УТВЕРЖДАЮ

Проректор
по научной работе, к.ф.-м.н.

_____ Баган Виталий Анатольевич

«07» октября 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»
(МФТИ, Физтех)

Диссертация «Модель композитного вихря Большого красного пятна Юпитера» выполнена на кафедре термогидромеханики океана федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

В период подготовки диссертации с сентября 2023 г. по май 2025 г. соискатель **Аракелян Екатерина Мовсесовна** работала в лаборатории моделирования механических систем и процессов федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» в должности инженера.

В 2023 г. Аракелян Е.М. окончила федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» по направлению подготовки 03.04.01 Прикладные математика и физика. В 2026 г. окончила МФТИ по программе подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре «Науки о Земле и окружающей среде».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2026 г. федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН Жмур Владимир Владимирович. Основное место работы – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт

океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, руководитель лаборатории морских течений.

По итогам обсуждения диссертации «Модель Композитного Вихря Большого Красного Пятна Юпитера» ***принято следующее заключение.***

Тема диссертации является актуальной в виду следующих фундаментальных и прикладных взаимосвязанных факторов:

1. Необходимость глубокого теоретического обоснования аномальной устойчивости композитных структур. Традиционные модели однородных по потенциальной завихренности вихрей принципиально ограничены в описании механизмов длительной стабилизации Большого Красного Пятна Юпитера (БКПЮ), так как не учитывают внутреннюю кинематику объекта. Переход к аналитическому исследованию композитной структуры позволяет математически выявить новые компенсационные механизмы динамической стабилизации, возникающие за счет перераспределения энергии и завихренности между вложенными вихревыми ядрами в условиях постоянного фонового сдвига.

2. Развитие фундаментального аналитического аппарата геофизической гидродинамики. Постановка и строгий поиск точного аналитического решения задачи о динамике системы вложенных софокусных эллипсоидальных вихрей в стратифицированной среде является нетривиальным математическим обобщением классической проблемы об эллипсоидальном вихре. Исследование соискателя существенно расширяет класс интегрируемых задач теории вихрей.

3. Интерпретация современных массивов наблюдательных данных. Для корректной физической интерпретации высокоточных кинематических, термодинамических и гравиметрических данных, непрерывно поступающих от орбитальной станции Juno, а также спектральных данных космического телескопа James Webb (JWST), критически необходима надежная теоретическая база. Эта база должна связывать поверхностные (видимые) двумерные поля скоростей с трехмерной глубинной структурой и распределением завихренности.

4. Формулировка энергетических критериев отбора. Сравнительный математический анализ функционалов полной механической энергии (включающих как кинетическую энергию горизонтальных движений, так и доступную потенциальную энергию) композитных и однородных моделей позволяет установить строгие критерии, которые необходимы для объяснения фундаментального принципа: почему физическая природа из бесконечного множества возможных решений уравнений гидродинамики реализует именно такие сложные композитные вихревые конфигурации.

Цели и задачи диссертации:

1. Выполнить строгую математическую постановку гидродинамической задачи о композитном вихре в терминах закона сохранения потенциальной завихренности.

2. Получить точные аналитические решения для модели стационарного композитного вихря, состоящего из двух софокусных эллипсоидальных ядер, помещенных в горизонтальное баротропное течение с постоянным сдвигом скорости и определить законы распределения потенциальных завихренностей в таком ядре.

3. Провести расчет полной механической энергии стационарной композитной системы, исследовав ее зависимость от геометрических параметров вложения для условий исторических космических миссий.

4. Разработать физико-математическую модель нестационарного композитного вихря в пределе малого возмущающего влияния внутреннего вложения на форму границы внешнего доминирующего вихря.

5. Выполнить аналитическое исследование кинематических режимов эволюции нестационарного внутреннего вихря, определив параметры движения его геометрического центра, а также типы деформации его формы (вращение, нутационные колебания).

6. Вывести аналитическую оценку средней энергии нестационарного композитного вихря и определить диапазон физических параметров (в частности, значений относительной завихренности внутреннего вложения), при которых достигается глобальный минимум энергии системы по сравнению с однородным вихрем.

