

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 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 02.06.2021 протокол № 7

О присуждении Мартыненко Артему Сергеевичу, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Сверхплотная плазма в условиях изохорического нагрева пикосекундными лазерными импульсами релятивистской интенсивности», в виде рукописи по специальности 01.04.08 – Физика плазмы, принята к защите 01.04.2021 г., протокол № 4, диссертационным советом Д 002.110.02 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](http://jiht.ru), (495) 485-8345), утвержденного Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 11.04.2012г. № 105/нк.

Соискатель Мартыненко Артем Сергеевич 1991 года рождения, в 2015 году окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

С 2015 года обучался в очной аспирантуре Института Лазерных и Плазменных Технологий (ЛаПлаз) Федерального государственного

автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Диссертация выполнена в Лаборатории № 1.1 – Диагностики вещества в экстремальном состоянии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Соискатель работает научным сотрудником Лаборатории № 1.1 – Диагностики вещества в экстремальном состоянии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

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

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, Стародубцев Михаил Викторович, заведующий лабораторией «Моделирования плазменных явлений в экстремальных астрофизических объектах» (373) Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»;

доктор физико-математических наук, Попруженко Сергей Васильевич, ведущий научный сотрудник, Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»;

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский

государственный университет имени М.В. Ломоносова», в своем положительном заключении, составленном профессором кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, доктором физико-математических наук Савельевым-Трофимовым А.Б. (утвержденном проректором – начальником управления научной политики МГУ им. М. В. Ломоносова, д.ф.-м.н. профессором Федяниным А.А.), указала что:

Глубокое понимание поведения вещества в экстремальных условиях, а именно при высоких значениях давления и температуры, требуется как для описания большинства астрофизических явлений, так и для решения практических задач, стоящих перед научным сообществом, таких как создание лазерноиндуцированных источников частиц и мощного рентгеновского излучения, а также осуществление инерциального термоядерного синтеза (сюда же можно отнести, т.н. быстрое и ударное зажигание термоядерного топлива). В связи с этим изучение свойств, развитие методов получения и диагностики вещества, создаваемого в лабораторных условиях при изохорическом нагреве вещества короткоимпульсными лазерными импульсами высокой интенсивности не вызывает сомнений.

Достоверность полученных данных подтверждается сопоставлением экспериментальных данных с модельными, полученными на основе общепринятых атомно-кинетических численных кодов. Результаты диссертационного исследования могут быть рекомендованы для использования в МГУ им. М.В. Ломоносова, РФЯЦ ВНИИЭФ, ФГУП ЦНИИмаш, НИЯУ МИФИ и во многих других научных учреждениях.

Соискатель имеет 16 опубликованных статей, из них 13 по теме диссертации, 9 из которых опубликованы в журналах, включенных в реферативную базу данных Web of Science:

Основные работы:

1. Martynenko A.S., Pikuz S.A., Skobelev I.Yu. et. al. Optimization of a laser plasma-based X-ray source according to WDM absorption spectroscopy requirements // *Matter and Radiation at Extremes*. — 2021. — Vol. 6, Issue 1. — Page 014405.
2. Martynenko A.S., Pikuz S.A., Antonelli L., et. al. Role of relativistic laser intensity on isochoric heating of metal wire targets // *Optics Express*. — 2021. — Vol. 29.
3. Martynenko A.S., Skobelev I.Yu., Pikuz S.A. et. al. Determining the Short Laser Pulse Contrast Based on X-Ray Emission Spectroscopy // *High Energy Density Physics*. — 2021. — Vol. 38, Page 100924.
4. Ryazantsev S.N., Skobelev I.Yu., Filippov E.D. et. al. Precise wavelength measurements of Potassium He- and Li-like satellites in a laser plasma of a mineral target // *Matter and Radiation at Extremes*. — 2021. — Vol. 6, Issue 1. — Page 014402.
5. Ryazantsev S. N., Skobelev I.Y., Martynenko A.S. et. al. Analysis of Ly $\alpha$  Dielectronic Satellites to Characterize Temporal Profile of Intense Femtosecond Laser Pulses // *Crystals*. — 2021. — Vol. 11, Issue 2. — Page 130.
6. Martynenko A.S., Pikuz S.A., Skobelev I.Yu. et. al. Effect of plastic coating on density of plasma formed in Si foil targets irradiated by ultra high-contrast relativistic laser pulses // *Physical Review E*. — 2020. — Vol. 101, Issue 4.
7. Martynenko A.S., Skobelev I.Yu., and Pikuz S.A. Possibility of estimating high-intensity-laser plasma parameters by modelling spectral line profiles in spatially and time-integrated X-ray emission // *Applied Physics B: Lasers and Optics*. — 2019. — Vol.125, No. 2.
8. Jakubowska K., Mancelli D., Benocci R. et. al. Reflecting laser-driven shocks in diamond in the megabar pressure range // *High Power Laser Science and Engineering*. — 2021. — Vol. 9, Issue 1. — 010000e3.

