

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию КНЯЗЕВА Дмитрия Владимировича «Расчет электропроводности, теплопроводности и оптических свойств плотной плазмы на основе метода квантовой молекулярной динамики и формулы Кубо-Гринвуда», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

*Актуальность темы.* Хорошо известно, что знание поведения электронных транспортных и оптических свойств плотной плазмы с вырожденной электронной компонентой в широкой области изменения давления и ионной и электронной температур необходимо для понимания механизмов взаимодействия интенсивных потоков энергии, в том числе фемтосекундного лазерного и пикосекундного электронного излучения, с сильно неидеальной металлической плазмой. В течение длительного времени исследования в этой области проводились и проводятся в рамках кинетической физики. Развитие вычислительной техники и алгоритмов, в частности методов молекулярной динамики (классической и квантовой), привели к развитию направления, относящегося к так называемым первопринципным методам их прямого расчета. Несмотря на полученные с помощью данного направления важные результаты, задача прямого расчета электронных транспортных и оптических свойств еще далека от своего решения. Фундаментальный характер задач, направленных на расчет электропроводности, теплопроводности и оптических свойств плотной плазмы на основе квантовой молекулярной динамики и формулы Кубо - Гринвуда, явившихся мотивацией исследований диссертанта, позволяет утверждать о несомненной актуальности темы подготовленной им к защите научно-квалификационной работы. Выше сказанное также позволяет сделать вывод о соответствии темы диссертации Князева Д.В. паспорту специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Диссертация Князева Д.В., объемом 240 страниц текста, состоит из предисловия; списка используемых в тексте обозначений и сокращений; введения; литературного обзора - краткого анализа работ других авторов, чье содержание близко, по мнению диссертанта, к теме его работы; шести глав, две из которых также фактически обзорные; заключения; двух приложений, содержащих значения электропроводности и теплопроводности плотной плазмы алюминия, рассчитанные при постоянной плотности, равной нормальной, в двухтемпературном случае (приложение А) и термодинамические и переносные характеристики плотной плазмы пластика эффективного состава  $\text{CH}_2$  (приложение Б); списка литературы из 117 наименований, в двадцати девяти из которых диссертант выступает в качестве автора (соавтора). Ознакомление с диссертацией позволяет утверждать, что сформулированные Князевым Д.В. положения, выносимые на защиту, раскрыты и обоснованы в 3-х из 6 глав диссертации. Ниже, по ходу анализа их основного содержания, мы выделяем наиболее значимые, на наш взгляд, результаты диссертанта.

*Литературный обзор* состоит из четырех разделов. В *разделе 1* на примере моделирования экспериментов по взаимодействию фемтосекундного лазерного излучения с металлом в рамках двухтемпературной гидродинамики обосновывается необходимость проведения исследований диссертанта. В *разделе 2* "<...>расшифровывается смысл некоторых понятий, используемых в <...> работе. В частности, объясняется, что под переносными свойствами подразумеваются электронная электропроводность и электронная теплопроводность". В *разделе 3* "<...> рассказывается, что переносные и оптические свойства являются коэффициентами, связывающими существующие в образце напряженность электрического поля  $E$  и градиент температуры  $\nabla T_e$  с возникающими плотностью электрического тока  $j$  и плотностью потока энергии  $j_E$ ". В *разделе 4* кратко рассматривается история развития методов расчета электронных транспортных свойств, использующих квантовую молекулярную динамику и теорию линейного отклика (КМД+КТ).

*Первая глава* - обзорная. В ней диссертант анализирует используемый им метод расчета переносных и оптических свойств плотной неидеальной плазмы. В *разделе 1.1* кратко обсуждаются основные этапы метода расчета. Их три. На первом этапе проводится квантово-механическое моделирование, на втором - детальный расчет зонной структуры, на третьем - расчет переносных и оптических свойств по формулам Кубо-Гринвуда. Первый и второй этапы осуществляются с использованием пакета программ VASP, разработанного в Венском техническом университете