7. Исследовать структурную устойчивость двухкомпонентного и мульти-компонентного композитного вихря.

Основные результаты диссертации:

1. Аналитически доказано, что в квазигеострофическом приближении на f-плоскости композитный вихрь из двух вложенных софокусных эллипсоидальных ядер сохраняет стационарность только при строго противоположном знаке потенциальной завихренности внутреннего ядра по отношению к внешнему. Полная интегральная механическая энергия такого стационарного образования всегда превосходит энергию эквивалентного однородного вихря без вложений.

2. Показано, что в нестационарной модели при пренебрежимо малом возмущающем воздействии внутреннего эллипсоидального вихря на границу внешнего стационарного вихря, внутренний вихрь остается локализованным образованием: его центр движется по замкнутой эллиптической траектории с периодом порядка 6 земных суток, а форма испытывает вращение с ограниченными колебаниями горизонтальных размеров.

3. Установлено, что обе разработанные модели – стационарная и нестационарная – качественно воспроизводят наблюдаемую кинематическую структуру БКПЮ: мощное антициклоническое струйное течение на периферии (до 150–170 м/с) и выраженную зону слабого циклонического вращения во внутренней области (порядка 20 м/с).

4. Показано, что энергия композитного вихря с нестационарным вложением меньше, чем энергия однородного вихря и заметно меньше, чем энергия двухкомпонентного стационарного вихря. Среди двухкомпонентных моделей нестационарный вихрь энергетически более выгодный.

5. Показана структурная неустойчивость двухкомпонентного вихря и структурная устойчивость композитных вихрей с большим количеством вложенных вихрей.

Все ***результаты диссертации получены лично соискателем*** при научном руководстве доктора физико-математических наук, члена –корреспондента РАН, профессора Жмура В.В.

Научная новизна работы подтверждается получением следующих оригинальных теоретических результатов:

1. Впервые применительно к Большому красному пятну Юпитера предложена, математически строго формализована и решена аналитическая модель стационарного бароклинного композитного вихря, включающая два вложенных вложенных друг в друга эллипсоидальных вихревых ядра. Получено точное решение нелинейной задачи в рамках квазигеострафического подхода на f-плоскости. В отличие от существующих классических теорий, получены точные соотношения, однозначно связывающие интенсивность потенциальных завихренностей обоих ядер с их геометрическими характеристиками и параметрами сдвига фонового течения.

2. Впервые для условий БКПЮ математически строго доказана неизбежность циклонической природы внутреннего вложения в стационарной модели. Установлено, что условие стационарности системы на f-плоскости выполнимо исключительно при противоположном знаке завихренности внутреннего ядра по отношению к внешнему. При этом выявлен сингулярный характер вложения: интегральная завихренность внутреннего вихря остается конечной величиной даже при стремлении его объема к нулю.

3. Разработана принципиально новая математическая модель нестационарного бароклинного композитного вихря. Впервые доказано, что в условиях реальной циркуляции атмосферы Юпитера внутренний вихрь не подвержен деструктивному режиму неограниченного вытягивания в филамент. Аналитически определены параметры замкнутой эллиптической траектории, по которой перемещается геометрический центр вложенного вихря. В случае совпадения центров вихрей внутренний вихрь, оставаясь на месте, испытывает ограниченные деформации горизонтальных размеров.

4. Впервые сформулирован фундаментальный физический энергетический принцип структурного отбора вихревых конфигураций. Математически доказано, что композитный вихрь с нестационарным циклоническим вложением способен обладать меньшей суммарной механической энергией, чем полностью эквивалентный ему гомогенный вихрь.

5. Впервые введено и рассмотрено понятие структурной устойчивости и неустойчивости стационарных композитных вихрей применительно к Большому красному пятну Юпитера.

Практическая ценность результатов диссертации определяется широкими возможностями использования разработанных аналитических алгоритмов для нужд современной наблюдательной астрофизики и океанологии. Полученные функциональные соотношения позволяют реконструировать скрытые глубинные поля скоростей и завихренностей внутри БКПЮ исключительно на основе поверхностных оптических наблюдений геометрии облачного покрова. Разработанный метод оценки энергетического бюджета применим для комплексной физической интерпретации высокоточных данных действующего аппарата Juno, а также планируемых межпланетных миссий (Europa Clipper, JUICE) к системам планет-гигантов. Математический аппарат моделей допускает прямую адаптацию для изучения внутриокеанических вихрей Земли и иных долгоживущих атмосферных структур (например, гексагонального вихря Сатурна).

