



Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОФИЗИКИ
Уральского отделения
Российской академии наук
(ИЭФ УрО РАН)

620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 106
Тел. (343) 267-87-96 Факс (343) 267-87-94

ОКПО 04839716 ОГРН 1026604936929
ИНН/КПП 6660007557/667101001

02 сентября 2025 г. № 16346 -01-11/252

на № _____ от _____
[Отзыв ведущей организации]

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИЭФ УрО РАН,
член-корр. РАН

В. Чистовский Чайковский С.А.

«02» сентября 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Ростунцовой Алёны Александровны **«Нелинейные волновые процессы при усилении и генерации ультракоротких импульсов в системах типа электронный поток – электромагнитная волна»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика

Диссертационная работа Ростунцовой Алёны Александровны посвящена развитию методов формирования и усиления мощных ультракоротких импульсов излучения микроволнового диапазона, формируемых при различных механизмах энергообмена в электронно-волновых системах. Такие импульсы находят применение, например, в радиолокации высокого разрешения, для диагностики плазмы, в ускорительной технике, биофизических исследованиях и в практических задачах. Диссертант анализирует подходы, основанные на перенесении в классическую электронику (систему «электронный поток – электромагнитная (ЭМ) волна») методов, известных в квантовой оптике и физике лазеров. В частности, особое внимание уделяется аналогии с квантовым эффектом сверхизлучения (СИ) Дике и явлением самоиндуцированной прозрачности. Наряду с оптимизацией процессов электронно-волнового взаимодействия в аналогичных режимах для классических систем методом компьютерных экспериментов, для дальнейшего продвижения в этом направлении используются аналитические подходы, выявляющие универсальные закономерности возникновения и эволюции как микроволновых моноимпульсов, так и их последовательностей.

Подчеркнём, что задачи по формированию и усилению коротких микроволновых импульсов обозначены в Программе фундаментальных исследований РФ на период 2021-2030 гг. в ряду основных научных направлений и ожидаемых прорывных результатов по физике. Здесь в пункте 1.3.6.2. указано «Развитие методов генерации, усиления, преобразования и приема электромагнитных волн». Таким образом, актуальность диссертационной работы Ростунцовой А.А. не вызывает сомнения.

Общая цель исследований достаточно понятна уже из названия диссертационной работы. Предполагалось сформулировать и построить автомодельные решения задач усиления и компрессии импульсов излучения при взаимодействии электронного пучка с прямой или обратной ЭМ волной. Представляла интерес «сшивка» решений на начальной и развитой стадии процесса, когда достигаются высокие значения преобразования (конверсии) мощности пучка в излучение, амплитуда волны нарастает до насыщения, а длительность импульса укорачивается. Требовалось определить и оптимизировать необходимые для этого пространственные и временные масштабы. Ставилась задача получить аналитические законы упомянутых динамических трансформаций, которые затем проверялись в компьютерном моделировании с использованием усредненных уравнений электронно-волнового взаимодействия. Данные численного расчёта характеристик ЭМ импульсов позволяют сопоставить их с аналитическими автомодельными решениями и уточнить область их применимости. Используя накопленный опыт решения нестационарных задач, аналогию с эффектами солитонного туннелирования в оптике и самоиндуцированной прозрачности, рассмотрен метод генерации последовательности коротких солитоноподобных импульсов излучения при взаимодействии изначально прямолинейного потока электронов и встречной ЭМ волны в условиях циклотронного резонанса при развитии модуляционной неустойчивости (МН). При реализации плана исследований диссертант продемонстрировала уверенное владение сложным математическим аппаратом и методами численного моделирования.

По исследуемым направлениям автором получен ряд новых результатов. В целом, защищаемые А.А. Ростунцовой положения раскрыты и доказаны в диссертационной работе. Автореферат в сжатой форме достаточно полно отражает содержание диссертации, даёт необходимое представление об использованных методах, подходах и полученных результатах. Диссертация четко структурирована, написана в хорошем стиле и в логической последовательности. Работа состоит из введения, трёх глав и заключения, в котором чётко сформулированы основные результаты работы. Во введении обоснованы актуальность темы диссертации, изложены цели и задачи, не вызывающий сомнения личный вклад автора, положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая

значимость работы. Ниже, при анализе содержания работы по главам мы выделяем результаты, которые имеют фундаментальное значение, а также важны для реализации в экспериментах новых режимов электронно-волнового взаимодействия и создания микроволновых приборов с уникальными характеристиками.

