

Форма «Т». Титульный лист отчета(итогового отчета) в РНФ.

Название проекта Фемтосекундное лазерное плавление, кавитация и абляция в трехмерной геометрии	Номер проекта 14-19-01599	
	Код типа проекта ОНГ Отрасль знания 09	
Фамилия, имя, отчество (при наличии) руководителя проекта Анисимов Сергей Иванович	Контактные телефон и e-mail руководителя проекта: +7 9165194694, anisimov@itp.ac.ru	
Полное и краткое название организации, на базе которой будет осуществляться проект: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН		
Объем средств, фактически полученных от РНФ в 2014 г.: 1800 тыс. руб.	Год начала проекта 2014	Год окончания проекта 2016
	Объем финансирования проекта на 2015 г. 1800 тыс. руб. (для продолжающихся проектов)	
Перечень приложений к отчету	1. Копии публикаций в соответствии с Formой 2о - 2 шт. на 14 стр. в 1 экз. Копия приказа ИТФ им. Л.Д.Ландау No 1252-12 от 27.06.2014 о создании временного творческого коллектива в соответствии с п. 6.9 - 1 шт. на 1 стр. Дополнительные материалы по п. 1.1-1.4 - распечатка приложенного pdf файла в соответствии с п. 1.6 - 1шт. на 26 стр.	
Гарантирую, что при подготовке отчета не были нарушены авторские и иные права третьих лиц и/или имеется согласие правообладателей на представление в РНФ материалов и их использование РНФ для проведения экспертизы и для их обнародования.		
Подпись руководителя проекта _____ /С.И.Анисимов/	Дата подачи отчета 12 декабря 2014 г. Дата регистрации отчета 12 декабря 2014 г.	
Подпись _____ удостоверяю _____ / _____ /		
М.П.		

**Отчет о выполнении проекта
№ 14-19-01599
Фемтосекундное лазерное плавление, кавитация и абляция в
трехмерной геометрии
в 2014 году.**

1.1. Заявленный в проекте план работы на год

1. Будет написан многомерный гидрокод для расчета трехмерных эффектов, возникающих на границе кратера, возникающего в твердой мишени под действием ультракоротких лазерных импульсов. В гидрокоде, как и его одномерном аналоге, будет учтено возбуждение электронной подсистемы, теплопроводность, обмен энергией между электронами и ионами. Многомерный гидрокод будет применен для решения задачи об отрыве металлической пленки от диэлектрической подложки под действием фемтосекундного лазерного импульса. Проведенное с помощью многомерного гидродинамического кода исследование задач о границе кратера и отрыве металлической пленки от диэлектрической подложки будет в дальнейшем использовано для оптимизации параметров в молекулярно-динамическом моделировании этих задач с целью уменьшить трудоемкость молекулярно-динамических расчетов.
2. Будет начато решение сложной задачи о формировании и эволюции поверхностных структур в режиме повторяющихся выстрелов (multi-shots). Здесь требуется применение разнообразных средств: многомерного моделирования тепловых задач, многомерных гидродинамических расчетов и молекулярной динамики.
3. Будет начато решение задачи о динамике дислокаций, создаваемых в веществе мишени под действием ультракоротких лазерных импульсов, их зарождении, движении, размножении. Создание дислокационной модели будет нацелено на ее включение в гидродинамические расчеты с целью заменить ими часть более громоздких молекулярно-динамических вычислений.
4. Будут рассмотрены подходы к решению задачи о лазерной абляции металлов в конденсированную среду под действием ультракоротких импульсов, в которой наибольший интерес представляет распространение вещества мишени в окружающем веществе.
5. Будет проведен анализ задачи об облучении наночастиц ультракоротким лазерным импульсом.

1.2. Заявленные научные результаты на конец года

В конце первого года выполнения проекта будет получена гидродинамическая картина полей скоростей, электронных и ионных температур, давлений, плотности при абляции пленки золота, нанесенной на стеклянную подложку, под действием фемтосекундных лазерных импульсов.

Будут рассчитаны необходимые в гидродинамических расчетах термодинамические функции золота в двухтемпературном состоянии с сильно различающимися температурами электронов и ионов.

В двухтемпературном состоянии будут рассчитаны кинетические коэффициенты, определяющие прогрев мишени из золота ультракоротким лазерным излучением – электронный коэффициент теплопроводности и коэффициент электрон-ионного обмена энергией.

Будет произведен расчет взаимодействия ультракороткого лазерного импульса со сферической металлической наночастицей. Рассмотрение будет проведено с применением гидродинамического кода в лагранжевых переменных в сферической геометрии. Будет разработана модификация многопроцессорного молекулярно-динамического кода на случай сферических частиц.

