динамики сдвиговых течений и турбулентности в геофизических средах является то, что они испытывают на себе влияние вращения Земли и плотностной стратификации и имеют сложную трехмерную структуру. Соответственно, турбулентные пульсации, за исключением самых мелкомасштабных, не являются изотропными и не описываются в рамках Колмогоровской теории турбулентности. Теории турбулентности во вращающейся и стратифицированной жидкости до сих пор еще не создано.

В данной диссертации теоретически исследуются когерентные вихревые течения в быстро вращающейся однородной жидкости. При этом особое внимание уделяется воздействию турбулентных пульсаций на структуру и динамику вихрей. В предлагаемой постановке эти пульсации возбуждаются модельной случайной силой (которая, в том числе, может иметь конвективную природу), передающей течению конечную мощность. В работе используется статистический подход, с использованием которого вычисляются корреляционные и структурные функции поля турбулентности. Модель, используемая для описания когерентных вихрей с турбулентностью, может быть распространена на

синоптические вихри в атмосфере и в океане, а также на некоторые технологические процессы, происходящие во вращающейся жидкой среде. Этим, в значительной степени, обусловлены актуальность и прикладная значимость данного исследования.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений. Полный объем диссертации 172 страницы текста с 15 рисунками. Список литературы содержит 155 цитируемых публикаций.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационного исследования, приводится общая характеристика работы, формулируются ее цель и решаемые задачи, поясняются её научная новизна, теоретическая и практическая значимость, обосновывается достоверность полученных результатов и указывается личный вклад автора в работу. Приводятся научные положения, выдвигаемые на защиту.

В первой главе содержится литературный обзор по теме научного исследования. Обсуждаются различные режимы течения: от ламинарного до турбулентного вихревого течения в невращающейся и во вращающейся жидкости. Приводятся примеры течений в виде трехмерных когерентных столбчатых вихрей.

Рассматриваются способы описания вихревых течений, отмечается практическая невозможность получения точного решения уравнения Навье-Стокса для таких движений. Обосновывается необходимость статистического способа их описания, в том числе, с использованием корреляционных функций. Излагаются предпосылки для построения теории трехмерных когерентных геострофических вихрей в однородной по плотности жидкости, приводятся уравнения для средней скорости и для турбулентных пульсаций, малых по сравнению со средней скоростью. Освещается важность исследования влияния трехмерного когерентного вихревого течения проводящей жидкости на внешнее магнитное поле. Обсуждается связь  $\alpha$ -эффекта, количественно выраженного в виде матрицы пропорциональности между компонентами электродвижущей силы, возникающей за счет турбулентного течения проводящей жидкости в магнитном поле, и компонентами самого магнитного поля. В обзоре анонсируется, что в Главе 3 величина  $\alpha$ -эффекта трехмерного когерентного вихря проводящей жидкости вычисляется в области малых значений чисел Экмана, Россби и магнитного числа Прандтля. Указывается также важность исследования статистических свойств течений в другом предельном случае, когда амплитуда флуктуаций становится сравнимой с величиной среднего течения. В качестве одного из классов таких нелинейных систем рассматриваются системы, описываемые нелинейным уравнением Шредингера, которое может быть использовано для описания как волн на глубокой воде, так волн в оптоволокне. Обсуждаются способы статистического исследования волновых систем с циклическим усилением, к которым

относится случайный волоконный лазер с обратной связью. Делается вывод о возможности применения волновой кинетической теории для исследования таких систем на примере случайного волоконного лазера.

