

Отзыв официального оппонента  
по диссертации Ильина Антона Сергеевича  
«Стохастический транспорт в изотропных потоках»,  
представленной на соискание ученой степени доктора  
физико-математических наук по научной специальности 1.3.3. —  
теоретическая физика

Диссертационная работа Ильина Антона Сергеевича посвящена теоретическому исследованию стохастического транспорта в изотропных потоках. Такая тематика имеет непосредственное отношение к теории турбулентности. В работе ключевое внимание уделено изучению турбулентного транспорта, пассивного скаляра и пассивного вектора (магнитного поля) с заданным стохастическим потоком. Такие модели имеют важное значение в объяснении магнитных полей в астрофизических объектах, а также в объяснении температурных полей в Геофизике. Основные результаты, полученные в диссертации относятся к наиболее сложным аспектам стохастического транспорта, а именно, негауссовому характеру турбулентного потока, а также и свойство перемежаемости транспортируемых полей, поэтому теоретические результаты полученные в работе Ильина А.С. безусловно **актуальные** и вносят значительный вклад в понимание процессов стохастического переноса в изотропных потоках.

Работа состоит из введения, одиннадцати глав, заключения и приложений.

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационного исследования, приведен весьма содержательный обзор литературы по изучаемым проблемам, сформулированы цели, задачи, научная новизна и практическая значимость работы.

Учитывая важную роль задачи переноса пассивного скаляра и пассивного вектора и многочисленные важные приложения таких моделей, в

**первой Главе** содержится формальная постановка задачи теории стохастического переноса, как задачи теоретической физики. Фактически первая глава является вводной ко всем остальным главам, в которых решены важные задачи и получены физически содержательные результаты. Первый класс задач посвящен развитию теории Казанцева-Крайчнана. Для решения таких задач во **второй Главе** диссертации предложен новый упрощенный подход к выводу уравнений Казанцева-Крайчнана, позволяющий преодолеть сложности, связанные с сингулярностью корреляционной функции. Упрощенный подход оказался особенно удобным при изучении негауссовых моделей турбулентного переноса. Разработанным подходом получены уравнения Казанцева-Крайчнана для пассивного скаляра и пассивного магнитного поля.

В **третьей Главе** диссертации разработан принципиально новый метод нахождения асимптотики уравнения Казанцева-Крайчнана. Предложенный метод является альтернативой известного метода стохастического квантования. Метод основан на возможности сведения уравнения Казанцева-Крайчнана к уравнению Фоккера-Планка-Комогорова для вспомогательного уравнения Ланжевена. Предложенный подход позволил в **четвертой главе** эффективно вычислить инкремент роста однородных флуктуаций пассивного поля в стохастическом потоке с произвольной структурной функцией. В работе вычислена кривая устойчивости магнитных флуктуаций в модели Вайнштейна-Кичатинова.

В **пятой и шестой главах** диссертации предложен альтернативный формализм Лагранжевых траекторий основанной на квази-Лагранжевой системе координат, найдены точные решения уравнений транспорта локализованных возмущений на вязком этапе эволюции, проведен подробный анализ стохастических матричных уравнений с мультипликативным шумом, в роли которого выступает Лагранжев тензор градиента скорости. Полученное матричное уравнение решено как в дискретном, так и в континуальном времени.



**Седьмая глава** диссертации посвящена обобщению модели Казанцева-Крайчнана на случай негауссового потока. В предложенной модели статистические свойства потока оказываются не инвариантными относительно обращения времени, и, тем самым, модель оказывается более реалистичной, чем традиционная модель Казанцева-Крайчнана.

На основе предложенной модели в **восьмой главе** диссертации проведено исследование эволюции пассивного локализованного возмущения скалярного поля на вязком этапе эволюции, показана сильная перемежаемость статистики скалярного поля.

Аналогичное исследование проведено в **десятой главе** диссертации, в которой изучается поведение пассивного вектора магнитного поля. Показано, что на вязком этапе магнитное поле локализованного возмущения затухает вследствие диффузионного перезамыкания силовых линий, однако полная энергия растет вследствие экспоненциального роста объема возмущения. Получены интересные результаты относительно природы турбулентного динамо при больших числах Прандтля, показано, что на вязком этапе генерация поля происходит благодаря некогерентному наложению в ансамбле вытягивающихся возмущений, в то время как на инерционном этапе она возникает благодаря самоналожению каждого возмущения в отдельности.

Несколько обособленными, но важными являются результаты **девятой и одиннадцатой глав** диссертации. В **девятой главе** диссертации изучено поведение скалярного возмущения в нелинейной системе реакции диффузии типа Фишера-Колмогорова-Петровского-Пискунова. Найдено, что на вязком этапе волна реакции распространяется экспоненциально быстро, что приводит к экспоненциальному росту популяции, несмотря на насыщение плотности. Исследована перемежаемость в такой системе. **Одиннадцатая глава** имеет наиболее математический характер, изучая эволюции камерных гиперповерхностей в изотропных  $d$ -мерных потоках. Показано, что каждой перестановке из  $d$  элементов соответствует точный стохастический интеграл.

В **заключении** приведены основные результаты и выводы диссертационной работы.