Будут произведены эксперименты по изучению строения края лазерного кратера, образованного действием фемтосекундных лазерных импульсов оптического диапазона частот, на лазерных системах в Kansai Photon Science Institute (KPSI), Япония (группой по руководством участника проекта А.Я. Фаенова).

Будет написан многомерный гидродинамический код, с помощью которого будет получен расчет течения вещества лазерной мишени на границе абляционного кратера при

параметрах вещества мишени и лазерного импульса, соответствующих экспериментам, проводимым группой А.Я. Фаенова в Kansai Photon Science Institute (KPSI), Япония.

1.3. Сведения о фактическом выполнении плана работы на год (фактически проделанная работа, до 10 стр.)

Все планируемые на год работы выполнены полностью.

Изучаемые в рамках проекта РФФ 14-19-01599 явления возникают при воздействии ультракоротких импульсов (УКЛИ) на вещество. Их исследование требует, во-первых, построения теоретических моделей из разных разделов физики от возбуждения электронов светом до термодинамики, кинетики и гидродинамики конденсированных сред с учетом плавления и испарения и, во-вторых, искусного численного моделирования. В соответствии с этими условиями подобран наш коллектив. Кроме того, необходим контакт с экспериментаторами и расчетчиками. В 2014 г. мы особенно плотно взаимодействовали с ОИВТ РАН (лаб. М.Б. Аграната, лаб. УрС К.В. Хищенко) и с группой проф. Kawachi из Kansai Photon Science Institute (KPSI), Japan Atomic Energy Agency (JAEA) по проекту РФФ, см. [2,4,6]. Это говорится здесь для того, чтобы подчеркнуть, решение каждой из заявленных проблем требует анализа ряда сопутствующих задач и поиска оптимальных путей, поскольку прямое численное решение не проходит (для него нужны слишком высокие параметры ЭВМ, которых нет на сегодня). Хороший пример связан с анализом процессов при воздействии УКЛИ на тонкую пленку металла, напыленного на подложку. Данная проблема имеет широкий круг важных приложений; скажем об этом ниже, под оценкой необходимых численных ресурсов и путей обхода чрезмерных требований на эти ресурсы.

Пример геометрии нанобампа (nanobump), созданного воздействием УКЛИ, показан на рис.1 (в приложенном файле). Размер облученного пятна порядка нескольких микрон, толщина металлической пленки порядка нескольких десятков нанометров. Объем этой области металла порядка 10^8 нм³, в ней содержится 10^{10} атомов. Такого же порядка должно быть число атомов, учтенных в подложке, поскольку время отрыва определяется звуковым масштабом времени. За это время акустический сигнал пробегает по толщине пленки, а скорости звука в пленке и подложке одного порядка. Формирование нанобампа требует единиц и десятков наносекунд. Молекулярно-динамическое (МД) моделирование 10^{10} атомов на десятках наносекунд не представляется возможным на современной вычислительной технике (на два-три порядка превосходит доступные возможности).

В результате работ, проведенных в рамках проекта РФФ, удалось нащупать пути обхода трудностей и понять механизмы, лежащие в основе процессов, инициированных УКЛИ в пятнах облучения предельно малого размера (порядка длины волны света). Часть этих результатов опубликована [1], часть выйдет из печати в январе 2015 [3] и готовится к публикации [4,6]. Одно упрощение было связано с разделением процесса отделения металлической пленки от подложки от процесса дальнейшего полета пленки. Дело в том, что скорость (десятки м/с), с которой летит пленка намного меньше скорости звука в конденсированных средах (несколько км/с). Тогда как деляминация пленки от подложки происходит за времена, определяемые акустическим масштабом времени. Акустический масштаб находится делением толщины пленки (до 100 нм) на скорость звука (получаются десятки пикосекунд), а время формирования нанобампа порядка времени пролета диаметра пятна облучения (не менее мкм) на скорость полета после деляминации (результат. десятки и даже сотни наносекунд, нс).