9. Cristoforetti G., Antonelli L., Mancelli D. et. al. Time evolution of stimulated raman scattering and two plasmon decay at laser intensities relevant for shock ignition in a hot plasma // High Power Laser Science and Engineering. — 2019. — Vol. 7, e51.
10. Мартыненко А.С., Скобелев И.Ю., Пикуз С.А. и др. "Определение параметров пикосекундной лазерной плазмы на начальных этапах её формирования методами высокоразрешающей рентгеновской спектроскопии" // Вестник Объединенного института высоких температур. — 2019. т. 3.
11. Filippov E.D., Martynenko A.S., Cervenak M. et. al. X-ray time-resolved diagnostics of hot electron generation in shock ignition relevant experiments // International Conference Laser Optics ICLO. — 2020.
12. Martynenko A. S., Pikuz S. A., Ryazantsev S. N. et. al. X-ray spectroscopy validation of ionization potential depression models in dense plasma created by petawatt laser pulses // International Conference Laser Optics ICLO. — 2020.
13. Pikuz S.A., Faenov A.Y., Pikuz T.A. et. al. X-ray radiation properties of plasma under interaction of femtosecond laser pulses with  $\sim 10^{22}$  W/cm<sup>2</sup> intensities // International Conference Laser Optics. — 2018. — IEEE. — p. 234.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

**1. Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (ФГУП ЦНИИМаш)** (главный научный сотрудник, д.ф.-м.н. Беляев В.С.) – отзыв положительный, с замечаниями:

- Замечание по автореферату носит, скорее, рекомендательный характер и касается разработанной в рамках диссертационной работы методики определения момента образования лазерной плазмы относительно времени воздействия основного лазерного импульса на мишень по интегрированным

по времени эмиссионным рентгеновским спектрам образовавшейся плазмы. Желательно экспериментально подтвердить предлагаемую методику с использованием других способов определения момента образования лазерной плазмы относительно времени воздействия основного лазерного импульса. Например, в случае низкого контраста без использования плазменного зеркала можно было бы измерить временной профиль импульса с предимпульсом. И если бы предимпульс возникал за 25 пикосекунд до основного импульса, то это бы подтверждало бы методику автора с использованием которой было получено, что преплазма возникает за 25 пикосекунд до основного импульса (стр. 10 автореферата). Измерить предимпульс за 25 пикосекунд можно либо по спектру chirпированного импульса, либо с использованием автокоррелятора.

- Автореферат не лишен грамматических ошибок. Используемый термин «лазеро-плазменный источник» желательно заменить на широко используемый «лазерно-плазменный источник».

**2. 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:

- Использование слова «изохорический» при описании процесса нагрева вещества лазерными импульсами может вводить в заблуждение, правильнее было бы дать пояснения, что идет речь о типе нагрева вещества, происходящем за время меньшее характерного времени гидродинамического разлёта мишени.

- В тексте автореферата встречаются опечатки, а размер подписей на некоторых рисунках оказывается недостаточен для восприятия соответствующей информации невооружённым глазом.

