

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Шлык Наталии Сергеевны «Форбуш-эффекты, вызванные взаимодействующими возмущениями солнечного ветра», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности по специальности 1.3.1 – «Физика космоса, астрономия»

Форбуш-эффект (ФЭ), которому посвящена диссертация Н. С. Шлык, – вариация потоков галактических лучей (ГКЛ) – одно из проявлений сложной системы взаимосвязей физических процессов на Солнце, в межпланетной среде и в магнитосфере Земли. Для исследования этих процессов выполняются многочисленные наблюдения на Земле и в космическом пространстве, для анализа полученных данных применяются методы физики плазмы, магнитной гидродинамики, кинетической теории и т.д. Однако природа солнечно-земных связей еще далеко не понята, трудно поддается моделированию и по-прежнему очень интересна. В этом заключается **фундаментальный аспект** изучения ФЭ.

С другой стороны, вариации потоков КЛ – неотъемлемая составляющая космической погоды, влияние которой на жизнь населения планеты возрастает по мере развития нашей науки и техники. Солнечные вспышки и магнитные бури постоянно обсуждаются в СМИ и простыми жителями. Космические лучи (потоки высокоэнергичных заряженных частиц естественного происхождения), которые некогда интересовали только естествоиспытателей, теперь оказываются важными для здоровья людей и для техники не только в околоземном пространстве, но и на Земле, где многие технические процессы управляются спутниками через системы GPS. Фундаментальный интерес и необходимость прогнозирования космической погоды доказывает **актуальность** темы диссертации.

Нужно подчеркнуть, что интерес к ФЭ породил огромное количество опубликованных работ, и это делает сложным выбор вопроса, который требуется решить в диссертационной работе. **Заслугой автора диссертации является тот факт, что она сама нашла проблему и поставила задачу изучить структуру ФЭ, инициированных взаимодействующими межпланетными возмущениями.** Учитывая огромное количество работ, посвященных ФЭ, это является непростой задачей. Анализ свойств ФЭ, связанных с взаимодействующими структурами солнечного ветра выполнен лично автором диссертации или при ее определяющем участии, так что **личный вклад** Н.С. Шлык в данную работу не вызывает сомнений.

Н.С. Шлык прекрасно разбирается в современном состоянии проблем, связанных с ФЭ. Список цитированных публикаций содержит 267 наименований. Диссертация содержит достаточно полный и хорошо написанный литературный обзор, в том числе подробный обзор методов обработки данных НМ. Можно рекомендовать диссертацию в качестве введения в проблему ФЭ, написанного простым и ясным языком.

Связь ФЭ с изолированными межпланетными структурами изучалась многими исследователями, включая автора диссертации. Группа ИЗМИРАН выявила и подробно описала особенности ФЭ, связанных с эрупциями из активных областей и вне активных областей, вызванных корональными выбросами массы (КВМ), коротирующими областями взаимодействия высокоскоростных потоков солнечного ветра (ВСП КОВ), вспышками, исчезающими волокнами и т.д. Однако никто не занимался систематическим изучением ФЭ, обусловленных взаимодействием структур солнечного ветра. Такое исследование выполнено Н.С. Шлык впервые. Были получены следующие **новые результаты**:

- Эмпирическим путем было установлено, что ФЭ, обусловленные возмущениями солнечного ветра, отстоящими от предыдущего события на время ≥ 50 ч., можно считать изолированными. И противном случае соседние возмущения среды оказывали влияние друг на друга и, соответственно, на связанные с ними ФЭ. Это время было увеличено до 120 ч. для взаимодействующих ВСП, воздействие которых на потоки КЛ более продолжительное, чем воздействие КВМ.
- Сравнение временных параметров ФЭ для взаимодействующих и изолированных событий показало, что средние времена регистрации минимума Форбуш-эффекта, максимума скорости СВ и модуля индукции ММП значительно меньше для взаимодействующих, чем для изолированных событий.
- Предложена классификация взаимодействующих структур солнечного ветра, включающая пары КВМ, вступивших во взаимодействие до прибытия на Землю, или на 1 а.е., аналогичные пары ВСП и смешанные структуры, состоящие из КВМ и ВСП.
- Статистический анализ, выполненный автором диссертации, показал различия в магнитуде и временном профиле ФП, в зависимости от комбинации взаимодействующих структур. Впервые показано, что наличие взаимодействия усиливает воздействие на космические лучи и на геомагнитную возмущенность второго межпланетного возмущения в любой взаимодействующей паре.

Эти результаты, полученные на основе усовершенствования баз данных, созданных в ИЗМИРАН, с информацией о космических лучах, солнечных вспышках, корональных

выбросах массы и других транзиентных явлениях в межпланетной среде, **нашли отражение в положениях, выносимых на защиту, которые вполне научно-обоснованы.**

Обоснованность выводов диссертации подтверждается тем фактом, что найденные закономерности позволили объяснить аномальные 27-дневные вариации ГКЛ в сентябре 2014–феврале 2015 г., и интерпретировать возмущения межпланетной среды в мае 2024 г., вызвавшие экстремальную магнитную бурю и большой Форбуш-эффект. Несколько в стороне от основной темы диссертации стоит проделанное автором исследование ФЭ, наблюдавшихся космических аппаратах (КА) Helios 1 и 2 в течение 10 лет, начиная с середины 1960-х гг. на расстояниях 0.28 до 1 а.е. Автором составлен каталог, содержащий 1166 ФЭ, на основании которого было показано отсутствие радиальной зависимости магнитуды ФЭ от расстояния до Солнца в интервале, где летали КА. Это важный результат. Исследование, несомненно, будет продолжено в настоящее время, когда все больше КА летают на разных расстояниях от Солнца.