Большая разница во временах позволяет нам решать задачу деляминации отдельно от задачи полета пленки. При этом используются разные коды. Для описания деляминации применяется двухтемпературный гидродинамический код, а для моделирования движения деляминированной пленки используется производительный многопроцессорный (тысячи процессоров) алгоритм решения уравнений МД (вычисления выполнялись на суперкомпьютере Ломоносов). Двухтемпературная гидродинамика описывает сложную составную физику взаимодействия излучения с веществом и последующих явлений. А именно, (i) поглощение лазерного излучения в скин-слое, (ii) перенос тепла из скина электронной теплопроводностью (в случае диэлектрической подложки, теплопроводность подложки не существенна на временах деляминации), (iii) двухтемпературную релаксацию, которая постепенно выравнивает локальные температуры электронной и ионной подсистем (изначально энергия поглощается электронами), (iv) плавление металла на двухтемпературной стадии, (v) игру гидродинамических волн в пленке и в подложке, (vi) возникновение растягивающих напряжений, и (vii) отрыв (деляминацию) пленки от подложки по поверхности их контакта.

Поскольку диаметр пятна (порядка мкм) больше толщины пленки (меньше десятой от мкм), двухтемпературная гидродинамика используется в одномерном приближении. Это еще одно упрощение. Трехмерные эффекты учитываются путем вычисления скорости, с которой летит пленка после деляминации, как функции поглощенной поверхностной плотности энергии. Поглощенная энергия определяется профилем распределения интенсивности по фокальному пятну. Таким образом, профиль интенсивности пересчитывается в профиль скорости пленки. Затем с помощью МД решается трехмерная задача о движении пленки, постепенно формирующей нанобамп. Понятно, что форма бампа (выпучивания пленки) зависит от распределения интенсивности по пятну. Таким образом, можно создавать выпучивания самых разных геометрических форм.

В современной физике важной является проблема переноса данных, полученных в МД на атомарных масштабах, на мезоскопический масштаб и еще более крупные масштабы. В нашей проблеме желательно с помощью системы из уменьшенного числа атомов (до ста миллионов) описать движение, в которое включено порядка 10^{10} атомов. Анализ задачи показывает, что это возможно с помощью преобразований скейлинга, которые будут дорабатываться на следующем этапе выполнения проекта. В результате уже проведенной за полгода участия в проекте работе, впервые описаны механизмы формирования заострений на вершинах нанобампов [1,3].

Скажем коротко о приложениях технологий формирования одиночных трехмерных нанобампов или их массивов.

Деляминация используется при получении наночастиц контролируемого размера; в методиках laser induced forward transfer (LIFT) и laser induced backward transfer (LIBT), которые в свою очередь применяются в технологиях laser direct write, с помощью которых под контролем компьютера серийным образом изготавливают объемные шаблоны. Преимущества LIFT/LIBT связаны с применимостью к разным классам материалов от металлов до мягких сред (например, биоматериалы) при вариации оптической энергии. Эти технологии используются при лазерном печатании биосенсоров, а также пленочных транзисторов, и сборке других изделий микроэлектроники. Таким же способом изготавливаются квантовые точки. Посредством методик LIFT/LIBT переносят порошки и наночастицы с подложки на ресивер («печатание», «лазерный принтер»).

Эксперименты с формированием нанобампов представлены в работах [7-9]. До сих пор не существовало их описания, опыты велись фактически вслепую, методом проб и ошибок. Наша работа позволяет, во-первых, понять причины, по которым формируется нанобамп, во-вторых, дает количественное описание, и, в-третьих, отсюда следуют рецепты управления. Например, путем регуляции темпа заморозки переходом к сплавам, или путем вариации толщины пленки и характеристик субстрата.

Проблема нанобампов привела к задаче о динамике тонкой пленки на подложке. За шесть месяцев выполнения проекта были выполнены детальные исследования пленок из золота и серебра на стеклянной подложке (пирекс). Перед началом численного двухтемпературного гидродинамического моделирования были разработаны двухтемпературные уравнения термодинамического состояния (УРС). О разработке двухтемпературного УРС золота будет сказано ниже в п. 1.4 отчета. По этому поводу готовится публикация [5]. Анализ задачи позволил впервые получить полную классификацию режимов динамического поведения пленок на подложках. Хотя разлет свободновисящей (свободновисящей – обе границы свободные) пленки рассматривался ранее [10,11], но описания режимов динамического поведения в случае, когда у пленки одна граница свободна, а другая граница является контактом с диэлектрической средой, до сих пор не было. Между тем это важный случай, используя который можно генерировать ту или иную волну в подложке. Из анализа динамики пленки на подложке следуют дальнейшие (план на 2015 г.) предложения относительно использования таких пленок. То, что сделано в этом году, готовится к быстрой публикации в электронном журнале [6]. Затем будет подготовлена публикация для обычного журнала.