**3. Федеральное государственное бюджетное учреждение "Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт"** (к.ф.-м.н., и.о. зам. директора по научной работе Канцырев А.В.) - отзыв положительный, с замечанием:

- к незначительным замечаниям автореферата можно отнести то, что, говоря о температуре плазмы, автор не уточняет о какой именно температуре, электронной или ионной, идёт речь в каждом конкретном случае, и есть ли основания считать, что эти температуры совпадают.

**4. Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ)»** (к.ф.-м.н., начальник научно-исследовательского отдела № 1331 Деркач В.Н.) - отзыв положительный, с замечаниями:

- Вместе с тем работа не лишена «обязательных» ошибок и лексических погрешностей. С научной точки зрения некоторые моменты нуждаются в дополнительном разъяснении (возможно из-за лаконичности определений, задаваемых объемом автореферата). Перечислю основные. Автор несколько раз употребляет термин «ультравысокий» контраст, составляющего важную часть постановки эксперимента, но не определяет его количественно.

- Второе - способ определения начальных параметров плазмы, учитывающий остывание и гидродинамическое расширение плазмы и основанный на регистрации интегрального по времени спектра свечения. Он основан на сравнении экспериментального и модельного спектров, а именно интенсивностей и ширин характеристических линий. Автором сообщается о хорошем их согласовании, однако при этом не учитывается влияние аппаратной функции применяемого диагностического комплекса на реализацию экспериментального распределения, и возникающую при этом погрешность измерений.

- То же замечание касается и анализа результатов регистрации плотности плазмы в вариантах применения мишеней с (без) пластиковыми обкладками, препятствующими разлету кремневой плазмы. Максимальная корреляция расчетных и экспериментальных распределений спектров излучений должна свидетельствовать в пользу той или иной плотности плазмы. Однако, учет экспериментальной погрешности измерений способен изменить корреляционные соотношения и, тем самым, изменить оценку плотности плазмы.

**5. Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина (РФЯЦ-ВНИИТФ)»** (д.ф.-м.н., начальник отдела Научно-теоретического отделения № 1, Лобода П.А. // Вихляев Д.А.) - отзыв положительный, с замечаниями:

- В главе 3 и на рисунке 9 приводятся данные об излучательной способности плазмы в абсолютных величинах, но не дано никаких пояснений по тому, как эти величины были получены. При этом оценка излучательной способности важна в контексте максимизации яркости рентгеновского источника для абсорбционной спектроскопии.

- Автор в автореферате не упоминает диагностическое оборудование, с помощью которого исследовалась плазма. Исследование плазмы, созданной релятивистскими лазерными импульсами пикосекундной длительности, в «мягкой» области рентгеновского излучения – нетривиальная задача из-за значительного фонового излучения, обусловленного быстрыми электронами и собственным излучением плазмы.

- В тексте автореферата встречаются опечатки и грамматические ошибки, впрочем, не затрудняющие чтение и восприятие. Также не хватает ссылки на рисунок 11.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что:



- д.ф.-м.н. Стародубцев М.В. является специалистом в области взаимодействия электромагнитного излучения с плазмой:

1. K. Burdonov, G. Revet, R. Bonito, C. Argiroffi, J. Béard, S. Bolanõs, M. Cerchez, S.N. Chen, A. Ciardi, G. Espinosa, E. Filippov, S. Pikuz, R. Rodriguez, M. Šmíd, M. Starodubtsev, O. Willi, S. Orlando, J. Fuchs, Laboratory evidence for an asymmetric accretion structure upon slanted matter impact in young stars, *Astron. Astrophys.* — 2020. — V. 642. — A38.

2. C. Ruyer, S. Bolaños, B. Albertazzi, S.N. Chen, P. Antici, J. Böker, V. Dervieux, L. Lancia, M. Nakatsutsumi, L. Romagnani, R. Shepherd, M. Swantusch, M. Borghesi, O. Willi, H. Pépin, M. Starodubtsev, M. Grech, C. Riconda, L. Gremillet, J. Fuchs, Growth of concomitant laser-driven collisionless and resistive electron filamentation instabilities over large spatiotemporal scales, *Nat. Phys.* — 2020. — V. 16. — Pp. 983–988.

