

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02),
созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук
(125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2)
от 27 апреля 2022 г.
(протокол № 7)

Защита диссертации **Макарова Сергея Станиславовича**
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
**«Изучение экстремальных гидродинамических явлений в лазерной плазме методом
когерентной рентгеновской радиографии сверхвысокого разрешения»**

Специальность 1.3.9–физика плазмы

Москва – 2022

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02), созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2)

Протокол № 7 от 27 апреля 2022 г

Диссертационный совет 24.1.193.01 (Д 002.110.02) утвержден Приказом Министерства образования и науки РФ № 105/нк от 11.04.2012 г. в составе 31 человека. На заседании присутствуют 22 человека, из них 8 докторов наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 11 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника. Дополнительно введены на разовую защиту 0 человек. Кворум имеется.

Председатель– Зам. председателя диссертационного совета 24.1.193.01

(Д 002.110.02) д.ф.-м.н., профессор Андреев Н.Е.

Ученый секретарь – ученый секретарь диссертационного совета 24.1.193.01

(Д 002.110.02) к.ф.-м.н. Тимофеев А.В.

1	ПЕТРОВ О.Ф.	академик, д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
2	АНДРЕЕВ Н.Е.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Присутствует
3	ХРАПАК А.Г.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Присутствует
4	ТИМОФЕЕВ А.В.	к.ф.-м.н.	1.3.9	Присутствует
5	АГРАНАТ М.Б.	д.ф.-м.н., с.н.с.	1.3.14	Подключен
6	АМИРОВ Р.Х.	д.ф.-м.н., с.н.с.	1.3.9	Отсутствует
7	БАЖЕНОВА Т.В.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
8	ВАРАКСИН А.Ю.	чл.-корр. РАН, профессор	1.3.14	Присутствует
9	ВАСИЛЬЕВ М.М.	д.ф.-м.н.	1.3.9	Присутствует
10	ВАСИЛЬЕВ М.Н.	д.т.н., профессор	1.3.14	Отсутствует
11	ВАСИЛЯК Л.М.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Подключен
12	ВОРОБЬЕВ В.С.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
13	ГАВРИКОВ А.В.	д.ф.-м.н., доцент	1.3.9	Отсутствует
14	ГОЛУБ В.В.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Присутствует
15	ГРЯЗНОВ В.К.	д.ф.-м.н.	1.3.14	Подключен
16	ДЬЯЧКОВ Л.Г.	д.ф.-м.н.	1.3.9	Присутствует
17	ЕРЕМИН А.В.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Присутствует
18	ЗЕЙГАРНИК Ю.А.	д.т.н., с.н.с.	1.3.14	Подключен
19	ЗЕЛЕНЕР Б.Б.	д.ф.-м.н.	1.3.9	Подключен
20	ИОСИЛЕВСКИЙ И.Л.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Подключен
21	КИВЕРИН А.Д.	д.ф.-м.н.	1.3.14	Присутствует
22	КИРИЛЛИН А.В.	д.ф.-м.н.	1.3.14	Подключен
23	ЛАГАРЬКОВ А.Н.	академик, д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
24	ЛЕВАШОВ П.Р.	к.ф.-м.н.	1.3.14	Присутствует
25	ЛОМОНОСОВ И.В.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Отсутствует
26	МЕДИН С.А.	д.т.н., профессор	1.3.14	Отсутствует
27	НОРМАН Г.Э.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Присутствует
28	ПИКУЗ С.А.	к.ф.-м.н.	1.3.9	Присутствует
29	САВВАТИМСКИЙ А.И.	д.т.н.	1.3.14	Подключен
30	ФИЛЛИПОВ А.В.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Присутствует
31	ЯНЬКОВ Г.Г.	д.т.н., с.н.с.	1.3.14	Подключен

ПОВЕСТКА ДНЯ

На повестке дня защита диссертации научного сотрудника лаборатории № 1.1 –диагностики вещества в экстремальном состоянии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) **Макарова Сергея Станиславовича** на тему «Изучение экстремальных гидродинамических явлений в лазерной плазме методом когерентной рентгеновской радиографии сверхвысокого разрешения». Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9–физика плазмы, представлена впервые. Диссертация выполнена в лаборатории № 1.1 –диагностики вещества в экстремальном состоянии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН)(125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, jiht.ru).

Научный руководитель:

Пикуз Сергей Алексеевич – к.ф.-м.н., заведующий лабораторией № 1.1 – диагностики вещества в экстремальном состоянии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук, г. Москва.

Официальные оппоненты:

Толочко Борис Петрович–гражданин РФ, д.х.н., главный научный сотрудник, заведующий лабораторией методов синхротронного излучения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук (630090, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе 18, тел. (383)332-40-02, solid.nsc.ru, email: bptolochko@solid.nsc.ru).

Попов Николай Леонидович– гражданин РФ, к.ф.-м.н., высококвалифицированный научный сотрудник лаборатории рентгеновской оптики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53, тел. 8(499)132-65-54, lebedev.ru, popovnl@lebedev.ru).

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук (630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева 15, тел. (383)333-16-12, hydro.nsc.ru, email: igil@hydro.nsc.ru).

На заседании присутствуют официальные оппоненты д.х.н. Толочко Б.П. (удаленное подключение), к.ф.-м.н. Попов Н.Л. и научный руководитель Макарова С.С. к.ф.-м.н. Пикуз С.А.

СТЕНОГРАММА

Председатель

Добрый день, уважаемые члены совета и присутствующие. Макаров Сергей Станиславович готов ознакомить нас со своей работой, но перед этим мы хотим ознакомиться с теми документами, которые позволяют ему защищаться.

Ученый секретарь

(Зачитывает данные о соискателе по материалам личного дела и сообщает о соответствии представленных документов требованиям ВАК Министерства образования и науки РФ).

Председатель

Спасибо, Алексей Владимирович. Вопросов если нет, то мы переходим к содержательной части. Пожалуйста, Сергей Станиславович, Вам 20 минут. Мы вас слушаем.

Макаров С.С.

(Выступает с докладом по диссертационной работе. Выступление не стенографируется, доклад Макарова С.С. прилагается)

Председатель

Спасибо, Сергей Станиславович. Переходим к вопросам. У кого возникли вопросы? Прошу не забывать брать микрофон для того, чтобы присутствующие дистанционно участвовали в дискуссии.

Голуб В.В.

Вы получили очень красивые качественные изображения РТ неустойчивости, несомненно, но параметром, определяющим РТ неустойчивость является число Атвуда. Как его можно было здесь посчитать и считали ли Вы его?

Макаров С.С.

Смотрите, его можно посчитать. Мы знаем, соответственно, плотности пены и нанесенных модуляций, и при подстановке оно получается порядка 0.75.

Голуб В.В.

То есть Вы как раз определяли разницу плотностей?

Макаров С.С.

Да. ρ_1 минус ρ_2 и делить на их сумму.

Голуб В.В.

И у Вас получилось как раз 0.75?

Макаров С.С.

Да.

Голуб В.В.

Спасибо.

Киверин А.Д.

У меня тоже вопрос по Релей—Тейлоровским неустойчивостям. Вы говорили о линейной стадии и уже о стадии турбулентности, но есть же переходная нелинейная стадия. Есть характерный масштаб времени, за который переходит турбулиизация в результате развития

неустойчивости. Оценки этого времени как-то согласуются с тем, что вы видели в эксперименте? Есть ли действительно турбулентная стадия или все же нет?

Макаров С.С.

Смотрите, из рентгенографических изображений видно однозначно, что мы наблюдаем турбулентную фазу. Был построен двумерный пространственный спектр, который оказался изотропным. Таким образом, мы могли применять предположения теории Колмогорова и считать, что была действительно турбулентная фаза. У нас есть каскадный режим со степенью $-5/3$, есть область перегиба до микронных масштабов.

Киверин А.Д.