Другое направление исследований в отчетном году было связано с оптическими свойствами быстро нагретых тонких пленок на подложках. Была использована описанная выше модель двухтемпературного металла, к которой добавлена модель диэлектрической функции с учетом двухтемпературности (т.е. электронная температура может быть намного выше, чем температура ионной подсистемы). Здесь мы работаем в контакте с экспериментаторами, с целью использовать их измерения и наши расчеты для уточнения физики двухтемпературного состояния. Готовится соответствующая публикация. Продолжение этой работы входит в план на 2015 г.

Еще одно направление работы связано с измерениями и расчетами излучения металлов в двухтемпературном состоянии, публикация [2]. Двухтемпературные состояния готовились с помощью воздействия короткого (7 пс) лазерного импульса с мягким рентгеновским квантом (энергия кванта 89.3 эВ).

За истекшие шесть месяцев работы по проекту была проведена большая работа по подготовке многомерных гидрокодов для расчетов воздействия УКЛИ на твердые мишени за рамками одномерного случая. Это важный раздел нашего проекта, поддержанного РНФ. Его выполнение позволит, во-первых, понять, что происходит на краях лазерных кратеров, возникающих вследствие воздействия УКЛИ. Во-вторых, можно будет проанализировать задачу о повторных воздействиях и эффектах инкубации. Об инкубации говорят многие, но до сих пор нет никакой ясности, как именно протекает и накапливается инкубация. Наша группа развивает подход, в котором молекулярная динамика, многомерная тепловая задача и многомерная гидродинамическая задача дополняют друг друга.

Динамика упруго-пластических переходов при воздействии УКЛИ является важным пунктом программы исследований по гранту РНФ. Эта проблема интересует многих прикладников, которые работают в области ударно-волновых процессов и в области задач прочности. Речь идет о создании технологий упрочнения тонких поверхностных слоев рабочих поверхностей изделий и инструментов. Наш подход заключается в сочетании экспериментальных данных и данных МД моделирования с одной стороны и результатов гидродинамического моделирования с помощью кодов, в которых используются либо модель Прандтля-Рейса (модель 1), либо модель с кинетикой дислокаций (модель 2). В кинетической модели учитываются зарождение и подвижность дислокаций и их концентрация. За отчетный период выполнены МД расчеты упруго-пластических волн в алюминии и тантале. Выполнено сравнение этих МД расчетов с данными эксперимента. На нынешнем этапе ведется детальное сравнение МД данных с тем, что получается в гидродинамике с моделями 1 и 2. Задача уточнение полуфеноменологических моделей 1 и 2. Выполнение будет продолжено и, мы надеемся, закончено в 2015 г.

Проанализирована ситуация на контакте между металлом и прозрачной для оптического излучения диэлектрической средой. Выполнены расчеты, когда поглощение УКЛИ происходит в тонком скин-слое металла, прилегающем к контакту. К настоящему моменту изучена начальная стадия, на которой существенны двухтемпературные эффекты. Продолжительность этой стадии зависит от металла. Для алюминия, железа длительность релаксации порядка пикосекунды, для серебра и золота примерно десять пс. Изучена средняя стадия, на которой масштаб времени определяется временем прохождения звуком прогретого слоя. Предстоит изучить позднюю стадию продолжительностью порядка одной наносекунды и исследовать задачу в не одномерной постановке. Это предстоит сделать в следующем году. Проведенный анализ показал, что динамика развития на средней стадии зависит от отношения акустических импедансов металла и среды, в которую происходит расширение нагретого металла. Обычно акустический импеданс металла намного больше, чем импеданс среды (например, случай золото-вода). Хотя в случае с алюминием и это отношение порядка единицы. При большом отношении импедансов в воду идет ударная волна, а в металл – волна разрежения. К сожалению, пока у нас нет УРС воды. Расчеты проведены для контакта металл-стекло. Общая картина такая же, но детали в случае воды или других жидкостей, используемых в экспериментах (спирты) отличаются.

За отчетный период двухтемпературный гидрокод был обобщен со случая плоской одномерной геометрии на случай сферической геометрии. Проанализирована и учтена специфика граничного условия в центре координат в двухтемпературной ситуации. Проведены первые расчеты. При этом поглощение лазерного излучения сферической частицей было включено в приближении теории Ми. Предстоит изучить результаты расчетов, особенно относящиеся к плавлению малых частиц и их разрушению после облучения высоким световым потоком. Это будет сделано в наступающем году.

Все планируемые на год работы выполнены полностью: да
(в случае выбора «Нет» необходимо дать пояснения о причинах неполного выполнения работ)

1.4. Сведения о достигнутых конкретных научных результатах в отчетном году (до 5 стр.)