(Австрия), третий - с использованием написанных диссертантом программ. В *разделе 1.2* описывается метод функционала плотности, основой которого являются уравнения Кона-Шэма для одноэлектронных волновых функций, а в *разделе 1.3* - использованные в пакете VASP обменно-корреляционные функционалы. В *разделе 1.4* рассмотрен реализованный в пакете VASP псевдопотенциальный подход, позволяющий вместо учета при решении системы уравнений Кона-Шэма всех атомных электронов учитывать только электроны с внешних s-, p-, d-оболочек. При этом волновые функции электронов остова (кора) полагаются равными их волновым функциям для свободного атома. Последнее существенно снижает вычислительные затраты на расчет электронной структуры. В *разделе 1.5* подробно описываются детали квантового молекулярно-динамического моделирования, реализованного в пакете VASP. В *разделе 1.6* обсуждается формула Кубо-Гринвуда, используемая для расчета динамической электропроводности. В *разделе 1.7* кратко обсуждается расчет оптических свойств с помощью формулы Кубо-Гринвуда и преобразования Крамерса-Кронига. В *разделе 1.8* обсуждаются основы линейной феноменологической термодинамики необратимых процессов - теории Онзагера. В *разделе 1.9* обсуждаются формулы Кубо-Гринвуда для расчета коэффициентов Онзагера. Существенным достоинством главы 1 является *раздел 1.10*, в котором дана сводка методических (их 9) и технических (их 16) ограничений используемого метода расчета. На основе анализа технических ограничений диссертант выбрал область температур и плотностей исследуемых веществ: "<...> температуры от нормальной до  $\sim 10^5$  К, плотности от нормальной до сжатий/разрежений в несколько раз, частоты до нескольких десятков эВ".

*Глава 2* - также обзорная. В ней рассматриваются теории и модели переносных и оптических свойств, относящиеся к работе диссертанта: теория Друде-Лоренца-Зоммерфельда (я бы добавил к ним еще и Френкеля Я.И., который еще в 1928 г. объяснил температурную зависимость электропроводности металлов, предполагая, что электроны проводимости рассеиваются на флуктуациях плотности аналогично рассеянию рентгеновского излучения [Я.И. Френкель // УФН. - 1928. Т. 8. №2.-С.155-193; Волновая механика. Часть 1. - Москва-Ленинград: ОНТИ-ГТТИ. - 1934. С. 346-366]) - *раздел 2.1*; широкодиапазонные модели: Иванова-Жигилея - *раздел 2.2*; Анисимова - *раздел 2.3*; Иногамова-Петрова - *раздел 2.4*; Ли-Мо - *раздел 2.5*; Апфельбаума - *раздел 2.6*; Поварницына для алюминия - *раздел 2.7*.

*Глава 3* носит методический характер. Она посвящена анализу практического согласования технических параметров в проводимых расчетах. В *разделе 3.1* кратко обсуждается методика проведения систематического численного исследования зависимости статической электропроводности от технических параметров для одной точки фазовой диаграммы жидкого алюминия ( $\rho = 2.249$  г/см<sup>3</sup>,  $T=1273$  К), выбор которой связан с существованием экспериментальных данных. *Раздел 3.2* посвящен влиянию начальных ионных конфигураций и временной эволюции ионных конфигураций на результат расчета статической электропроводности по формуле Кубо-Гринвуда. В *разделе 3.3* исследована зависимость статической электропроводности от числа атомов в суперячейке. Установлено, что данная зависимость очень сильна: наибольшая погрешность при этом может составить  $(\Delta\sigma_{1DC}/\sigma_{1DC})_{\max} = 15\%$  в сторону увеличения электропроводности. В *разделе 3.4* рассмотрена зависимость переносных и оптических свойств от уширения  $\Delta E$   $\delta$ -функции в формуле Кубо-Гринвуда. *Раздел 3.5* содержит исследование зависимости результатов расчета от числа **k**-точек в жидкой фазе, увеличение числа которых позволяет даже в случае малой суперячейки учесть большое количество длин волн. Диссертант подробно обсуждает построение сеток **k**-точек и предлагает процедуру, позволяющую сократить их число, используя соображения симметрии. В *разделе 3.6* исследуется зависимость результатов расчета от псевдопотенциала и обменно-корреляционного функционала. Установлено, что переход от ультрамягкого псевдопотенциала Вандербильта и обменно-корреляционного функционала LDA-CA к псевдопотенциалу PAW и обменно-корреляционному функционалу GGA-PW91 приводит к снижению  $\sigma_{1DC}$  на 5%. Согласно моим оценкам максимальное отличие рассчитанного значения  $\sigma_{1DC}$  от справочного значения  $\sigma_{\text{exp}} = 3.1056 \cdot 10^6$  См·м<sup>-1</sup> для жидкого алюминия при  $T = 1273$  К составляет  $((\sigma_{1DC} - \sigma_{\text{exp}})/\sigma_{\text{exp}})_{\max} \approx 20.299\%$ , минимальное -  $((\sigma_{1DC} - \sigma_{\text{exp}})/\sigma_{\text{exp}})_{\min} \approx 14.471\%$ . В *разделе 3.7* обсуждается сходимость по энергиям обрезания и делается вывод о возможности пренебречь