Хорошо, я понял. И по последнему слайду у меня вопрос. Вы упомянули, что по результатам обработки у Вас есть неопределенность в измерении толщины фронта. Её можно как-то озвучить?

Макаров С.С.

Неопределенность заключается в том, что мы делаем оценку только сверху. У нас получились ширины фронтов несколько десятков нанометров. Мы брали область для анализа, где ударную волну можно считать плоской. Но если посмотреть на изображения, то у нас все равно фронт недостаточно плоский. В этом есть неопределенность. Мы берем данные по нескольким пикселям и это нам дает неопределенность, и мы получаем завышенное значение.

Киверин А.Д.

То есть значение от 0 до 50 нанометров?

Макаров С.С.

Да. Верхняя граница 50 нанометров.

Киверин А.Д.

Спасибо.

Норман Г.Э.

Сергей, я вот не понял зачем 15 работ. 15 работ это достаточно много результатов. Скорее всего в каких-то работах Вы выполняли техническую функцию, а основные ваши результаты отражены в меньшем числе работ. У вас там много соавторов. Ваши основные результаты, наверное, в меньшем числе работ? 15 работ — это докторская диссертация. Конечно, замечание скорее к руководителю.

Макаров С.С.

Данным направлением я занимаюсь с 2017 года, как только закончил магистратуру. Ещё 4 года аспирантуры и уже год после. За это время действительно было опубликовано такое количество работ. А по поводу большого списка соавторов в некоторых работах - дело в том, что данные эксперименты выполнялись на международных установках, где работает большой штаб ученых, каждый из которых отвечает за определенную диагностику. Поэтому мы включаем всех соавторов.

Председатель

Сергей Станиславович, мне кажется, Вы не на тот вопрос ответили. Ещё раз. Никто не сомневается, что Вы участвовали полноценно в 15-ти работах. И в качестве работы никто не сомневается. Вопрос другой – ваши основные результаты? Вы перечислили здесь 5 пунктов, они во всех 15-ти работах по кусочку или где-то есть, действительно, основные работы, в

которых отражено то, что Вы сегодня нам рассказывали? Я тоже сомневаюсь, что вряд ли результаты по 15-ти работам рассыпаны и Вы все это собрали.

Макаров С.С.

Несколько работ, около 5-6, были посвящены определению метрологических свойств детектора литий фтор. На первом этапе я занимался определением параметров данного детектора. Далее мне необходимо было произвести апробацию методики и это отдельная работа. В следующих работах было отражено применение методики как для ударных волн, так и для неустойчивостей Релея—Тейлора. Я занимался постановкой всех этих экспериментов; рассчитывал их геометрию и расстояния, на которое нужно установить детектор, чтобы наблюдать наилучшую фазово-контрастную картину; занимался анализом и обработкой, полученных результатов.

Председатель

Как я понял, широким фронтом велась работа, Генри Эдгарович.

Храпак А.Г.

Сергей Станиславович, ваша работа опирается на результаты, полученные в больших международных коллективах и это очень здорово. Как на ваш взгляд, какова перспектива подобных исследований вами или вашими коллегами в нынешней политической ситуации? Возможно продолжение или все рухнет?

Макаров С.С.

Это сложный вопрос. Не ко мне этот вопрос. Я думаю, что исследования будут проводиться, очень на это надеюсь.

Пикуз С.А.

Я потом отвечу на этот вопрос.

Макаров С.С.

Методика готова и её можно применять ко многим типам экспериментов по физике высокой плотности энергии и получать совершенно уникальные результаты.

Председатель

Я вижу, что Павел Ремирович хочет задать вопрос.

Левашов П.Р.

У меня такой вопрос. Есть метод протонной радиографии, который претендует на измерение плотности. Вы про это тоже сказали, но по графикам я не увидел прямого измерения плотности, например, для ударной волны. Можно это сделать вашим методом?

Макаров С.С.

Можно это сделать, но будет неопределенность в линейной плотности, потому что мы наблюдаем трехмерный объект и будет интегральная плотность. В теории можно, потому что функция отклика найдена и все предоставленные графики получены после её применения. Таким образом, данные могут быть интерпретированы в единицах плотности.

Левашов П.Р.

И второй вопрос. Вы изучаете турбулентность в плазме и у Вас получился, например, закон Колмогорова — Обухова со степенью $-5/3$. А все-таки есть особенность турбулентности в плазме по сравнению с турбулентностью в газе?

Макаров С.С.

Как я уже говорил в докладе, в измеренном пространственном спектре была найдена особенность в виде всплеска интенсивности. На самом деле было несколько предположений, с которыми она может быть связана, но она не описывается существующими теориями.

Председатель

Кстати, по поводу всплеска. Не на всех кривых этот всплеск есть?

Макаров С.С.

Да. Всплеска нет для референсного изображения с невозмущенной пеной и для 20 наносекунд. Он проявляется только на поздних временах, порядка 40 наносекунд, что соответствует турбулентной фазе.

Председатель

Понятно, спасибо. Еще вопросы? Онлайн вопрос. Мы слушаем.

Яньков Г.Г.

Сергей Станиславович, по поводу всплеска. Относительно колмогоровского масштаба он где примерно находится?

Макаров С.С.

Смотрите, теоретически в модели у нас получилось, что колмогоровский масштаб порядка 0.7 нанометров. Всплеск интенсивности появился на масштабах 4 микрон.

Яньков Г.Г.

То есть до колмогоровского масштаба?

Макаров С.С.

Да.

Яньков Г.Г.

Спасибо.

Вараксин А.Ю.

Сергей Станиславович, очень интересный результат по неустойчивости Релея—Тейлора. Вопрос такой – число Рейнольдса это важнейший параметр для турбулентных потоков и ламинарных тоже, вами были приведены значения. Поясните, как Вы их получали и почему они такие большие? У вас же наномасштабы? Там со скоростями что-то происходит? Поясните.

Макаров С.С.

По рентгенографическим изображениям мы смотрели за положением границы плазменного потока и знали плотность пены, температуру, а также скорость струи. Далее из модели мы по формуле получали число Рейнольдса.

Вараксин А.Ю.

Что в эту формулу входит?

Макаров С.С.

Скорость струи.

Вараксин А.Ю.

Сколько она по порядку?

Макаров С.С.

Порядка 5 км/с. 5.7 км/с, если быть точным.

Вараксин А.Ю.

И второй небольшой вопрос о выводах, касающихся спектров. Турбулентность и её спектр — это понятия локальные в какой-то точке. Поскольку у вас структура периодическая, поясните тогда смысл вашего спектра. Он измерен в каждой точке?

Макаров С.С.

Выбиралась область, в которой проводился спектральный анализ, соответствующая размеру 512 на 512 пикселей, но для сравнения была выбрана, и большая область. Качественно был получен абсолютной такой же спектр. Это говорит о том, что мы выбрали правильную область для анализа.

Председатель

То есть было некое усреднение. Спасибо. Еще вопросы есть? Да, Павел Ремирович.

Левашов П.Р.

У меня последний вопрос. Можно сделать вашу диагностику в России?

Макаров С.С.

Нам необходим рентгеновский лазер.

Левашов П.Р.

Какая перспектива?

Макаров С.С.

Насколько я понимаю, он разрабатывается. Самое важное это то, что на экспериментальную станцию необходимо установить еще оптический лазер, чтобы проводить эксперименты «накачка-зондирование». Оптическим излучением накачивать вещество, а зондировать рентгеновским лазером.

Председатель

Как минимум нужно пару лазеров, один из которых рентгеновский, а нагревающий несколько джоулей, как мы видели.

Макаров С.С.

Да.

Председатель

Хорошо, спасибо. Еще есть вопросы? Мы можем констатировать бурный интерес вызвала работа. Сергей Алексеевич, пожалуйста, ваше слово о соискателе.

Пикуз С.А.