В первой главе анализируются автомодельные представления процессов усиления и пространственно-временной компрессии микроволновых импульсов при черенковском механизме взаимодействия прямолинейного электронного потока с попутной ЭМ волной в системах типа ЛБВ. Автомодельные решения уравнений нестационарной теории ЛБВ получены для приближений малого изменения энергии или малого изменения скорости электронов. В обоих случаях пиковая амплитуда ЭМ импульса линейно растёт со временем, однако степенные зависимости его длительности от времени различаются: в первом случае показатель степени $-1/2$, а во втором -2 . **Отметим** последний вариант, так как он **важен** для описания режимов с высоким коэффициентом конверсии мощности пучка в излучение. **Не меньшее значение** представляет анализ трансформации автомодельной асимптотики от первого варианта ко второму и вывод о существовании оптимального значения релятивистского параметра, при котором достигается максимум коэффициента конверсии мощности, то есть, режим её насыщения. Следует отметить, что представленные здесь и ниже **автомодельные решения** задач формирования и трансформации пиков ЭМ излучения **подтверждаются в численном моделировании** на основании систем соответствующих уравнений. **Безусловно, интересен результат** численного моделирования усиления входного импульса с частотой, отличной от частоты синхронизма, где показано, что наибольшую выходную амплитуду импульса можно получить при небольших положительных отстройках частоты, что не противоречит автомодельному решению.

Во второй главе описаны исследования автомодельного характера генерации коротких импульсов при взаимодействии электронного пучка в устройствах, где возбуждается обратная ЭМ волна. **Этот анализ заслуживает особого внимания**, поскольку к настоящему моменту источники СИ в виде релятивистских ламп обратной волны (ЛОВ) наиболее распространены и обеспечивают максимальные пиковые мощности в диапазонах миллиметровых и сантиметровых длин волн. Представлены уравнения нестационарной теории черенковского взаимодействия электронов с попутной им обратной пространственной гармоникой встречной ЭМ волны, возбуждаемой в замедляющей структуре (ЗС). Для этого случая обобщено автомодельное решение, найденное для взаимодействия электронов с попутной волной. Решение описывает

усиление и компрессию встречного ЭМ импульса; определены законы его эволюции. Найденное автомодельное решение соответствует результатам численного моделирования генерации. Показано, что конечный размер ЗС влияет на картину эволюции импульса; найдена её оптимальная длина, при которой амплитуда СИ достигает максимума, и проанализирована причина этого эффекта. **Важным представляется пример** эволюции импульсов в ЛОВ с профилированием сопротивлением связи вдоль ЗС, в том числе, секционированной, с неоднородным и однородным участками. Показано, что эволюция импульса в неоднородной секции является автомодельной. Найдено соотношение между длинами секций, при котором достигается максимальная пиковая амплитуда СИ.

На основании аналогии с режимом формирования импульса СИ в ЛОВ построена теория нестационарного взаимодействия электронного потока с попутной волной накачки и встречной рассеянной ЭМ волной, что характерно для лазера на свободных электронах (ЛСЭ). Этот режим **интересен для перспективной реализации** в эксперименте. Записаны уравнения аналитической модели такого взаимодействия, включая начальные и граничные условия, и найдено их автомодельное решение, которое для рассеянной волны представляет собой импульс, усиливающийся и сжимающийся в процессе распространения. Из представленного численного моделирования следует, что на начальном этапе, когда истощение накачки несущественно, импульс рассеянного излучения описывается автомодельным решением, как в случае ЛОВ, где его амплитуда растёт пропорционально времени. Затем решение выходит на автомодельную асимптотику, характерную для ЛСЭ, и темп роста усиливается до степенного показателя $3/2$.

Третья глава посвящена задаче по генерации последовательности коротких солитоноподобных импульсов при циклотронно-резонансном взаимодействии изначально прямолинейного электронного потока со встречной ЭМ волной. Обратим внимание, что такое взаимодействие возникает в виде побочного эффекта в релятивистских ЛОВ, но при этом в достаточно широком диапазоне отстроек по магнитному полю от точного циклотронного резонанса происходит срыв генерации (так называемое «циклотронное поглощение») из-за резкого изменения стартовых условий. В настоящей работе диссертантом продуктивно **используется концепция модуляционной неустойчивости** (МН) и аналогия с эффектом самоиндуцированной прозрачности в оптике для построения аналитической модели встречного циклотронно-резонансного взаимодействия пучка с ЭМ волной с целью демонстрации не только её циклотронного поглощения, но и других трансформаций и режимов прохождения в среде классических циклотронных электронов-осцилляторов. В частности, построенная теория МН показала, что с ростом входной