зависимостью результатов расчета от величины энергии обрезания при оценке суммарной погрешности метода расчета. *Раздел 3.8* содержит описание используемой в диссертации процедуры выбора числа "зон" - собственных значений  $\varepsilon_i$  и соответствующих им волновых функций  $|\Psi_i\rangle$ . В *разделе 3.9* описан способ экстраполяции динамических выражений электропроводности и коэффициентов Онзагера к нулевой частоте. В *разделе 3.10* рассчитывается суммарная погрешность метода расчета переносных и оптических свойств в жидкой фазе. Показано, что суммарная погрешность используемого метода расчета составляет 23 %. В *разделе 3.11* исследуется зависимость результатов расчета электронных и оптических свойств от числа  $\mathbf{k}$ -точек в твердой фазе. В *3.12* рассмотрен способ расчета плотности электронных состояний в заданной суперячейке. *Раздел 3.13* содержит описание способа аппроксимации рассчитанной динамической электропроводности в "друдевских координатах". В *Разделе 3.14* кратко сформулированы основные результаты, полученные в третьей главе: погрешность расчета статической электропроводности составляет 23%, основной вклад (15%) в неё вносит зависимость статической электропроводности от числа атомов и  $\mathbf{k}$ -точек в зоне Бриллюэна в кубической суперячейке. Выбор псевдопотенциала и обменно-корреляционного функционала вносят в суммарную погрешность метода расчета всего 5%.

*Глава 4* посвящена верификации используемого в работе метода расчета переносных и оптических свойств плотной плазмы. В *разделе 4.1* проведено сопоставление результатов расчетов диссертанта с расчетами, выполненными другими авторами для алюминия аналогичным методом в диапазоне температур от 1 до 10 кК. Показано, что данные по электропроводности ( $\sigma_1(\omega)$  и  $\sigma_{1DC}$ ) согласуются с точностью <13 %, а по теплопроводности - 12-23%. Полученное расхождение, по мнению диссертанта, объясняется сильной зависимостью результатов расчетов от числа атомов в суперячейке и числа используемых для расчета электронной структуры  $\mathbf{k}$ -точек. В *разделах 4.2 - 4.3* выполнено сравнение результатов диссертанта со справочными данными и результатами экспериментов при атмосферном давлении и температурах, меньших 1550 К. Показано, что полученные диссертантом результаты по статической электропроводности отличаются от экспериментальных на 11% (теоретические значения при 256 атомах в суперячейке лежат выше экспериментальных). Экспериментальный и теоретический (для 256 атомов в суперячейке) коэффициенты линейного уменьшения статической электропроводности  $d\sigma_{1DC}/dT$  в диапазоне температур 1173 - 1473 К согласуются с точностью 5.38% (теоретическое значение коэффициента  $d\sigma_{1DC}/dT$  также больше экспериментального). По мнению диссертанта, реальная погрешность расчета  $d\sigma_{1DC}/dT$  составляет около 40%. Сравнение с экспериментальными данными по оптическим свойствам, выполненное в *разделе 4.3*, показывает, что в диапазоне частот  $1.5 \leq \omega \leq 3$  эВ при  $\rho = 2.231 \text{ г/см}^3$  и  $T = 1550 \text{ К}$  наблюдается качественное согласие между теоретической и экспериментальной зависимостями  $\sigma_1(\omega)$ , однако теоретические значения превышают экспериментальные в 1.3 - 1.65 раз. Сравнение теоретической и экспериментальной зависимости  $\varepsilon_1(\omega)$  показывает их качественное согласие, однако теоретические значения превышают экспериментальные в 1.12 - 1.34 раза. Основной результат данной главы: полученные результаты достаточно хорошо согласуются с теоретическими результатами других авторов, полученными с помощью аналогичного метода (наблюдаемое различие можно с полной уверенностью отнести на отличие используемых разными авторами технических параметров). Сравнение с экспериментом показывает, что теоретические результаты Князева Д.В. качественно согласуются с экспериментальными. Получаемое во всех случаях превышение теоретических значений переносных и оптических характеристик над экспериментальными следует, по моему мнению, отнести на принципиальные особенности используемого в диссертации метода квантового молекулярно-динамического моделирования и теории линейного отклика, например, на необходимость обеспечения при молекулярно-динамическом моделировании условия адиабатичности электронов (выполнения условия Борна-Оппенгеймера).