Конечно, о соискателе и, возможно, еще с некоторым ответом на предыдущие вопросы.

Председатель

Да, кстати. Уже поступило несколько вопросов о том, как Вы видите будущее таких работ и международного научного сотрудничества?

Пикуз С.А.

Коллеги, ситуация действительно такая, что эта работа базируется на международном сотрудничестве как с Европой, так и с Японией. Многое, что было сделано в рамках диссертационной работы, было нацелено на участие России в крупных международных проектах, в том числе и официальном участии. Эта деятельность записана сейчас в программе работ Российской Федерации на Европейском XFEL в Гамбурге, где Россия имеет долю в проекте и его по-прежнему финансирует.

(Обсуждение членами Совета вопросов, не связанных с защитой диссертации).

Председатель

Возвращаемся к процедуре.

Пикуз С.А.

Сразу хочу отметить глубокую мотивацию и острый интерес Сергея Станиславовича в занятии исследовательской деятельностью. О многом говорит история появления Сергея в нашем коллективе. Во время своей учебы на физическом факультете МГУ, после распределения на кафедру в НИИЯФ, он себя сразу же проявил таким образом, что руководству кафедры стало понятно, что удовлетворить страсть Сергея в занятии наукой они, наверное, в полной мере, не смогут. И связалась со мной, предложив привлечь такого студента к нашей деятельности в ОИВТ. Это уже многое говорит о настрое Сергея, как молодого ученого. Действительно за это время 7-ми лет Сергей занимался сначала одной тематикой, связанной с лазерным ускорением частиц, потом переключился на деятельность, связанную с рентгеновскими лазерами на свободных электронах. Здесь он себя проявил как быстро обучаемый человек, способный взаимодействовать с огромной международной коллаборацией и самостоятельно это делать. Однозначно могу сказать, что как самостоятельный ученый он точно сформировался, более того в большом количестве публикаций, которые представлены по диссертации, Сергей по-настоящему был мотором, который двигал все статьи вперед.

Председатель

А по-японски говорит?

Пикуз С.А.

Нет. У нас никто в коллективе не говорит, несмотря на наше тесное сотрудничество с ними.

Пикуз С.А.

Когда говорят, что вклад диссертанта определяющий, то в плане диссертации без Сергея половины этих статей просто не было бы. Некому было бы так всех так активно привлекать к этой деятельности. Считаю, что он сформировавшийся ученый важный для нас и страны в целом. Если мы будем продолжать тематику развития исследований по физике высокой плотности энергии с использованием рентгеновских лазеров на свободных электронах, то Сергей это тот человек, который может двигать эту тему вперед. Остальные формальные вопросы о работе и квалификации Сергея Станиславовича я отразил в своем отзыве. По моему мнению диссертант однозначно заслуживает присуждения степени кандидата наук.

Норман Г.Э.

Вопрос можно?

Председатель

Да.

Норман Г.Э.

А как учился Сергей на физфаке?

Макаров С.С.
Красный диплом.

Председатель

Алексей Владимирович давайте перейдем к письменным отзывам.

Ученый секретарь

Уважаемые коллеги, в деле имеется **отзыв от ведущей организации**. В качестве ведущей организации выступал институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук. Подписан отзыв ведущим научным сотрудником лаборатории физики взрыва к.ф.-м.н. Константином Алексеевичем Теном, заверен ученым секретарем Хе Александром Канчеровичем и утвержден директором института Ерманюком Евгением Валерьевичем. Отзыв положительный с замечаниями. Отзыв содержит: оценку актуальности работы, описание научной новизны, научной и практической значимости, анализ содержания работы, описание апробации результатов и публикации, общую оценку работы. С вашего позволения зачитывать полностью отзыв не буду. Перехожу к замечаниям:

По содержанию диссертации можно задать ряд вопросов и замечаний

- Глава 2. Как зависит пространственное разрешение от глубины считывания?
- Глава 3. Ничего не сказано о свойствах пены, в которой развиваются неустойчивости (размеры пор и их равномерность).
- Глава 4. Можно ли использовать LiF для измерения поглощения (при уменьшении пространственного разрешения)?

Указанные замечания не умаляют ценности работы и не снижают достоинства диссертационного исследования. На основании вышеизложенного можно заключить, что диссертационная работа Макарова Сергея Станиславовича «ИЗУЧЕНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ МЕТОДОМ КОГЕРЕНТНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ РАДИОГРАФИИ СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ» по уровню выполнения, объёму, актуальности, новизне и значимости полученных результатов представляет собой полноценное законченное научное исследование. Удовлетворяет требованиям положения о порядке присуждения научных степеней по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

Кроме того, было получено 3 отзыва на автореферат.

Первый отзыв поступил из Федерального исследовательского центра Института прикладной физики Российской академии наук от заведующего лабораторией моделирования плазменных явлений в экстремальных астрофизических объектах, доктора физ.-мат. наук Стародубцева Михаила Викторовича. Отзыв положительный с замечаниями:

- не хватает обсуждения возможных причин проявления локальной немонотонности в наблюдаемом турбулентном пространственном спектре, представленном в Главе 3.
- не хватает описания в тексте явных выводов к рисунку 3, на котором представлен результат измерения каустики сфокусированного пучка рентгеновского лазера на свободных электронах с использованием детектора LiF.

Второй отзыв получен из Всероссийского научно-исследовательского института технической физики имени академика Евгения Ивановича Забабахина. Отзыв от старшего научного сотрудника кандидата физ.-мат. наук Говраса Евгения Александровича. Отзыв положительный с замечаниями:

- на странице 4 говорится о «пикосекундных установках мегаджоульного уровня». Скорее всего, здесь содержится опечатка, так как установки такого класса имеют наносекундную длительность импульса.
- при описании экспериментальных работ по неустойчивости Релея-Тейлора не приведены данные по геометрии расположения источника просветки, объекта и детектора. Вопрос правильного выбора геометрии и увеличения критически важен, особенно когда речь идет

об объектах столь малых размеров. По этой причине данную информацию следовало привести в тексте.

- из анализа рисунка 5 следует, что при непосредственном участии автора была получена многокадровая съемка гидродинамического течения с шагом между кадрами до 10 нс. Вообще говоря, это является достаточно впечатляющим результатом. Но при этом совсем не обсуждаются вопросы времени высвечивания использованного кристалла LiF и снятия изображений с такой высокой частотой.
- на стр. 13 сказано, что развитая методика диагностики пучков рентгеновских лазеров с использованием детекторов LiF была апробирована на Европейском РЛСЭ, однако не упомянуты полученные результаты, а дана лишь ссылка на рисунок 3 (б,в). Стоило отразить в тексте автореферата основные выводы по данному вопросу.

Третий отзыв был получен из Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» от директора Института лазерных и плазменных технологий, профессора, доктора физ.-мат. наук Кузнецова Андрея Петровича. Отзыв положительный с замечанием:

- встречаются ошибки и опечатки в тексте.

На этом закончились замечания, указанные в отзывах на автореферат.

Председатель

Спасибо большое, Алексей Владимирович. Сергей Станиславович, пожалуйста. Если можно что-то суммировать, то суммируйте, но в любом случае постарайтесь ответить.

Макаров С.С.

Начну я с ответов на вопросы от **ведущей организации**.

Первый вопрос был по поводу зависимости глубины считывания и пространственного разрешения. На него я могу ответить следующим образом:

Данные величины зависят от апертуры в лазерном сканирующем конфокальном микроскопе. В моем исследовании я использовал наименьшую апертуру, которая обеспечивала глубину считывания порядка одного микрона слоя вещества, а пространственное разрешение составляло порядка 0.25 микрон.

Второй вопрос был задан по поводу возможности использования данного детектора для определения плотностей исследуемого объекта. Как я уже говорил в ответе на предыдущие вопросы, это возможно, поскольку была определена функция отклика и можно строить карты плотности.