Обоснованность и достоверность результатов и выводов

Степень достоверности результатов обеспечивается строгой постановкой задач на основе фундаментальных законов геофизической гидродинамики. Используемое квазигеострофическое приближение обосновано малостью числа Россби ($Ro \ll 1$). Корректность математических моделей подтверждается применением классического аппарата математической физики к решению уравнения Пуассона, а предельные случаи асимптотически переходят в известные решения С. Киды и бароклинной модели эллипсоидального вихря. Физические выводы согласуются с данными космических миссий Voyager-1, Galileo, Cassini, Juno и исследований с помощью Hubble Space Telescope (HST), а также прошли апробацию на конференциях и опубликованы в рецензируемых изданиях.

Материалы диссертации опубликованы соискателем достаточно полно в следующих работах:

1. E.M. Arakelyan, V.V. Zhmur, O.G. Chkhetiani, «Composite Structure of Jupiter's Great Red Spot. Part 1. Stationary Model» // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2026, Vol. 62, No. 3, pp. 403–424. DOI: 10.1134/S0001433826700532

2. E.M. Arakelyan, V.V. Zhmur, O.G. Chkhetiani, «Composite Structure of Jupiter's Great Red Spot. Part 2. Nonstationary Model» // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2026, Vol. 62, No. 4, pp. 549–565. DOI: 10.1134/S0001433826700933

3. E.M. Arakelyan, V.V. Zhmur, O.G. Chkhetiani, «Structural Stability of 34 Composite Vortices and Its Application to Jupiter's Great Red Spot» // Russian Journal of Earth Sciences, 2026, 35 26, https://doi.org/10.2205/2026es001163

Личный вклад соискателя

Глава 1. Соискателем лично выполнена постановка задачи о стационарном композитном вихре из двух вложенных софокусных эллипсоидальных ядер в фоновом сдвиговом течении, получены точные аналитические решения для функции тока и поля скоростей, выведена замкнутая система алгебраических уравнений для потенциальных завихренностей обоих ядер, проведён анализ особенностей поведения относительных завихренностей и энергии системы в зависимости от размера внутреннего вихря.

Глава 2. Соискателем лично проведены расчёты полной механической энергии стационарной композитной системы для условий исторических космических миссий и выполнен сравнительный анализ энергетических характеристик стационарного и нестационарного композитных вихрей.

Глава 3. Соискателем лично разработана модель нестационарного композитного вихря в пределе слабого влияния внутреннего вложения, исследованы кинематические режимы эволюции внутреннего вихря, выведено выражение для средней энергии и определён диапазон параметров, при которых достигается её минимум.

Глава 4. Соискателем лично выполнена постановка задачи о трёхкомпонентном композитном вихре, получена система кинематических условий на границах всех ядер, проведены расчёты распределения завихренностей по зонам структуры, доказана структурная устойчивость трёхкомпонентного вихря при трансформации в двухкомпонентный и исследовано поведение пробного вихря внутри многокомпонентного образования.

Публикации и апробация. Соискателем лично подготовлены публикации в рецензируемых журналах и доклады на научных конференциях.

Основные результаты работы были представлены на следующих научных конференциях и семинарах:

1. Всероссийская конференция по физике атмосферы и планет (Москва, ИФА РАН, 2025).

2. Школа-конференция молодых учёных «Гидродинамика вихревых структур в атмосферах и океанах» (Санкт-Петербург, СПбПУ, 2025).

3. XIX Международная научно-техническая конференция «Современные методы и средства океанологических исследований» (Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 2025). «Композитная вихревая модель Большого Красного Пятна Юпитера». Аракелян Е.М., Жмур В.В., Чхетиани О.Г.