Во второй главе изложен подход, позволяющий количественно описывать статистические свойства турбулентных течений на примере трехмерных квазигеострофических вихрей в однородной жидкости, путем разделения течения на крупномасштабный поток и турбулентные пульсации. Задача решается в пределе большого значения числа Рейнольдса, малых значений чисел Россби и Экмана. Влияние турбулентности учитывается в виде модельного случайного поля внешних сил, которое считается равномерно распределенным в объеме. Статистика этих сил, передающих энергию вихрю, изотропна, предполагается скоррелированной на малых временах и на малом пространственном масштабе. Излагается методика вычисления корреляционных функций, описывающих статистические свойства такого течения. Данная методика реализована на примере вычисления одноточечной парной корреляционной функции турбулентных пульсаций поля скорости, которая содержится в выражении для тензора Рейнольдса и позволяет определить профиль среднего течения со сдвигом скорости. При этом величина сдвига скорости трехмерного когерентного вихря определяется квадратным корнем отношения мощности случайного поля внешних сил (которое может иметь конвективную природу) к кинематической вязкости жидкости. Также в данной главе исследуется пространственная статистика турбулентных пульсаций в трехмерном квазигеострофическом вихре. Проведены вычисления структурной функции скорость-скорость различных компонент флуктуаций поля скорости на малых пространственных масштабах для такого вихря.

С учетом свойств двумерных флуктуаций рассчитаны структурные функции различных компонент поля скорости турбулентных пульсаций в двумерном когерентном вихре в зависимости от мощности накачки и вязкости среды. Сравнение показало, что в трехмерном когерентном вихревом течении структурная функция имеет более анизотропный вид, чем в двумерном когерентном течении.

В третьей главе исследован  $\alpha$ -эффект для трехмерного когерентного вихря с ненулевой спиральностью в проводящей жидкости. С использованием модели вихря найдены компоненты одноточечного коррелятора скорость-завихренность. В присутствии такого вихря в проводящей жидкости рассмотрено поведение магнитного поля, амплитуда которого изначально была мала и определялась тепловыми флуктуациями. Показано, что связь между компонентами электродвижущей силы  $\mathcal{E}$  и магнитного поля  $B$  - линейная:  $\mathcal{E} = \alpha B$ , а также получено выражение для всех элементов псевдотензора  $\alpha$  в трехмерном

когерентном вихревом течении проводящей жидкости в зависимости от величин вязкости, магнитной диффузии, угловой скорости вращения и сдвига скорости, то есть в зависимости от чисел Россби, Экмана и магнитного числа Прандтля, в условиях, когда число Россби много больше числа Экмана, но меньше или порядка единицы, а магнитное число Прандтля также меньше, или порядка единицы, которые характерны для внешней зоны ядра Земли. На основании полученных результатов сделан вывод о характере влияния коэффициента магнитной диффузии и угловой скорости вращения системы на величину  $\alpha$ -эффекта.

Также получено уравнение эволюции среднего магнитного поля в трехмерном когерентном вихре и найден критерий его неустойчивости во времени, то есть роста величины среднего магнитного поля, в зависимости от величины чисел Россби, Экмана и магнитного числа Прандтля, а также отношения масштаба накачки к масштабу среднего магнитного поля:

В четвертой главе приведены результаты исследования статистики другого режима течения, когда флуктуации нельзя считать малыми по сравнению с его средней скоростью. Такие системы являются нелинейными и в ряде случаев могут описываться нелинейным уравнением Шредингера. Особый интерес среди них представляет исследование циклических волновых систем, в частности, случайного волоконного лазера с распределенной обратной связью. В такой системе, поведение которой описывается в рамках ранее развитой волновой кинетической теории, определена функция распределения интенсивности волнового пакета на примере излучения, прошедшего через случайный волоконный лазер. В первом и втором порядках по параметру нелинейности найдено выражение для коэффициента эксцесса как безразмерного параметра, определяющего отличие статистики интенсивности выходного излучения от релейевской.

В заключение, приведены основные результаты работы. Отмечено, что полученные результаты с использованием статистического подхода позволяют лучше понять природу когерентных вихревых и волновых течений, а также могут быть использованы для выбора постановки численных и экспериментальных исследований, анализа и прогнозирования в будущем некоторых природных явлений и технологических процессов. Среди этих результатов наиболее важными представляются следующие:

1. Получены соотношения для описания турбулентных пульсаций в присутствии быстрого вращения системы и сдвигового течения в однородной по плотности жидкости, а также установлены свойства структурной функции турбулентных пульсаций внутри трехмерного когерентного вихря на малых пространственных масштабах.