Третий вопрос по поводу свойств пены. Использовалась пена, как я говорил, плотностью 200 мг/см³, а размеры пор соответствовали нескольким сотням нанометров. В тексте автореферата я этого не указал.

Теперь перейду к **ответам на замечания к тексту автореферата**. Я с ними согласен. Не совсем подробно я некоторые аспекты осветил, поскольку был ограничен общим объемом автореферата и не все было описано. В частности, где-то давались ссылки на рисунок и в тексте не было описано основных результатов по нему, но в подписях это было дано.

По поводу многокадровой съемки. У нас задержка между оптическим лазером и зондирующим рентгеновским лазером составляла масштаб наносекунды. Таким образом, у нас происходила многокадровая съемка. Далее образец доставался из камеры и на конфокальном микроскопе считывался, то есть изображения получались не в режиме онлайн.

Председатель

Я так понимаю, что была не покадровая съемка, а получались изображения в разных импульсах? Вопрос был о том, как релаксирует ваш детектор за наносекунду, а этого нет как раз потому, что это не покадровая съемка.

Макаров С.С.

Да. По-моему, я на все замечания ответил.

Председатель

Хорошо, спасибо. Тогда мы переходим к заслушиванию оппонентов. Первый оппонент у нас Борис Петрович Толочко (онлайн). Вы нас слышите, Борис Петрович?

Толочко Б.П.

Да.

Председатель

Будьте любезны. Мы готовы вас заслушать.

Толочко Б.П.

Спасибо. С позволения уважаемого диссертационного совета полностью зачитывать отзыв не буду.

Председатель

Да, конечно. Мы с работой уже ознакомились. Ваше мнение?

Толочко Б.П.

Я работаю с синхротронным излучением и являюсь заведующим лабораторией синхротронного излучения в Институте химии твердого тела. Результаты, который получил Сергей Станиславович, считаю очень важными, нужными, актуальными. В частности, хочу сказать несколько слов по научной новизне. Предложена и апробирована методика регистрации фазово-контрастных рентгеновских изображений гидродинамических явлений в лазерной плазме со сверхвысоким разрешением. Здесь очень важна методическая часть, которую Сергей Станиславович проработал и то, что он впервые с субмикронной точностью экспериментально наблюдал неустойчивости Рэлея-Гейлора и ударно-волновые процессы. Мы с детектором литий фтор знакомы, видели его высокое разрешение, но методически этот вопрос нами не был проработан, поэтому то, что сделал Сергей Станиславович очень важно. Это вклад в развитие исследований на рентгеновских лазерах на свободных электронах и очень важная научная часть. Еще очень хотел отметить, что как уже обсуждалось, было опубликовано 15 работ. Было видно в обсуждениях с Сергеем, когда мы с ним общались онлайн и когда он выступал в институте гидродинамики, я также слушал его доклад, задавал вопросы и было видно, что он действительно участвовал во всех этих экспериментах. Отвечал правильно на вопросы, на которые нет ответа ни в диссертации, ни в автореферате. Он чувствует руками этот эксперимент и видно, что его личный вклад абсолютно очевиден. Тем не менее есть замечания, непринципиальные, но они встают в связи с тем, что описывается результат и методика без объяснений.

Первое замечание: на странице 34 автор описывает эксперимент с использованием синхротронного источника Soleil для определение метрологических характеристик флуоресцентных кристаллических детекторов. В частности, автор пишет: «Поток фотонов, падающих на детектор LiF, измерялся до и после каждого облучения диодом». Зачем делалось эти два измерения? Для стабильного источника излучения достаточно одного измерения. На этот вопрос автор не дает ответа. Кроме того, автор не объясняет процедуру обработки этих двух измерений.

Второе замечание: на странице 34 автор описывает метрологический эксперимент по набору дозы кристаллом LiF. Автор не указал точность измерения дозы (ошибку измерений), что чрезвычайно важно для метрологических экспериментов.

Третий вопрос уже звучал, но у меня он немножко в другой постановке: в эксперименте по исследованию процесса распространения лазерно- индуцированной ударной волны в твердом веществе (Рисунок 4.4) для получения одной рентгенограммы, например при $t=3$ нс, требуется один кристалл алмаза, который после ударного воздействия полностью разрушается. Следовательно, для получения 5-ти рентгенограмм (при $t=3, 5, 8, 10, 12$ нс) требуется 5 кристаллов алмаза. Автор не обосновал как можно «сшить» данные, полученные на 1-м кристалле с данными от 4-х других кристаллов.

И четвертый вопрос: лазерно-индуцированная ударная волна должна иметь сферическую форму, однако на рентгенограммах Рисунка 4.4 при $t=3$ нс она несферическая. Автор не объясняет это явление.

Все перечисленные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей значимости диссертационной работы. Диссертация Макарова Сергея Станиславовича представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9-11 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г. (ред.11.09.2021г.), а ее автор Макаров Сергей Станиславович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 - физика плазмы.

Спасибо, я закончил.

Председатель

Спасибо, Борис Петрович. Пожалуйста, Сергей, ваше слово для ответа.

Макаров С.С.

Сначала я отвечу на методические вопросы.

Первый был посвящен причине измерения потока и фотодиодом, и детектором LiF. Это было сделано для того, чтобы убедиться в стабильности пучка. Поскольку это не составляло труда и детекторы были на моторизированной подставке. Мы измеряли поток до и после облучения, чтобы удостовериться, что пучок у нас не пропал.

По поводу определения погрешностей. Они соответствуют 10 % по дозе, поскольку энергия пучка флуктуировала, исходя из данных, предоставленных людьми с установки.

По поводу того, как мы сшивали данные с разных кристаллов. У нас был целый набор кристаллов и для каждого из времен делалось несколько независимых выстрелов. Соответственно, мы набирали статистику для каждого времени, поскольку энергия оптического лазера могла флуктуировать. Мы делали для каждого измерения от 3-х до 5-ти экспозиций и выбирали наиболее близкие по энергии, чтобы их сшить.

И по поводу сферичности ударной волны. Я показывал на слайде пространственный профиль оптического пучка. Он был задан так, чтобы было плато по интенсивности. Таким образом, у нас волна была несферической, как должно быть при использовании обычного гауссова пучка.

Председатель

Спасибо. Мы переходим к мнению второго оппонента. Это у нас Попов Николай Леонидович. И мы имеем возможность услышать Вас очно. Вам, наверное, нужно взять мой микрофон?

ПоповН.Л.

Спасибо. Я тоже пропущу содержание работы.

Отмечу только, что в Главе 2 исследуются регистрирующие характеристики детектора литий фтор. Приводится методика определения дозового распределения внутри сфокусированного пучка рентгеновского лазера. Эта методика может применяться в различных научных центрах с целью контроля интенсивности излучения в поле исследуемого объекта при проведении экспериментов по физике высокой плотности энергии.

Актуальность темы диссертации Макарова Сергея Станиславовича не вызывает сомнений и четко описана в тексте работы. Появление рентгеновских лазеров на свободных электронах

открыло принципиально новые возможности для метода когерентной радиографии в исследованиях по физике высоких плотностей энергии. Используемое излучение таких установок позволяет проникать в плотные материалы и регистрировать даже малые изменения плотности на масштабах нескольких фемтосекунд. Тем самым создаются уникальные возможности для того, чтобы изучать с высокой точностью процессы и явления, происходящие внутри вещества, недоступные как для оптического излучения, так и рентгеновского излучения лазерной плазмы. Экспериментальные исследования эволюции гидродинамических явлений, полученные в контролируемых лабораторных условиях, чрезвычайно важны для решения различных существующих проблем в области физики плазмы, получения уравнений состояния вещества, астрофизики и управляемого термоядерного синтеза.