*Глава 5* посвящена расчету переносных и оптических характеристик плотной плазмы алюминия в двухтемпературном случае. В расчетах полагалось, что плотность жидкого алюминия равна его нормальной плотности при  $T = 300 \text{ К}$ :  $\rho = \rho_0 = 2.7 \text{ г/см}^3$  (т.е. фактически пренебрегалось

изменением удельного объема при плавлении). Температура изменялась в диапазоне  $3 \leq T_i \leq T_e \leq 50$  кК. Проводились три группы расчетов: 1)  $3 \leq T_i = T_e \leq 20$  кК; 2)  $T_i = 3$  кК = const,  $3 \leq T_e \leq 20$  кК; 3)  $T_e = 20$  кК = const,  $3 \leq T_i \leq 20$  кК. В *разделе 5.1* обсуждаются результаты расчета. Показано, что статическая электропроводность в указанном диапазоне температур зависит только от ионной температуры. Установлено, что при одинаковой температуре ионов теплопроводность в состоянии с  $T_e > T_i$  больше, чем в состоянии с  $T_e = T_i$ . В *разделе 5.2* и *5.3.1* строятся аппроксимации полученных в *разделе 5.1* результатов расчета. Для указанного диапазона температур и нормальной плотности аппроксимации имеют вид:  $\sigma_{\text{ст}} \propto T_i^{-0.25}$ ;  $K \propto T_e T_i^{-0.25}$ ; динамическую электропроводность можно приблизить формулой Друде с временем релаксации  $\tau \propto T_i^{-0.25}$ . В *параграфах 5.3.2 - 5.3.5* рассматривается сравнение результатов расчетов с теоретическими моделями, обсужденными в *главе 2*. В *разделе 5.4* формулируются основные результаты данной главы.

В *главе 6* рассчитываются термодинамические и переносные характеристики плотной плазмы пластика эффективного состава  $\text{CH}_2$  при плотности  $0.954$  г/см<sup>3</sup> и температур в диапазоне от  $5$  до  $100$  кК. В *разделе 6.1* сделан краткий обзор существующих работ, в которых изучаются свойства пластиков эффективного состава  $\text{C}_m\text{H}_n$ . В *разделе 6.2* обсуждается выбор технических параметров расчета, обосновывается необходимость использования маленького шага по времени при проведении квантового молекулярно-динамического моделирования. В *разделе 6.3* обсуждаются полученные результаты расчетов. Установлен ступенчатый характер роста статической электропроводности пластика с температурой: электропроводность быстро растет в диапазоне  $5 < T < 10$  кК, оставаясь практически постоянной при  $20 < T < 60$  кК. Показано, что этот рост сопровождается убыванием теплоемкости при постоянном объеме и постоянством разности полного давления и кинетического давления ионов, а зависимость динамической электропроводности от частоты имеет недрудевский характер с максимумом в области ненулевой частоты. *Раздел 6.4* содержит сравнение полученной динамической проводимости пластика эффективного состава  $\text{CH}_2$  с результатами других авторов. В *разделе 6.5* проанализированы причины быстрого роста статической электропроводности пластика в диапазоне температур в зависимости от энергии электронов показано, что этот рост вызван ростом плотности электронных состояний при достижении энергией электронов значения, равного их химическому потенциалу. В *разделе 6.6* сформулированы основные результаты главы.

В *Заключении* формулируются основные результаты диссертационной работы.