2. Рассчитана структурная функция различных компонент турбулентных пульсаций поля скорости на малых масштабах для трехмерного и двумерного когерентных вихревых течений в однородной по плотности жидкости в зависимости от мощности накачки и вязкости среды; установлено, что в трехмерном когерентном вихревом течении структурная функция имеет более анизотропный характер, чем в двумерном;
3. аналитически исследован  $\alpha$ -эффект в трехмерном когерентном вихре проводящей жидкости с ненулевой спиральностью, вычислены элементы матрицы  $\alpha$ -эффекта в течении при различных числах Россби ( $Ro$ ), Экмана ( $Ek$ ) и магнитного числа Прандтля ( $Prm$ ) в области их значений  $Ek \ll Ro \lesssim 1$  и  $Prm \lesssim 1$ , которые характерны для внешней зоны ядра Земли. Показано, что величина  $\alpha$ -эффекта существенно зависит от соотношения между числом Россби и магнитным числом Прандтля: она уменьшается с ростом угловой скорости вращения системы при  $Ek \ll Prm$  и не зависит от нее при  $Ek \gg Prm$ , а также слабо зависит от коэффициента магнитной диффузии в пределе  $Ro \ll Prm$  и убывает с его ростом при  $Ro \gg Prm$ .
4. Установлен критерий неустойчивости среднего магнитного поля, возникающего за счет спирального течения проводящей жидкости трехмерного когерентного вихря, в терминах безразмерных параметров  $Ro$ ,  $Ek$ ,  $Prm$ , а также отношения масштаба среднего магнитного поля к масштабу накачки.
5. Определена функция распределения интенсивности волнового пакета на примере излучения, прошедшего через случайный волоконный лазер. Найдено выражение для коэффициента эксцесса, как безразмерного параметра, определяющего отличие статистики интенсивности выходного излучения от релеевской статистики.

Основные замечания по диссертации и автореферату заключаются в следующем.

1. Автор не вполне корректно использует термин «геострофические» применительно к рассматриваемым им когерентным вихрям. Геострофическими называются движения воды и воздуха происходящими при балансе градиента давления и силы Кориолиса. При этом нестационарность, силы инерции и сила трения отсутствуют. Вследствие того, что в вихрях в балансе сил всегда присутствует центробежная сила их динамика не бывает чисто геострофической. Однако, если отношение центробежной силы к силе Кориолиса мало (число Россби существенно меньше единицы), а также слабы эффекты трения (число Экмана много меньше единицы) то такие вихри



классифицируются как квазигеострофические. Именно этот термин следует применять в отношении рассматриваемым в диссертации когерентным вихрям.

2. В Главе 1 отмечается, что модель создается для «трехмерных когерентных геострофических вихрей при постоянной температуре». Во первых, более корректно говорить не о постоянстве температуры, а об однородности плотности. Во вторых, для квазигеострофических вихрей в однородной жидкости характерным является двумерное движение, трехмерность возникает за счет вязких пограничных слоев на поверхности и дне бассейна, которые в модели отсутствуют. В связи с этим требуется пояснить, какой смысл вкладывается в термин «трехмерность».
3. В диссертации и в автореферате отмечается, что применяемая модель может быть обобщена на обширный класс течений в природе (атмосфере), таких как «торнадо, смерчи, циклоны (воздушные вихри с пониженным давлением) и антициклоны (вихри с повышенным давлением). Действительно, циклоны и антициклоны в атмосфере, называемые синоптическими вихрями, характеризуются, как правило, небольшими значениями числа Россби и по этому параметру соответствуют применяемой модели. Что касается торнадо и смерчей, то для них число Россби много больше единицы и их динамика в основном определяется балансом градиента давления и центробежной силы, а сила Кориолиса играет второстепенную роль. Для такого типа вихрей нужна другая модель.
4. При постановке задачи постулируется, что флуктуации поля скорости возбуждаются случайной силой, которая не зависит от крупномасштабного течения. В используемой модели и средняя скорость, и величина сдвига скорости в когерентных вихрях определяются мощностью накачки и вязкостью. Поэтому можно сказать, что флуктуации определяют крупномасштабное течение, а не наоборот. Вместе с тем, в близких к модельной природных ситуациях, например, при развитии глубокой конвекции в океане, вращение Земли и фоновое вихревое движение оказывают существенное влияние на структуру конвекции. Это влияние отчетливо проявляется и в лабораторных экспериментах с конвекцией во вращающейся жидкости (см., например, Boubnov B.M., Golitsyn G.S. *Convection in rotating fluids*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers 1995. 224 p.). Это обстоятельство следовало бы обсудить в диссертации.
5. В заключительном абзаце автореферата отмечено, что «полученные в работе результаты с использованием статистического подхода позволяют лучше