Диссертация представляет из себя цельное и законченное научное исследование. Изложение материалов в диссертации выполнено на высоком уровне. В конце каждой главы сделаны четкие выводы, отражающие основные результаты проведенных исследований. Стоит отметить хорошее владение автором научных терминов и приятную для чтения манеру подачи материала. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертационной работы. Тем не менее есть несколько замечаний:

- В названии диссертации отражено, что исследование в работе выполняется с использованием методики когерентной рентгеновской радиографии сверхвысокого разрешения. Однако в некоторых частях работы используются фразы “методика когерентной фазово-контрастной радиографии” (например, стр. 14, 67, 91), “методика фазово-контрастной радиографии” (например, стр. 6, 9, 31), “методика когерентной рентгеновской радиографии” (например, стр. 9, 103). На мой взгляд, необходимо было бы выбрать и использовать одно название методики по всему тексту, либо уточнить отличия, если они есть. Иначе оказывается не вполне понятно, отличается ли “когерентная рентгеновская радиография” от “когерентной фазово-контрастной методики”.

- В Главе 3 полученные в эксперименте данные по развитию неустойчивости Рэлея-Гэйлора сравниваются со статистической теорией Колмогорова. Делается предположение, что наблюдаемая в эксперименте турбулентность однородна и изотропна. В частности, на рисунке 3.19 производится сравнение измеренного пространственного спектра только с колмогоровским спектром. Хотелось бы также видеть сравнение с другими теориями развития турбулентности. В пункте 3.2.5 обсуждаются результаты спектрального анализа для радиографических данных, полученных с использованием мишени с двойными модуляциями поверхности (рисунок 3.16). Было бы полезно сравнить пространственные спектры с данными от мишени с “мономодулированной поверхностью” (рисунок 3.14) для более качественного анализа.

- В пункте 4.4 описываются результаты оценки ширины передних фронтов наблюдаемых в эксперименте ударных волн в алмазе. Стоит отметить, что на рентгенографических изображениях, полученных на детекторе LiF наблюдается проекция этих волн и поэтому измеренная ширина фронтов по данным картинам будет заведомо больше истинной, поскольку в эксперименте волны сферические. Учитывался ли этот факт при численных расчетах программным кодом WavePropagator и дальнейшем сравнении с экспериментом?

- Некоторые рисунки содержат англоязычные обозначения и фразы. В работе встречаются пунктуационные и орфографические ошибки, а также опечатки (например, повтор номера формулы 3.1 на страницах 76 и 78). Однако, они не затрудняют восприятие диссертации.

Указанные замечания носят рекомендательный характер и не снижают достоверность полученных результатов и общей значимости диссертационной работы. Работа соответствует всем требованиям и критериям для присуждения ученых степеней, а ее автор Макаров Сергей Станиславович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности физика плазмы.

Председатель

Спасибо, Николай Леонидович. Сергей, пожалуйста, Вам время для ответов.

Макаров С.С.

Начну я с первого вопроса по поводу использования фразы когерентная рентгеновская радиография и фазово-контрастная рентгенография. Согласен, что стоило более точно указывать это в тексте диссертации.

По поводу оценки на ширину фронтов. Я уже отвечал на это замечание в одном из предыдущих вопросов.

Также было замечание, связанное со сравнение экспериментальных данных с колмогоровским спектром. Как я уже говорил в ответе на один из предыдущих вопросов, я производил двумерный спектральный анализ, из которого было однозначно получено, что наблюдаемый спектр изотропен и поэтому мы его сравнивали с колмогоровским спектром.

По поводу того, что не был выполнен спектральный анализ данных для мишеней с мономодуляциями. Это было связано с тем, что для них проявлялась турбулентность на более поздних временах и, по сути, было только два экспериментальных времени с турбулентностью. Поэтому для анализа использовались данные, полученные с бимодулированной мишенью.

У меня все.

Председатель

Спасибо. Мы переходим к дискуссии. Есть желающие высказаться?

Норман Г.Э.

Нет предмета для дискуссии.

Председатель

Это как теперь воспринимать?

Норман Г.Э.

Положительно.

Председатель

Спасибо. Позвольте, я тогда скажу, если это общее мнение совета, что всем все ясно.

Ученый секретарь

Николай Евгеньевич, еще хочет высказаться Леонид Михайлович.

Председатель

Да, пожалуйста, Леонид Михайлович. Мы увидели ваше желание высказаться.

Василяк Л.М.

Уважаемые коллеги, я предварительно прочитал диссертацию и автореферат, поскольку мне давали отзыв предварительно. И мое мнение хорошее об этой работе, поскольку сделана уникальная диагностика. С моей точки зрения даже самой диагностики и её апробации какими-нибудь измерениями было бы достаточно, чтобы получилась полноценная диссертация. Однако автор на этом не остановился и сделал два уникальных эксперимента. Получил очень интересные результаты. Более того он сделал моделирование. Если посмотреть на диагностику, то у нее 10^7 динамический диапазон и именно он позволяет регистрировать такие объекты. Замечание по поводу большого количества авторов в публикациях – дело в том, что диагностика, которая была сделана, требует привлечения дополнительной аппаратуры, создания мишеней и деталей. Поэтому понятно, что все те люди, которые чувствовали в этом, однозначно являются соавторами статей, но полученные результаты точно также однозначно являются достижением автора диссертации. Поэтому не вижу никакого противоречия. Предлагаю членам ученого совета поддержать диссертацию. С моей точки зрения автор,

конечно, очень высокого профессионального уровня и мы должны положительно оценить работу. Спасибо

Председатель

Спасибо, Леонид Михайлович. Я так понял, у нас кто-то еще тянул руку? Нет? Тогда мне кажется, что ситуация ясная. Мы можем перейти к голосованию. У нас еще должно быть заключительное слово перед проведением голосования. Пожалуйста, Сергей Станиславович.

Макаров С.С.

В первую очередь я, естественно, хотел бы поблагодарить своего научного руководителя и Пикуз Татьяну Александровну, которые помогли в становлении моей личности как научного сотрудника. Также хотел бы поблагодарить коллег в лице Сергея Дьячкова, Василия Викторовича Жаховского и Наиля Алимовича Иногамова, с которыми мы к слову сказать познакомились на конференции Эльбрус, проводимой нашим институтом. Там я показал им полученные рентгенографические изображения и у нас состоялась коллаборация по обсуждению и анализу данных, представленных в диссертации. Хочу также отметить помощь Алексея Бузмакова, который обучил меня пользоваться кодом WavePropagator, автором которого он является. Отдельно хотел бы поблагодарить Черняева Александра Петровича и Варзара Сергея Михайловича с моей кафедры в МГУ, благодаря которым стала возможна кооперация с Сергеем Алексеевичем — моим научным руководителем в ОИВТ РАН. Спасибо.

Председатель

Хорошо. Теперь мы можем переходить к голосованию. Мы поступаем также, как и с предыдущей защитой, Алексей Владимирович?

Ученый секретарь

Дорогие коллеги, так как заседание у нас проводится в комбинированном, дистанционном режиме, то голосование проводится с помощью телекоммуникационной системы у нас на сайте. Голосуйте в том же режиме, но уже за диссертацию Сергея. Если возникают вопросы, то, пожалуйста, связывайтесь со мной, но все по аналогии с предыдущей диссертацией.
(Проводится процедура тайного голосования).

Председатель

Уважаемые члены совета, Алексей Владимирович ознакомит нас с результатами голосования.

Ученый секретарь

Дорогие коллеги, голосование завершилось. У нас сегодня участвовало 13 членов диссертационного совета очно, 9 дистанционно, всего 22. По профилю очно – 5, дистанционно – 3, всего 8. Получено 22 голоса в нашей системе: 22 — за, 0 — против, 0 — воздержавшихся. Прошу утвердить результаты голосования поднятием рук очно. Дистанционно, если есть возражения, просьба их озвучить. Кто против? Кто воздержался? Никого против и воздержавшихся нет. Тогда считаем утвержденным результаты голосования.
(Результаты голосования приняты единогласно).