Автореферат включает необходимые сведения о диссертации Князева Д.В. и соответствует её содержанию. Сама диссертационная работа структурирована по правилам ВАК, содержит требуемые формальные разделы, в достаточной степени иллюстрирована и дает полное представление о проведенных исследованиях и их результатах. Все полученные автором научные результаты обладают несомненной научной новизной и практической ценностью. Они могут быть использованы при анализе результатов экспериментов по изучению взаимодействия интенсивных ультракоротких потоков лазерного и электронного излучения с веществом, проводимых в научных организациях Российской академии наук, Госкорпорации "Росатом", НИЦ "Курчатовский институт", а также использованы при подготовке специалистов в области физики плазмы, электрофизики и физики высоких плотностей энергии. Достоверность полученных результатов хорошо обоснована тщательностью выбора технических параметров проводимых компьютерных экспериментов, сравнением рассчитанных значений электронных кинетических коэффициентов плотной плазмы жидкого алюминия и пластика эффективного состава  $\text{CH}_2$  с известными из литературы экспериментальными данными и феноменологическими моделями других авторов в области их применимости. Дополнительным аргументом в пользу достоверности и обоснованности полученных результатов диссертанта может служить подробный критический анализ не только чужих, но и своих результатов, наличествующий во всех главах диссертации. Следует также отметить, что личный вклад автора диссертации в проделанную работу не вызывает сомнения.

Как это типично для любой серьезной научно-квалификационной работы, по диссертации Князева Д.В. можно сделать некоторые замечания:

1. Два из положений, выносимых диссертантом на защиту, относятся к двухтемпературному случаю использованного в диссертации КМД+КГ метода. Однако исходные положения КМД+КГ метода относятся к случаю, когда ионы и электроны имеют равные температуры, обеспечиваемые термостатом Нозе-Гувера. Более того известно [P.E. Blöchl, M. Parinello. // Phys. Rev. B. - 1992. V. 45. No. 16. P. 9413-9416], что при моделировании металлических систем на больших временах следует контролировать адиабатичность электронов (выполнение условия Борна-Оппенгеймера). В указанной работе для этого предложено использовать два термостата Нозе-Гувера, один из которых контролирует постоянство температуры ионов, а второй - постоянство фиктивной кинетической энергии одноэлектронной волновой функции. В пакете программ VASP используется один термостат Нозе-Гувера для контроля только постоянства ионной температуры. Авторы пакета VASP на основе сравнения КМД моделирования жидкой меди при  $T_i = T_e = 1500$  К [G. Kresse, J. Hafner. // Phys. Rev. B. - 1993. V. 48. No. 17. P. 13115-13118] и сравнения с аналогичным моделированием жидкой меди, использующим два термостата Нозе-Гувера [A. Pasquarello, et al. // Phys. Rev. Lett. - 1992. V. 69. No. 13. P. 1982-1985], сделали вывод о хорошем выполнении условия Борна-Оппенгеймера в пакете VASP. Данное заключение относится к незначительному, флуктуационному, отличию индивидуальных температур в пакете VASP. Нелишне было бы обсудить в диссертации применимость пакета VASP к случаю, когда электронная температура может превышать ионную в несколько раз. В реальной плотной плазме в этом случае происходит передача энергии от горячих электронов к ионам и нагрев последних. По моему мнению, независимость переносных и оптических свойств жидкого алюминия от  $T_e$ , обнаруженная в расчетах, связана, в первую очередь, с учетом электрон-ионного обмена энергией.

2. Результаты диссертанта, полученные в главе 4, систематически завышают статические и динамические переносные и оптические характеристики жидкого алюминия по сравнению с экспериментальными и справочными данными: в 1.13 - 1.23 раза для статической электропроводности; 1.12 - 1.23 раза - теплопроводности; 1.3 - 1.65 раза - динамической электропроводности. По моему мнению, это завышение невозможно списать только на недостаточное обеспечение в расчете требуемых значений технических параметров. Следовало бы, как минимум, обсудить возможные другие причины этого завышения.