понять природу когерентных вихревых и волновых течений». Хотелось бы узнать более конкретно, в чем это улучшение заключается. В диссертации этот вопрос тоже не освещен.

6. Оформление текста диссертации и автореферата содержит достаточно много огрехов. Наиболее существенными из них является частое отсутствие пояснения величин, входящих в формульные выражения, не приведение выражений для безразмерных параметров (числа Экмана и магнитного числа Прандтля, например). Подписи под большинством рисунков являются слишком лаконичными, недостаточно раскрывающими смысл того, что на них изображено. Все это несколько затрудняет понимание того, что делалось и сделано в работе.

Отмеченные выше недостатки не оказывают существенного влияния на сугубо положительную оценку диссертационной работы. Она посвящена весьма актуальной и малоисследованной теме – теоретическому описанию статистических свойства когерентных вихревых и волновых турбулентных течений. Полученные в ней результаты представляют научную и практическую ценность и обладают большой степенью новизны. Они могут быть использованы применительно к синоптическим вихрям в атмосфере и в океане, к оценке альфа-эффекта во внешней зоне ядра Земли, а также характеристик волнового пакета, прошедшего через случайный волоконный лазер. В целом, использование статистического подхода позволило подойти на новом уровне к описанию когерентных вихревых и волновых течений. Установленные в диссертации закономерности могут быть полезны для постановки дальнейших численных и экспериментальных исследований когерентных вихревых и волновых течений, как в геофизических средах, так и в технологических процессах. В их использовании должны быть заинтересованы такие научные организации как Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта и ряд других.

Работа прошла хорошую апробацию. Ее результаты были доложены на восьми научных семинарах и конференциях, как российских, так и международных. Они опубликованы в виде статей в трех журналах из перечня ВАК. Совокупность этих публикации, как и автореферат, полностью отражают основное содержание диссертации.

Определяющий личный вклад автора в работу не вызывает сомнений. Он проявил себя как сложившийся физик-теоретик высокой квалификации. Наряду с участием в постановке задач и формулировке полученных результатов, им выполнена большая

вычислительная работа, в результате чего удалось решить несколько сложных и актуальных научных проблем. Достоверность полученных им результатов подтверждается согласованностью установленных закономерностей с натурными наблюдениями, лабораторными и численными экспериментами.

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а ее автор, Огородников Леон Леонтьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника

Отзыв составил главный научный сотрудник, руководитель лаборатории экспериментальной физики океана Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт океанологии имени П.П. Ширшова Российской академии наук (ИО РАН) 117997, Российская Федерация, Москва, Нахимовский проспект, дом 36, тел. (499) 124-63-92, [zatsepin@ocean.ru](mailto:zatsepin@ocean.ru), д.ф.-м.н.

Зацепин Андрей Георгиевич.  
4 сентября 2023 г.

Зам. ученого секретаря ФГБУН Институт океанологии имени П.П. Ширшова Российской академии наук (ИО РАН) 117997, Российская Федерация, Москва, Нахимовский проспект, дом 36, тел. (499)124-59-92, [outgoing@sendrecurring.com](mailto:outgoing@sendrecurring.com)

к.ф.н.

Артемьева Мария Александровна

Институт океанологии имени П.П. Ширшова Российской академии наук (ИО РАН)  
117997, Российская Федерация, Москва, Нахимовский проспект, дом 36, (499) 124-61-49,  
[office@ocean.ru](mailto:office@ocean.ru)