Председатель

Спасибо, Алексей Владимирович. Результаты голосования утверждены. Давайте поздравим соискателя.

У нас остался один пункт: проект заключения. *(Члены диссертационного совета обсуждают проект заключения).* Исчерпались пожелания-замечания? Тогда предлагаю проголосовать за это заключение. Кто за? Против нет? Нет. Кто воздержался? Нет. Спасибо, принято единогласно. Всем спасибо.

(Проект заключения принят единогласно). Повестка исчерпана. Спасибо.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.193.01 (Д 002.110.02), СОЗДАННОГО
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
НАУКИ ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 27.04.2022г. протокол № 7

О присуждении Макарову Сергею Станиславовичу, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Изучение экстремальных гидродинамических явлений в лазерной плазме методом когерентной рентгеновской радиографии сверхвысокого разрешения» в виде рукописи по специальности 1.3.9— физика плазмы принята к защите 24.02.2022г., (протокол заседания № 4) диссертационным советом 24.1.193.01 (Д 002.110.02), созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр.2, jiht.ru, (495) 485-8345), утвержденного Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации № 105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель Макаров Сергей Станиславович 1993 года рождения, в 2017 году окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова».

В 2021 году окончил очную аспирантуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова».

Работает в должности научного сотрудника лаборатории №1.1. – диагностики вещества в экстремальном состоянии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук.

Диссертация выполнена в лаборатории №1.1. – диагностики вещества в экстремальном состоянии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук.

Научный руководитель кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией №1.1. – диагностики вещества в экстремальном состоянии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук Пикуз Сергей Алексеевич.

Официальные оппоненты:

- доктор химических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией методов синхротронного излучения Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук» Голочко Борис Петрович;

- кандидат физико-математических наук, высококвалифицированный научный сотрудник лаборатории рентгеновской оптики Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук» Попов Николай Леонидович

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук» в своем положительном заключении, составленном ведущим научным сотрудником

лаборатории физики взрыва, кандидатом физико-математических наук Теном Константином Алексеевичем и утвержденном директором ИГиЛ СО РАН д.ф.-м.н. Ерманюком Е.В., указала, что среди наиболее значимых научных результатов, имеющих как прикладную так и фундаментальную значимость, можно выделить следующие:

1. Впервые с высокой точностью получены экспериментальные данные по определению функций отклика и пространственного разрешения, а также радиационной устойчивости детектора LiF при воздействии пучков как традиционных синхротронных источников, так и рентгеновских лазеров на свободных электронах.
2. Впервые с субмикронной точностью экспериментально визуализировано и исследовано развитие неустойчивостей Рэлея-Тейлора в лазерно-индуцированной наносекундной плазме вплоть до турбулентной фазы. До сегодняшнего дня данная область не имела экспериментальных радиографических исследований с таким временным и пространственным разрешением.
3. Прямым методом впервые экспериментально зарегистрирована с микронной точностью и исследована динамика развития волновой структуры «упругий предвестник – пластическая ударная волна» в алмазе.
4. Развита методика фазово-контрастной когерентной рентгенографии сверхвысокого разрешения открывает новое направление по регистрации малоконтрастных объектов во многих веществах.

Также были отмечены следующие отличительные особенности диссертационной работы:

1. Данная работа имеет большое методическое значение. В ней задаются два новых экспериментальных направления: дальнейшая разработка рентгеновских детекторов с микронным разрешением и постановка гидродинамических экспериментов с использованием рентгеновских лазеров фемтосекундным временным разрешением.
2. Автором развита и впервые применена методика фазово-контрастной рентгеновской радиографии сверхвысокого разрешения, которая была применена для исследования гидродинамических явлений в наносекундной лазерной плазме и твердом веществе.
3. Автором организована огромная кооперация научных сотрудников ведущих организаций (по источникам излучения и детекторам) в мире. При проведении экспериментов использовались самые передовые установки в мире на данное время. Такая кооперация предполагает большие способности к общению и работе в многонациональном коллективе.

Отмечено, что разработанные в работе методики и полученные результаты могут быть использованы в ряде организаций и научных центров, осуществляющих исследования по физике высокой плотности энергии, таких как ИГиЛ СО РАН, НИЦ «Курчатовский институт», РФЯЦ-ВНИИЭФ, РФЯЦ – ВНИИТФ, ФГУП «ВНИИА», НИЯУ МИФИ, ОИВТ РАН и др. для рентгеновской радиографии и исследования гидродинамических явлений в плазме.

Соискатель имеет 15 опубликованных работ в рецензируемых научных журналах по теме диссертации. Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались лично автором и обсуждались на 14-ти всероссийских и международных конференциях.

Основные работы:

1. Rigon G., Albertazzi B., Pikuz T., Mabey P., Bouffetier V., Ozaki N., Vinci T., Barbato F., Falize E., Inubushi Y., Kamimura N., Katagiri K., Makarov S., Manuel M. J.-E., Miyanishi K., Pikuz S., Poujade O., Sueda K., Togashi T., Umeda Y., Yabashi M., Yabuuchi T., Gregori G., Kodama R., Casner A., Koenig M. Micron-scale phenomena observed in a turbulent laser-produced plasma // Nature communications. — 2021.—V. 12.—2679.

2. Makarov S.S., Pikuz T.A., Buzmakov A.V., Chernyaev A.P., Mabey P., Vinci T., Rigon G., Albertazzi B., Casner A., Bouffetier V., Kodama R., Katagiri K., Kamimura N., Umeda Y., Ozaki N., Falize E., Poujade O., Togashi T., Yabashi M., Yabuuchi T., Inubushi Y., Miyanishi K., Sueda K., Manuel M., Gregori G., Koenig M., and Pikuz S.A. X-ray radiography based on the phase-contrast imaging with using LiF detector//Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2021.—V.1787.—012027.
3. Filippov E.D., Makarov S.S., Burdonov K.F., Yao W., Revet G., Béard J., Bolaños S., Chen S.N., Guediche A., Hare J., Romanovsky D., Skobelev I.Yu., Starodubtsev M., Ciardi A., Pikuz S.A., and Fuchs J. Enhanced x-ray emission arising from laser-plasma confinement by a strong transverse magnetic field // Scientific reports.— 2021.—V. 11.—8180.
4. Bonfigli F., Hartley N. J., Inubushi Y., Katagiri K., Koenig M., Matsuoka T., Makarov S., Montekali R. M., Nichelatti E., Ozaki N., Piccinini M., Pikuz S., Pikuz T., Sagae D., Vincenti M. A., Yabuuchi T. Photoluminescent radiation-induced color centers in lithium fluoride for detection of pulsed 10 keV XFEL beam // IL NUOVO CIMENTO C. — 2021.—V. 44.—146.
5. Makarov S.S., Pikuz T.A., Buzmakov A.V., Hayashi Y., Fukuda Y., Kando M., Daido I., Kotaki H., Lu X., Jie F., Alkhimova M.A., Ryazantsev S.N., Skobelev I.Yu., and Pikuz S.A. Properties of laser beam passed through cluster plasma studied with diffraction pattern method // Journal of Physics: Conference Series.— IOP Publishing, 2020.—V.1556.—012007.
6. Макаров С.С., Жвания И.А., Пикуз С.А., Пикуз Т.А., Скобелев И.Ю. Исследование параметров высокоинтенсивных тепловых и когерентных рентгеновских источников с помощью кристаллов фторида лития (обзор) // Теплофизикавысоких температур.— 2020. —Т. 58. — №. 4. — С. 670–688.
7. Makarov S., Pikuz S., Ryazantsev S., Pikuz T., Buzmakov A., Rose M., Lazarev S., Senkbeil T., von Gundlach A., Stuhr S., Rumancev Ch., Dzhigaev D., Skopintsev P., Zaluzhnyy I., Viehhaus J., Rosenhahn A., Kodama R., Vartanyants I. A. Soft x-ray diffraction patterns measured by a LiF detector with sub-micrometre resolution and an ultimate dynamic range // Journal of Synchrotron Radiation. — 2020. —V. 27.—P. 625-632.
8. Khair B., Revet G., Ciardi A., Burdonov K., Filippov E., Béard J., Cerchez M., Chen S. N., Gangolf T., S. S. Makarov, Ouillé M., Safronova M., Skobelev I. Yu., Soloviev A., Starodubtsev M., Willi O., Pikuz S., and Fuchs J. Laser-produced magnetic-rayleigh-taylor unstable plasma slabs in a 20 T magnetic field // Physical Review Letters— 2019.— V. 123.— 205001.
9. Макаров С.С., Пикуз С.А., Черняев А.П. In-situ измерение профиля сфокусированного пучка синхротронного излучения флуоресцентным детектором с динамическим диапазоном 10^6 // Ученыезаписки физического факультета Московского Университета. — 2019. — №. 1.—1910401.
10. Mabey P., Albertazzi B., Michel Th., Rigon G., Makarov S., Ozaki N., Matsuoka T., Pikuz S., Pikuz T., Koenig M. Characterization of high spatial resolution lithium fluoride x-ray detectors // Review of Scientific Instruments— 2019. — V. 90.— 063702.
11. Bonfigli F., Hartley N., Inubushi Yu., Koenig M., Matsuoka T., Makarov S., Montekali R. M., Nichelatti E., Ozaki N., Piccinini M., Pikuz S., Pikuz T. A., Sagae D., Vincenti M. A., Yabashi M., Yabuuchi T. Photoluminescence properties and characterization of lif-based imaging detector irradiated by 10 keVXFEL beam// SPIE Proceedings. — 2019. —V. 11035.—110350N.
12. Pikuz T., Faenov A., Ozaki N., Matsuoka T., Albertazzi B., Hartley N. J., Miyanishi K., Katagiri K., Matsuyama S., Yamauchi K., Habara H., Inubushi Y., Togashi T., Yumoto H., Ohashi H., Tange Y., Yabuuchi T., Yabashi M., Grum-Grzhimailo A.N., Casner A., Skobelev I.Yu., Makarov S., Pikuz S., Rigon G., Koenig M., Tanaka K. A., Ishikawa T., Kodama R. Development of new