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнения, т.к. работа основана на статистическом анализе уникальной базы данных ИЗМИРАН, сдержавшей на момент написания диссертации 8535 событий ФЭ с июля 1957 г. по декабрь 2022 г. включительно. При анализе использованы современные методы статистической обработки данных, и полученные результаты согласуются с современными представлениями о физических условиях в межпланетной среде, влияющих на распространение космических лучей.

У меня есть замечания к работе.

1. Сама идея создания эмпирической модели расчета времени распространения межпланетных КВМ является плодотворной и перспективной. Однако рисунки 14 и 15, представляющие разработанную автором модель оценки транзитного времени КВМ, обсуждаются недостаточно. В частности, почему на рис. 14 изолинии носят сложный нерегулярный характер, включая «островки» и «заливы»? Трудно представить, что влияние начальной скорости КВМ, фоновой скорости и гелиодолготы источника приведет к такой нерегулярности. Я понимаю, что показан эмпирический результат, но скорее всего он свидетельствует о недостатке статистики. Исходя из физических соображений, прежде чем использовать полученные зависимости для прогноза, нужно было бы их сгладить. Если же автор настаивает на данном представлении, необходимо объяснить результат более подробно. Если учитывать реальные возможности моделей предсказания транзитного времени КВМ,

то ошибка нередко составляет более 10 часов, и с учетом этого нерегулярности на рис. 14 теряют смысл.

2. Характер зависимости транзитной скорости от гелиодолготы (рис. 15) в работе не обсуждается. Нужно объяснить, почему характер кривой для КВМ с начальной скоростью 500 км/с отличается от кривых с другими начальными скоростями, почему зависимость транзитной скорости от гелиодолготы имеет локальные минимумы и максимумы.
3. Рассматривая типы взаимодействующих возмущений солнечного ветра, автор не включила туда группу, в которой ВСП предшествует КВМ. В работе это не обсуждается, хотя, по мнению оппонента, представляет интерес.
4. Автор считает, что ей удалось 'уточнить используемую в дальнейшем формулировку понятия Форбуш-эффекта' В начале диссертации дается определение: "Форбуш-эффекты (ФЭ) – это изменения плотности и анизотропии космических лучей (КЛ) в крупномасштабных возмущениях солнечного ветра" (стр. 6). Хотя свойства ФЭ подробно обсуждаются в диссертации, уточненное определение явном виде не сформулировано. Его следовало бы привести в Выводах 1-ой главы и в Заключение диссертации.
5. Список цитируемой литературы составлен по алфавиту и затем пронумерован. В результате в тексте номера ссылок перемешаны, например, стр. 1: «Существует ряд работ, посвященных исследованию причин возникновения и описанию характеристик различных случаев взаимодействия возмущений СВ [например, 20-21, 65, 83-84, 131-132, 165-166, 174-175, 237, 258-259 и др.]». Это создает трудности при чтении работы.
6. С 55-56. указаны неверные номера рисунков.
7. С 61. Нет объяснения обозначений «Weak» и «Control» в двух последних столбцах таблицы 1. Не объяснено, как получены цифры в этих столбцах?
8. Встречаются неточные или неполные формулировки. На стр. 63 «Поскольку КОВ вращаются в направлении планетарного движения, высокоскоростные потоки СВ, исходящие из расположенной в центральной зоне Солнца КД достигают Земли примерно через 3-4 дня в зависимости от скорости». Автор имеет в виду, что высокоскоростной поток распространяется радиально. За время его распространения до Земли долгота силовой линии сместится относительно центральной зоны на $\approx 60^\circ$. На стр. 68: «... т.к. коронографы, например, не способны регистрировать эрупции солнечного вещества, происходящие в центральной части солнечного диска и обращенные в сторону Земли». Автор имеет в виду, что коронографы

регистрируют такие КВМ как гало. Действительно, они не могут определить направление движения КВМ, но сам факт эрупции коронографы регистрируют.

Указанные замечания можно рассматривать как рекомендации для дальнейшей работы. Они не влияют на высокую научную ценность диссертации, в которой получены новые важные результаты. В перспективе открывается широкое поле деятельности для изучения физических процессов при взаимодействии структур солнечного ветра и механизмов их совместного влияния на свойства ФЭ.

Диссертация написана специалистом, хорошо владеющим экспериментальным материалом и методами статистической обработки данных. Работа представляет собой законченное исследование, тема которого была предложена самим автором. Ею же выполнена статистическая обработка информации и формулировка полученных результатов, которые неоднократно докладывались на семинарах и конференциях и опубликованы в журналах с высоким рейтингом. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Диссертация Н.С. Шлык является научно-квалификационной работой, удовлетворяющей требованиям к кандидатским диссертациям, установленным п.9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013 г., по специальности 1.3.1 – «Физика космоса, астрономия». Автор диссертации Н.С. Шлык безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук за решение научной задачи: «Определение влияния взаимодействующих структур солнечного ветра на свойства Форбуш-эффектов космических лучей, зарегистрированных на орбите Земли».

Базилевская Галина Александровна

д.ф.-м.н., проф., г.н.с. лаборатории физики Солнца и космических лучей ФГБУН Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, 119991, Москва, Ленинский проспект, 53, тел. +7 917 537 74 69, эл адрес bazilevskayaga@lebedev.ru

12.01.2026 г.

Подпись Г.А. Базилевской удостоверяю.

Ученый Секретарь ФИАН

к.ф.-м.н.



А. В. Колобов