3. S.E. Perevalov, K.F. Burdonov, A. V. Kotov, D.S. Romanovskiy, A.A. Soloviev, M. V. Starodubtsev, A.A. Golovanov, V.N. Ginzburg, A.A. Kochetkov, A.P. Korobeinikova, A.A. Kuz'min, I.A. Shaikin, A.A. Shaykin, I. V. Yakovlev, E.A. Khazanov, I.Y. Kostyukov, Experimental study of strongly mismatched regime of laser-driven wakefield acceleration, *Plasma Phys. Control. Fusion.* — 2020. — V. 62. — № 094004.

- д.ф.-м.н. Попруженко С.В. является специалистом в области численного моделирования процессов взаимодействия интенсивного лазерного излучения с веществом:

1. S.V. Popruzhenko, T.A. Lomonosova, Frustrated ionization of atoms in the multiphoton regime, *Laser Phys. Lett.* — 2021. — V. 18. — № 015301.

2. S.V. Popruzhenko Quantum theory of strong-field frustrated tunneling *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* — 2018. — V. 51. — № 014002.

3. S.V. Popruzhenko, T.V. Liseykina, A. Macchi, Efficiency of radiation friction losses in laser-driven 'hole boring' of dense targets, *New J. Phys.* — 2019. — V. 21. — № 033009.

Выбор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» в качестве ведущей организации обусловлен тем, что МГУ им. М.В. Ломоносова является одной из ведущих организаций по фундаментальным исследованиям, в том числе в области исследования физики плазмы с использованием лазерных импульсов.

1. K.A. Ivanov, I.N. Tsymbalov, O.E. Vais, S.G. Bochkarev, R. V. Volkov, V.Y. Bychenkov, A.B. Savel'ev, Accelerated electrons for in situ peak intensity monitoring of tightly focused femtosecond laser radiation at high intensities, *Plasma Phys. Control. Fusion.* —2018. — V. 60. — № 105011.

2. A.A. Ushakov, P.A. Chizhov, V.A. Andreeva, N.A. Panov, D.E. Shipilo, M. Matoba, N. Nemoto, N. Kanda, K. Konishi, V. V. Bukin, M. Kuwata-Gonokami, O.G. Kosareva, S. V. Garnov, A.B. Savel'ev, Ring and unimodal angular-frequency distribution of THz emission from two-color femtosecond plasma spark, *Opt. Express.* —2018. — V. 26. — № 18202.

3. E.A. Bolkhovitinov, G.A. Gospodinov, K.A. Ivanov, A.A. Rupasov, A.B. Savel'ev, The Diagnostic Probing of Laser Plasma with a Femtosecond Time Resolution Using a Three-Channel Polarization Interferometer, *Phys. At. Nucl.* — 2019. — V. 82. — Pp. 1419–1423.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

- Установлено, что одновременное применение пластиковых обкладок ведёт к существенному повышению плотности плазмы вплоть до почти твердотельных значений, в то время как их отсутствие – к генерации плазмы с величиной плотности в несколько раз меньше даже в тех случаях, когда используется излучение лазерной установки ультравысокого контраста.

- Экспериментальные данные о параметрах прогреваемого потоком горячих электронов используются для верификации численных моделей,

описывающих динамику и структуру возникающих электронных токов, механизмы прогрева вещества.

- Предложен метод оценки момента образования преплазмы по рентгеновским эмиссионным спектрам лазерной плазмы, создаваемой ультракороткими лазерными импульсами.

- Разработан и апробирован метод восстановления параметров адиабатически разлетающейся плазмы в момент взаимодействия основного сверхмощного лазерного импульса с мишенью по её интегральным по времени эмиссионным рентгеновским спектрам.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

- Впервые с высокой точностью было определено положение края рекомбинационного континуума в зависимости от плотности кремниевой плазмы вплоть до околотвердотельных значений. Наблюдалось исчезновение уровней с главным квантовым числом  $n \geq 4$  в гелиеподобных ионах кремния и пропадание соответствующих эмиссионных рентгеновских спектральных линий. Эти данные позволяют уточнить теоретические модели, описывающие эффект понижения фоторекомбинационного континуума.