diagnostics based on lif detector for pump-probe experiments//Matter and Radiation at Extremes.— 2018.— V. 3.—P.197–206.

13. Faenov A.Y., Pikuz T.A., Mabey P., Albertazzi B., Michel Th., Rigon G., Pikuz S.A., Buzmakov A., Makarov S., Ozaki N., Matsuoka T., Katagiri K., Miyanishi K., Takahashi K., Tanaka K.A., Inubushi Y., Togashi T., Yabuuchi T., Yabashi M., Casner A., Kodama R., Koenig M. Advanced high resolution x-ray diagnostic for HEDP experiments // Scientific report 2018. — V. 8.— 16407.
14. Макаров С.С., Пикуз С.А., Пикуз Т.А., Бузмаков А.В. Выбор геометрии эксперимента при определении волновых свойств излучения рентгеновского лазера дифракционным методом// Вестник Объединенного института высоких температур.— 2018. — Т. 1. — С. 136–139.
15. Ivanov K.A., Gozhev D.A., Rodichkina S.P., Makarov S.V., Makarov S.S., Dubatkov M.A., Pikuz S.A., Presnov D.E., Paskhalov A.A., Eremin N.V., Brantov A.V., Bychenkov V.Yu, Volkov R.V., Timoshenko V.Yu., Kudryashov S.I., and Savel'ev A.B. Nano structured plasmas for enhanced gamma emission at relativistic laser interaction with solids// Applied Physics B: Lasers and Optics.— 2017.—V. 123.— 252.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»(заведующий лабораторией моделирования плазменных явлений в экстремальных астрофизических объектах, д.ф.-м.н. Стародубцев М.В.) – отзыв положительный, с замечаниями:

- не хватает обсуждения возможных причин проявления локальной немонотонности в наблюдаемом турбулентном пространственном спектре, представленном в Главе 3.
- не хватает описания в тексте явных выводов к рисунку 3, на котором представлен результат измерения каустики сфокусированного пучка рентгеновского лазера на свободных электронах с использованием детектора LiF.

2. ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр - Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина» (с.н.с. научно-теоретического отделения №1, к.ф.-м.н. Говрас Е.А.) - отзыв положительный, с замечаниями:

- на странице 4 говорится о «пикосекундных установках мегаджоульного уровня». Скорее всего, здесь содержится опечатка, так как установки такого класса имеют наносекундную длительность импульса.
- при описании экспериментальных работ по неустойчивости Релея-Тейлора не приведены данные по геометрии расположения источника просветки, объекта и детектора. Вопрос правильного выбора геометрии и увеличения критически важен, особенно когда речь идет об объектах столь малых размеров. По этой причине данную информацию следовало привести в тексте.
- из анализа рисунка 5 следует, что при непосредственном участии автора была получена многокадровая съемка гидродинамического течения с шагом между кадрами до 10 нс. Вообще говоря, это является достаточно впечатляющим результатом. Но при этом совсем не обсуждаются вопросы времени высвечивания использованного кристалла LiFi снятия изображений с такой высокой частотой.
- на стр. 13 сказано, что развитая методика диагностики пучков рентгеновских лазеров с использованием детекторов LiF была апробирована на Европейском Рентгеновском

Лазере на Свободных Электронах, однако не упомянуты полученные результаты, а дана лишь ссылка на рисунок 3 (б,в). Стоило отразить в тексте автореферата основные выводы по данному вопросу.

3. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (директор Института лазерных и плазменных технологий, профессор, д.ф.-м.н. Кузнецов А.П.) - отзыв положительный, с замечаниями:

- Текст написан доступным научным языком и легко воспринимается, однако, все же встречаются ошибки и опечатки.

Выбор официальных оппонентов обосновывается:

- д.х.н. Толочко Б.П. является специалистом в разработке аппаратуры и методов синхротронного излучения и их использования для исследований быстропротекающих физических и химических процессов:

1. Kudashkin D.V., Arakcheev A.S., Aulchenko V.M., Zhulanov V.V., Tolochko B.P., Shekhtman L.I., Detectors to Study Fast-Floating Processes on the SR Beam // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques volume.— 2021. —V.15. — P. 371–377.
2. Arakcheev A.S., Aulchenko V.M., Balash I.I., Burdakov A.V., Chernyakin A.D., Dokutovich V.A., Evdokov O.V., Kasatov A.A., Kazantsev S.R., Kosov A.V., Popov V.A., Sharafutdinov M.R., Shekhtman L.I., Shoshin A.A., Tolochko B.P., Vasilyev A.A., Vyacheslavov L.N., Vaigel L.A., Zhulanov V.V., Dynamic observation of X-ray Laue diffraction on single-crystal tungsten during pulsed heat load // Journal of Synchrotron Radiation.— 2019. —V.26.—P. 1644-1649.
3. Loginova M., Sobachkin A., Sitnikov A., Yakovlev V., Filimonov V., Myasnikov A., Sharafutdinov M., Tolochko B., Gradoboev A., Synchrotron in situ studies of mechanical activation treatment and γ -radiation impact on structural-phase transitions and high-temperature synthesis parameters during the formation of γ -(TiAl) compound // Journal of Synchrotron Radiation.— 2019. —V.26.— P. 1671-1678.