Полученные в диссертации результаты **обоснованы** на высоком уровне использованием известных хорошо аргументированных методов теоретической физики, а также глубоким анализом полученных результатов и выводов. **Достоверность** полученных результатов не вызывает сомнений. Необходимо отметить, что **личный вклад** Ильина А.С. в исследованиях, отраженных в диссертации, был определяющим.

Однако к работе имеются **замечания**:

1. Не очень удачная структура диссертации: 11 глав-слишком много для такого объема работы.

2. У некоторых формул отсутствуют номера – иногда это затрудняет чтение диссертации.

3. На странице 96 в формуле (8.1) и на странице 122 в ФОРМУЛЕ БЕЗ НОМЕРА предполагается, что начальная форма локализованных возмущений имеет «гауссов» вид. Такой выбор сильно упрощает вычисления инкрементов роста таких возмущений, позволяя в явном виде взять интегралы и получить точный ответ. Но не окажутся ли инкременты другими, если выбрать форму начальных возмущений другой? В тексте нет ответа на этот вопрос.

Тем не менее, сделанные замечания не снижают моей высокой оценки диссертационной работы Ильина А.С. Диссертация Ильина А.С. является **завершенным научным исследованием**, в которой получены важные результаты в области стохастического переноса турбулентными потоками. Результаты диссертации могут быть использованы при проведении дальнейших экспериментальных и теоретических исследований в области статистической физики, в теории турбулентности, в астрофизике проводимых в ИЯФ СО РАН, ИЗМИРАН, ИФВЭ (Протвино), ИКИ РАН (Москва), МИФИ, МФТИ, МГУ и других российских научных институтах и университетах. **Значимость и новизна** результатов подтверждается



публикациями в высокорейтинговых международных журналах и докладами на отечественных и международных конференциях, **научная и практическая ценность** диссертационной работы несомненна.

Таким образом, диссертация «Стохастический транспорт в изотропных потоках» удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г. для докторских диссертаций, а ее автор Ильин Антон Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.3.3. — теоретическая физика.

Д.ф.-м.н., профессор



Петросян А.С.

«30» апреля 2024г.

Петросян Аракел Саркисович  
заведующий сектором теоретических исследований  
отдела физики планет  
Института Космических Исследований РАН,  
ул. Профсоюзная, д. 84/32, г. Москва, 117997  
тел.: 8 (916) 557-10-25  
e-mail: [apetrosy@iki.rssi.ru](mailto:apetrosy@iki.rssi.ru)

Научная специальность защищенной докторской диссертации: 01.04.02 – теоретическая физика

Подпись Петросяна А.С. заверяю



Ученый секретарь ИКИ РАН



А.М. Садовский

Список основных публикаций официального оппонента по теме рассмотренной диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Fedotova M. A., Klimachkov D. A., Petrosyan A. S. Wave processes in plasma astrophysics // *Plasma Physics Reports*. 2023. Vol. 49, Iss. 3. P. 303—350.
2. Karelsky K. V., Petrosyan A. S. Formation and classification of jumps and solitary shock waves in isentropic flows of polytropic continuous media // *JETP Letters*. 2022. Vol. 116, Iss. 2. P. 90—97.
3. Yudenkova M. A., Klimachkov D. A., Petrosyan A. S. Poincare waves and Rossby waves in compressible shallow water flows // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2022. Vol. 134, Iss. 3. P. 327—339.
4. Fedotova M., Klimachkov D., Petrosyan A. Resonant interactions of magneto Poincare and magneto-Rossby waves in quasi-two-dimensional rotating astrophysical plasma // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2022. Vol. 509, Iss. 1. P. 314—326.
5. Fedotova M., Klimachkov D., Petrosyan A. Variable density flows in rotating astrophysical plasma. Linear waves and resonant phenomena // *Universe*. 2021. Vol. 7, Iss. 4. Art. 87.
6. Fedotova M. A., Petrosyan A. S. Wave processes in rotating compressible astrophysical plasma flows with stable stratification // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2020. Vol. 131, Iss. 6. P. 1032—1055.
7. Fedotova M. A., Petrosyan A. S. Wave processes in three-dimensional stratified flows of a rotating plasma in the Boussinesq approximation // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2020. Vol. 131, Iss. 2. P. 337—355.
8. Petrosyan A., Klimachkov D., Fedotova M., Zinyakov T. Shallow water magnetohydrodynamics in plasma astrophysics. Waves, turbulence, and zonal flows // *Atmosphere*. 2020. Vol. 11, Iss. 4. Art. 314.
9. Fedotova M. A., Klimachkov D. A., Petrosyan A. S. The shallow-water magnetohydrodynamic theory of stratified rotating astrophysical plasma flows: Beta-plane approximation and magnetic Rossby waves // *Plasma Physics Reports*. 2020. Vol. 46, Iss. 1. P. 50—64.

10. Zinyakov T. A., Petrosyan A. S. Spectra of decaying two-dimensional magnetohydrodynamic turbulence on a beta-plane // JETP Letters. 2020. Vol. 111, Iss. 2. P. 76—84.
11. Sirazov R. A., Petrosyan A. S. Nonlinear transformations of the kinetic and magnetic energies in rotating magnetohydrodynamic turbulent flows // JETP Letters. 2019. Vol. 110, Iss. 5. P. 329—335.