Диссертация написана ясным, грамотным русским языком. Однако автор иногда допускает не достаточно корректные с физической точки зрения утверждения:

3. Так, например, на с. 23 автором написано: "Задачей этой работы является расчет свойств при заданных  $T_i$  и  $T_e$ . При возникают вопросы о том, насколько такую информацию можно использовать для моделирования фемтосекундного лазерного нагрева, можно ли считать, что электронная и ионная подсистемы находятся в равновесии. Эти вопросы должны решаться не в этой работе, а в работах, посвященных моделированию фемтосекундного лазерного нагрева. В них должны обсуждаться и применимость двухтемпературной гидродинамической модели, и использование для нее свойств, рассчитанных для двухтемпературного случая." Не согласен. По моему мнению, обсуждение применимости метода расчета к той или иной физической ситуации необходимо всегда.

4. На с. 73 написано: "При этом физический смысл имеет лишь динамический коэффициент [Онзагера]  $L_{11}(\omega) = \sigma_1(\omega)$ . Остальные же  $L_{mm}(\omega)$  в этой работе рассматриваются лишь как некоторые выражения, дающие правильные пределы (1.81) при  $\omega \rightarrow 0$ ". Обращение к первоисточнику - статье R/ Kubo, M. Yokota, S. Nakajima. J. Phys. Soc. Japan, 12, No. 11, P. 1203 (1957) [Перевод в сб.: Вопросы квантовой теории необратимых процессов. / Под ред. В.Л. Бонч-Бруевича.- М.: ИЛ, 1961. С. 73-88.] показывает, что физический смысл имеют все коэффициенты Онзагера. Хотя в этом и не нужно было сомневаться.

5. На с. 174 написано: "В связи с этим возникает вопрос, какое именно выражение должно использоваться для расчета числа Лоренца. В этой главе опробованы выражения  $K/(\sigma_{1DC} T_e)$  и  $L_{22}/(\sigma_{1DC} T_e)$ ." Правильно лишь первое из этих двух соотношений. То, что в твердом теле при низких температурах оба соотношения дают мало отличающиеся значения, не дают нам право считать второе соотношение числом Лоренца.

Отмеченные замечания не снижают общего положительного впечатления о работе Князева Д.В. и имеют характер пожеланий более тщательно относиться к формулировке высказываемых утверждений. Я полагаю, что ответы на заданные вопросы не составят для него проблемы и дадут специализированному совету Д 002.110.02 дополнительные основания для позитивной оценки диссертационной работы. Здесь уместно заметить, что представленные в диссертации материалы исследований имеют достаточно хороший уровень верификации и апробации. Список основных публикаций Князева Д.В. по теме диссертации включает 7 работ, 4 статьи из которых опубликованы в рецензируемых журналах, включенных в международную базу цитирования Web of Science и перечень ВАК (3 из этих статей опубликованы в ведущих по специальности 01.04.08 - физика плазмы журналах: Physics of Plasmas (2) и Contributions to Plasma Physics (1)). Не вызывает сомнения, что полученные Князевым Д.В. результаты будут востребованы научным сообществом для дальнейших применений в национальных и мировых исследовательских центрах.

*Общее заключение.* Таким образом, Князев Дмитрий Владимирович представил к защите завершённую научно-исследовательскую квалификационную работу, в которой развит метод расчета электронных переносных и оптических свойств плотной неидеальной плазмы, получены новые научные результаты, имеющие важное значение для развития научного направления "Термодинамические, переносные и оптические свойства неидеальной плазмы". На основании изложенного можно заключить, что диссертационная работа «Расчет электропроводности, теплопроводности и оптических свойств плотной плазмы на основе метода квантовой молекулярной динамики и формулы Кубо-Гринвуда» удовлетворяет требованиям всем критериям, установленным в п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а её автор, Князев Дмитрий Владимирович, несомненно, заслуживает присвоения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Отзыв составлен официальным оппонентом, заведующим лабораторией нелинейной динамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН), доктором физико-математических наук, старшим научным сотрудником Волковым Николаем Борисовичем.

Официальный оппонент,  
д.ф.-м.н., старший научный сотрудник,  
заведующий лабораторией нелинейной динамики ИЭФ УрО РАН  
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 106  
8-(343)-267-86-60, nbv@iep.uran.ru

Н.Б. Волков

Ученый секретарь ИЭФ УрО РАН,  
к.ф.-м.н.  
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 106  
8-(343)- 267-88-18, ss@iep.uran.ru



Е.Е. Кокорина

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН)  
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 106  
8-(343)-267-87-96, ss@iep.uran.ru