мощности полоса поглощения сдвигается в область более низких частот, и тогда **возможно незатухающее распространение волны**, что в условиях развития МН приводит к автомодуляции. В окрестности верхней границы полосы непропускания проведён анализ характера МН (конвективная или абсолютная) и найдены границы такой смены на плоскости параметров входного сигнала «амплитуда-частотная отстройка от точного циклотронного резонанса». В результате численного моделирования на основе усреднённых уравнений получено хорошее качественное соответствие с выводами аналитической теории, то есть, **выделены области циклотронного поглощения, автомодуляции и стационарного прохождения волны**. В случае автомодуляции, когда МН является абсолютной, сигнал разбивается на последовательность бегущих солитонов. Проведённое трёхмерное моделирование методом частиц в ячейке задачи о циклотронно-резонансном взаимодействии электронного потока со встречной волной подтвердило теоретические выводы о переходе между различными динамическими режимами при изменении частоты входного сигнала. Здесь также наблюдается затухание в полосе циклотронного поглощения, а с ростом частоты возможно прохождение волны и **формирование гребёнки солитонов**. При этом их последовательность близка к периодической, а пиковая амплитуда превышает амплитуду входного сигнала. С дальнейшим ростом частоты автомодуляционный режим сменяется стационарным одночастотным прохождением сигнала.

По материалам диссертационной работы имеется ряд замечаний:

1. В одном из пунктов формулировок научной новизны отмечается, что «эволюция параметров импульса СИ в процессе распространения хорошо соответствует теоретическим законам, полученным из вида автомодельного решения уравнений нелинейной нестационарной теории черенковского взаимодействия электронного пучка с обратной ЭМ волной». Уже здесь следовало бы уточнить, что синхронизм пучка обеспечивается с попутной электронам обратной пространственной гармоникой встречной волны в периодической замедляющей системе, о чём упоминается позже (стр. 47).
2. В описании автомодельного усиления ЭМ импульса при черенковском взаимодействии с попутной волной в режиме малого изменения скорости электронов (Раздел 1.4.1, стр. 30) указывается, что изменение энергии при этом может быть существенным. Здесь было бы полезно подчеркнуть, что это наиболее выражено в пределе релятивистских скоростей.
3. Возможно, следовало бы уделить больше внимания влиянию неидеальности электронных пучков (шумы, энергетические разбросы) на параметры формируемых импульсов излучения. Об этих эффектах лишь кратко упоминается на стр. 30 и 64.

4. Хотя в диссертации рассматриваются модели приборов с изначально прямолинейными пучками, в конце Раздела 2.3 (стр. 64) было бы полезно упомянуть, что на практике вариация сопротивления связи вдоль длины замедляющей системы ЛОВ возможна не только с изменением глубины гофрировки, но также за счёт профилирования диаметра трубчатого пучка в неоднородном ведущем магнитном поле.

Отмеченные замечания имеют рекомендательный характер и не влияют на общее положительное впечатление о диссертации Ростунцовой Алёны Александровны. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, где решены важные задачи развития методов получения ультракоротких микроволновых импульсов большой амплитуды и последовательностей таких импульсов. Безусловно, продемонстрированные результаты имеют важное фундаментальное и прикладное значение. Они могут быть использованы для развития исследований по радиофизике, релятивистской высокочастотной электронике, ускорительной технике и в смежных областях в ряде академических и других профильных организаций, в том числе, занимающихся практическими разработками СВЧ приборов: Институте прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН (г. Нижний Новгород), Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (г. Москва), Институте сильноточной электроники Сибирского отделения РАН (г. Томск), Институте электрофизики Уральского отделения РАН (г. Екатеринбург) и др.

Ростунцова Алёна Александровна является сложившимся специалистом в области радиофизики и высокочастотной электроники. Её высокая квалификация не вызывает сомнений. Основные результаты работы Ростунцовой А.А. представлены в пяти статьях, опубликованных в высокорейтинговых журналах, и около двадцати докладах на российских и международных конференциях. Описанные методы исследований свидетельствуют о достоверности полученных результатов.

В целом диссертационная работа Ростунцовой Алёны Александровны «Нелинейные волновые процессы при усилении и генерации ультракоротких импульсов в системах типа электронный поток – электромагнитная волна» удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям (п.п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842 с изменениями и дополнениями), а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика.

Работа заслушана и обсуждалась на расширенном семинаре лаборатории электронных ускорителей ИЭФ УрО РАН протокол № 8 от 02 сентября 2025 года.

Отзыв составил

главный научный сотрудник ИЭФ УрО РАН,
д.т.н., профессор, академик РАН
специальность ВАК 01.04.13-электрофизика
Яландин Михаил Иванович

 02.09.2025

yalandin@iep.uran.ru
тел. 343-2678785

Я, Яландин Михаил Иванович, даю согласие на обработку моих персональных данных в аттестационном деле, их размещении на сайте организации и в федеральной информационной системе государственной научной аттестации.

 Яландин М.И.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН)
620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106
Тел.: 8 (343) 267-87-96
Факс: (343) 267-87-94
E-mail: admin@iep.uran.ru

Подпись Яланина М.И. заверяю
ученый секретарь ИЭФ УрО РАН
к.ф.-м.н.



Кокорина Е.Е.