4. Конференция-семинар «Нелинейные задачи геофизической гидродинамики», посвящённая памяти Н.Н. Романовой (Институт физики атмосферы, 2024). «Композитная структура Большого Красного Пятна Юпитера». Е.М. Аракелян, В.В. Жмур, О.Г. Чхетиани.

5. Доклад на семинаре Лаборатории морских течений под руководством чл.-корр. РАН Жмура В.В. (Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 2025). «Композитная структура БКПЮ». Е.М. Аракелян, В.В. Жмур, О.Г. Чхетиани.

6. Международная конференция “Theoretical and applied aspects of geophysical fluid dynamics”, посвящённая Gregory Reznik в честь его 80-летия и 55-летия научной деятельности (Shirshov Institution of Oceanology of Russian Academy of Sciences, 2025). «Нестационарная композитная модель Большого Красного Пятна Юпитера». Е.М. Аракелян, В.В. Жмур, О.Г. Чхетиани.

7. XIX Международная научно-техническая конференция «Современные методы и средства океанологических исследований» (Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 2025). «Нестационарная композитная модель Большого Красного Пятна Юпитера». Е.М. Аракелян, В.В. Жмур, О.Г. Чхетиани.

8. VII International Symposium “Topical Problems of Nonlinear Wave Physics” (Москва – Санкт-Петербург, 2025). “Composite structure of Jupiter’s Great Red Spot”. Arakelyan, V. Zhmur, O. Chhetiani.

9. IX Всероссийская конференция «Моря России: приоритеты, практика, прогноз» (Севастополь, Морской гидрофизический институт РАН, 2025). «Композитная модель Большого Красного Пятна Юпитера». Е.М. Аракелян, В.В. Жмур, О.Г. Чхетиани.

10. Научная конференция «Численное моделирование в механике сплошных сред» 2025, посвящённая 100-летию академика О.М. Белоцерковского (МФТИ, 2025). «Композитная структура Большого Красного Пятна Юпитера». Е.М. Аракелян, В.В. Жмур.

11. XX Всероссийская школа-конференция молодых учёных «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии» (Новосибирск, 2026). «Композитная структура Большого Красного Пятна Юпитера». Е.М. Аракелян.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 1.6.18. Науки об атмосфере и климате, в частности, пунктам:

• п. 1 – Методы наблюдений, измерений и обработки данных об атмосфере и климатической системе. Применение радиолокационной, лазерной, спектрометрической, радио- и спутниковой аппаратуры. Ракетное, самолетное, лазерное, акустическое, спектрометрическое и микроволновое зондирование. В

части: «Методы наблюдений, измерений и обработки данных об атмосфере и климатической системе».

- п. 9 – Общая циркуляция атмосферы. Явление Эль-Ниньо-Южное колебание (ЭНЮК). Основные синоптические объекты: воздушные массы, атмосферные фронты, циклоны и антициклоны, в том числе блокирующие. Облака, туманы и осадки. Крупномасштабные волны.

- п. 13 – Гидродинамика и термодинамика атмосферы. Атмосферные колебания и волны. Энергетика атмосферы. Дальние связи в атмосфере. Крупномасштабная турбулентность. Динамика стратосферы и мезосферы. Взаимодействие стратосферы и тропосферы. В части: «Гидродинамика и термодинамика атмосферы. Атмосферные колебания и волны. Энергетика атмосферы. Дальние связи в атмосфере. Крупномасштабная турбулентность».

Диссертация соискателя Аракелян Екатерины Мовсесовны соответствует требованиям, установленным в соответствии с Федеральным законом от 23 августа 1996 г. № 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике».

Диссертация «Модель Композитного Вихря Большого Красного Пятна Юпитера» **Аракелян Екатерины Мовсесовны** рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности ***1.6.18. Науки об атмосфере и климате***.

Заключение принятно на заседании кафедры термогидромеханики океана МФТИ, Физтех. Присутствовало на заседании 14 человек. Результаты голосования: «за» – 14 чел., «против» – нет, «воздержались» – нет, протокол №6 от 07 октября 2026 года.



Жмур Владимир Владимирович,
член-корреспондент РАН,
д-р физ.-мат. наук, профессор,
заведующий кафедрой
термогидромеханики океана
МФТИ