- Впервые было охарактеризовано состояние плотного нагретого вещества, разогреваемого потоком быстрых лазерно-ускоренных электронов, с одновременным применением эмиссионных рентгеноспектральных и абсорбционных рентгенографических методов диагностики для протяжённых мишеней: впервые проведено одновременное восстановление температурного профиля разогретого вещества и описание динамики разлёта мишени. Выявлено определяющее влияние лазерной интенсивности на характер прогрева проволоочки на глубине от 300 мкм; а энергии – на максимальную температуру получаемой плазмы.

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

- Показано, что пластиковые мишенные обкладки позволяют повысить плотность получаемой лазерной плазмы в том числе для случая ультравысокого лазерного контраста, достигнутого за счёт одновременного использования ОРСРА и плазменного зеркала.
- Показана возможность оптимизации источников жёсткого рентгеновского излучения на основе твердотельных мишеней для абсорбционной спектральной диагностики плотной горячей плазмы.
- Разработанные методы оценки момента образования преплазмы и параметров плазмы в момент прихода основного лазерного импульса, основанные на анализе рентгеновских эмиссионных спектров лазерной плазмы, уже используются при обработке и интерпретации экспериментальных данных на современных лазерных установках, в частности на установках Vulcan PW (RAL, Великобритания), Phelix (GSI, Германия).
- Предложенные методики рентгеноспектральной диагностики плазмы успешно применяются для интерпретации результатов экспериментов, выполняемых широкой международной коллаборацией на установках в Лаборатории Резерфорда Эплтона (Rutherford Appleton Laboratory's Central Laser Facility; Оксфордшир, Великобритания), Институте тяжёлых ионов (GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung; Дармштадт, Германия) в Институте Прикладной Физики РАН (Нижний Новгород, Россия).

Результаты диссертационного исследования могут быть рекомендованы для использования в ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, ИОФ РАН им. А. М. Прохорова, ФГУП ЦНИИмаш, Институте Лазерных и Плазменных технологий НИЯУ МИФИ, МГУ им. М.В. Ломоносова, ФИАН им. П.Н. Лебедева, в НИЦ "Курчатовский институт", Институте астрономии РАН и во многих других научных учреждениях.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

- использованы современные методы и приборы для регистрации рентгеновского излучения плазмы и определения его спектрального состава, показана воспроизводимость результатов исследования;
- расчетно-теоретические исследования построены на известных, проверяемых данных, фактах, общепризнанных законах кинетики плазмы. Они согласуются с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации;
- идея диссертационной работы базируется на анализе научной литературы по предметной области исследования, обобщении передового опыта работы других научных групп и лабораторий;

**Личный вклад** соискателя состоит в непосредственном участии в выборе темы исследования, постановке задачи. Автором проведены кинетические расчеты относительных интенсивностей линий высокоионизированной кремниевой и алюминиевой плазмы в рамках квазистационарной столкновительно-радиационной модели. На основании полученных зависимостей автором предложены методика определения электронной температуры и плотности плазмы в момент прихода основного лазерного импульса на мишень с учётом процессов остывания и разлёта плазмы по интегральным по времени рентгеновским спектрам; а также рентгеноспектральная методика оценки момента плазмообразования относительно момента прихода основного лазерного импульса на мишень.

Автор принимал непосредственное участие в подготовке и проведении экспериментов на установках Vulcan и Phelix, результаты которых легли в основу диссертации. Автор лично проводил последующую обработку и анализ полученных данных.

Апробация результатов исследования проводилась на 12 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.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, соответствует критериям пункта 9, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г. (ред. 01.10.2018г.).

На заседании от 02.06.2021г. диссертационный совет принял решение присудить Мартыненко А.С. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования Диссертационный совет в количестве 22 человек, из них очно: 10 докторов наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы и 5 докторов наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, дистанционно: 2 доктора наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы и 5 докторов наук по специальности 01.04.14 – 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.

Зам. председателя диссертационного совета Д 002.110.02

д.ф.-м.н., профессор

Андреев Н.Е.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.110.02

д.ф.-м.н.



Васильев М.М.

М.П.

02.06.2021г.