- к.ф.-м.н. Попов Н.Л. является специалистом в области разработки и применения различных рентгенооптических систем, а также разработки методов расчёта и моделирования распространения когерентных и некогерентных волн с учётом особенностей рентгеновского диапазона:

1. Schelokov I.A., Popov N.L., Vinogradov A.V., Analytical Approach to the Theory of X-Ray Observation of Pores in Bulk Materials // Journal of Russian Laser Research.— 2021.—V. 42.—№.1.—P. 32-44.
2. Popov N.L., Artyukov I.A., Vinogradov A.V., Protopopov V.V., Wave packet in the phase problem in optics and ptychography // Physics-Uspekhi.— 2020. —V. 63. —№ 8.—P. 766-774.
3. Vinogradov A.V., D'yachkov N.V., Polunina A.V., Popov N.L., Shvedunov V.I., Laser-electron generators: the sources of narrow-band X-ray radiation for low-invasive coronary angiography // Quantum Electronics.— 2018. —V. 48. — №. 6.—P. 565-572.

- Выбор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук в качестве ведущей организации обусловлен тем, что данная организация является одной из ведущих организаций по экспериментальным и теоретическим исследованиям гидродинамических явлений:

1. Volchkov Yu. M., Bogulskii I. O., Numerical Study of Wave Propagation in Nonlinear Dissipative Material // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2021. – V. 62. – P. 801 – 805.
2. Gilev S. D., Nonequilibrium Physical State of Copper under Shock Compression // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2021. – V. 57. P. 378–384.
3. Даржаин А. Э., Бойко А. В., Кулик В. М., Чупахин А. П., Параметрическое исследование гидродинамической устойчивости пограничного слоя плоской пластины над двухслойными податливыми покрытиями // Теплофизика и аэромеханика. – 2020. – Т. 27. – №. 2. – С. 189-200.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- Предложена и апробирована методика регистрации фазово-контрастных рентгеновских изображений малоконтрастных гидродинамических явлений лазерной плазмы субмикронным разрешением. Данная методика уже используется на рентгеновском лазере на свободных электронах (РСЛЭ) SACLA (Япония) для обеспечения экспериментов по физике высокой плотности энергии.

- Впервые с субмикронной точностью экспериментально визуализировано развитие неустойчивостей Рэлея–Тейлора в лазерно-индуцированной наносекундной плазме вплоть до турбулентной фазы. Произведено сравнение с результатами гидродинамического моделирования для линейной фазы развития неустойчивости, в результате чего определены физические параметры лазерно-плазменной системы (ионизация, вязкость, число Рейнольдса, инерционная длина ионов и электронов и др.).

- Прямым методом впервые экспериментально зарегистрирована с микронной точностью динамика развития и исследована морфология лазерно-индуцированной парной волновой структуры «упругий предвестник – пластическая ударная волна» в алмазе. Получены основные параметры образовавшихся ударных волн от момента появления упругого предвестника до затухания пластической ударной волны (скорость, плотность, давление, ширина фронта, времена появления предвестника и размытия пластической ударной волны). Выполнена калибровка и валидация упругопластической модели, описывающей данный процесс в двумерной геометрии.

- Разработана и апробирована методика прямого прецизионного измерения каустики и распределения интенсивности в пучке рентгеновского лазера на свободных электронах, сфокусированного вплоть до нескольких сотен нанометров, с субмикронной точностью при применении флуоресцентного детектора LiF. Данная методика уже используется на станции HEDE Европейского РЛСЭ (Германия).

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- Измеренный с микронным разрешением пространственный спектр развития турбулентности в наносекундной лазерной плазме, а также найденная в нем особенность в виде локальной немонотонности могут использоваться для развития и валидации теорий турбулентности на стадии диссипации энергии. Полученные параметры плазменных потоков при развитии неустойчивости Рэлея–Тейлора могут быть использованы и масштабированы для развития технологий инерциального синтеза в схемах непрямого обжатия капсулы мишени, а также для фундаментальных задач астрофизики.

- Данные по прямой регистрации развития ударных волн в алмазе открывают новые возможности для построения и проверки уравнений состояния вещества при сверхвысоких давлениях (в несколько миллионов атмосфер).

- Результаты работы по определению метрологических свойств детектора LiF могут быть использованы для верификации и развития теоретических описаний образования и эволюции центров окраски в данном кристалле. Определенное значение порога абляции детектора LiF под воздействием сверхинтенсивных импульсов РЛСЭ может быть использовано при планировании радиографических экспериментов по физике высокой плотности энергии.

Значение полученных соискателем результатов **исследования для практики подтверждается** тем, что:

- Развитая методика фазово-контрастной когерентной рентгенографии сверхвысокого разрешения открывает новые возможности для валидации и развития теоретических моделей, описывающих малоконтрастные явления в лазерной плазме, где требуется субмикронная точность измерений. Методика уже успешно используется на РЛСЭ SACLA (Япония) для решения широкого круга задач по физике высокой плотности энергии. Также планируется в скором времени её применение на Европейском РЛСЭ (Германия).

- Развитая методика визуализации и измерения профиля интенсивности и накопленной дозы по фокальному пятну рентгеновского пучка может использоваться для определения параметров РЛСЭ. В частности, детектор LiF уже применялся для диагностики пучка на Европейском РЛСЭ в течение нескольких пользовательских экспериментов. Точное определение размера и формы фокального пятна на субмикронном уровне имеет важное значение для ряда исследований, требующих либо точечного источника подсветки (метод рентгенографии), либо экстремальной интенсивности рентгеновского нагрева вещества.

Результаты диссертационного исследования могут быть рекомендованы для использования в ОИВТ РАН, ИГиЛ СО РАН, НИЦ «Курчатовский институт», РФЯЦ – ВНИИТФ, Институте Лазерных и Плазменных технологий НИЯУ МИФИ, ИОФ РАН им. А.М. Прохорова, ИПФ РАН, ФИАН им. П.Н. Лебедева, ФГБУН НЦЧ РАН.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что:

- идея диссертационной работы базируется на анализе научной литературы по предметной области исследования, обобщении передового опыта работы других научных групп и лабораторий;

- экспериментальные данные, представленные в работе, были получены в ведущих научных центрах с использованием современных синхротронных источников, обеспечивающих высокую когерентность и монохроматичность рентгеновского пучка;

- для контроля параметров, необходимых в экспериментах, использовалось современное измерительное оборудование, обеспечивающее высокое пространственное, временное и спектральное разрешение;

- достоверность результатов анализа обеспечивается взаимной согласованностью экспериментальных данных, получаемых при помощи различных диагностических методик, их воспроизводимостью, а также согласованностью с моделированием.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии в выборе темы исследования, постановке задач. Все результаты, представленные в диссертационном исследовании, получены автором лично или при его непосредственном участии. Автор принимал участие в подготовке и проведении экспериментов, а также анализе полученных данных на уникальных пользовательских установках в ведущих научных центрах: синхротронный источник DESY (Германия), синхротронный источник Soleil (Франция), Европейский РЛСЭ (Германия), РЛСЭ SACLA (Япония). Автором развита методика фазово-контрастной рентгеновской радиографии сверхвысокого разрешения, которая была применена

для исследования гидродинамических явлений в наносекундной лазерной плазме. Автором выполнялось численное моделирование для интерпретации зарегистрированных в экспериментах фазово-контрастных изображений.

Апробация результатов исследования проводилась на 14-ти российских и международных конференциях и симпозиумах, в которых соискатель принимал личное участие. Основные публикации по выполненной работе в большинстве своем подготовлены лично автором, либо при его непосредственном участии.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было.

Соискатель Макаров Сергей Станиславович ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы, согласился с замечаниями и привел собственную аргументацию.

На заседании от 27.04.2022 г. диссертационный совет принял решение присудить Макарову Сергею Станиславовичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

При проведении тайного голосования Диссертационный совет в количестве 22 человек, из них очно: 5 докторов наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 5 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, дистанционно: 3 доктора наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 6 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, участвовавших в заседании, из 31 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 22, против 0, недействительных бюллетеней - 0.

Зам. председателя диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)

д.ф.-м.н., профессор

Андреев Н.Е.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)

к.ф.-м.н.

Тимофеев А.В.

27.04.2022 г.