Все запланированные в отчетном году научные результаты достигнуты.

За истекший период выполнения работ по гранту РНФ была начата разработка вопроса о структурировании тонких пленок на подложке при предельно малых размерах пятна воздействия ультракороткого лазерного импульса (УКЛИ). Была изучена стадия поглощения лазерной энергии пленкой. Исследованы процессы выравнивания температур и распространения поглощенного тепла по толщине пленки (толщина пленки 50-100

нм в разы превосходит толщину скин-слоя). Показано, практически мгновенно тепло распространяется по пленке – время выравнивания электронных температур на облученной фронтальной и тыльной стороне пленки (с точностью проценты) составляет лишь одну пикосекунду (пс). Для пленок толщиной 50-100 нм это время намного меньше акустического масштаба времени. В случае золота и серебра время гомогенизации электронной температуры по толщине пленки также меньше времени электрон-ионной температурной релаксации. В такой ситуации нет разницы между облучением пленки со стороны вакуума по сравнению со случаем, когда лазерный импульс приходит на контакт пленки с подложкой, проходя через прозрачную подложку. Сказанное относится к нашему диапазону поглощенных флюенсов (единицы и десятки мДж/см², флюенс суть поверхностная плотность лазерной энергии). Проанализирован процесс деляминации пленки от подложки, найдена скорость пленки после деляминации. Распределение этих скоростей по пятну облучения используется при МД моделировании наноструктурирования пленки. Часть результатов опубликована, часть находится в процессе публикации [1,3,4,6]. Продолжение работы по наноструктурированию входит в план на 2015 г.

Впервые рассчитаны электронный энергетический спектр, плотность состояний электронов и электронные термодинамические функции золота в зависимости от плотности (в диапазоне 0.7-2 величины нормальной плотности) и электронной температуры (до 55 кК). Выбор области исследуемых параметров обусловлен характерными значениями как давления, так и электронной температуры, достигаемых при облучении фемтосекундными лазерными импульсами умеренной интенсивности.

В этих расчетах был использован пакет основанных на теории функционала плотности квантовомеханических программ VASP, в котором применяется метод присоединенных плоских волн и обменно-корреляционный функционал, известный как Perdew-Burke-Ernzerhof (PBE)-функционал [14]. Кинетическая энергия электронов ограничивалась значением 500 эВ. Электронный энергетический спектр рассчитывался в 21 x 21 x 21 значениях волновых векторов зоны Бриллюэна, обеспечивающих наилучшую аппроксимацию интегрирования по зоне Бриллюэна суммированием по конечному множеству волновых векторов [13], а электронные состояния при ненулевой электронной температуре заполнялись в соответствии с распределением Ферми-Дирака. Число незаполненных при нулевой температуре уровней энергии было выбранным 30. Это было достаточным для проведения расчетов при рассмотренных нами высоких электронных температурах. Перечисленные значения параметров, используемых в алгоритме расчета, обеспечивают проведение расчетов на высоком, соответствующем лучшему мировому, уровне.

Равновесная постоянная градиентированной (г.ц.к.) решетки при нулевой температуре при этом получена равной 0.415 нм (что очень близко к экспериментальному значению 0.408 нм). Наряду с расчетом электронного спектра благородного металла - золота - мы провели вычисления для т.н. простого металла - алюминия, в котором d-электроны отделены от внешних s- и p-электронов широкой запрещенной зоной и не возбуждаются в рассматриваемом нами интервале электронных температур. Алюминий также имеет г.ц.к. кристаллическую решетку. Для алюминия расчеты электронного спектра и термодинамических функций велись с помощью пакета программ Elk [12], также использующего метод присоединенных плоских волн (в форме muffin-tin) и PBE обменно-корреляционный функционал. Muffin-tin-радиус в расчетах был взят постоянным и равным 2.2 (в атомных единицах); сетка волновых векторов Сетка волновых векторов в зоне Бриллюэна составляла 20 x 20 x 20 значений волновых векторов. В расчетах находился спектр энергий электронов в энергетических зонах, который определял свободную энергию электронов. Проводимый при этом процесс самосогласования спектра и определяемых им потенциалов заканчивался, когда свободная энергия изменялась не более, чем на 10^{-6} эВ в случае золота и не более, чем на 10^{-6} эВ (единица энергии Хартри $1\text{Ha}=27.2$ эВ). Это обеспечивает высокую, находящуюся на лучшем мировом уровне, точность расчетов. Данные, полученные в нашем расчете, хорошо согласуются с результатами исследования плотности электронных состояний для золота, проведенными группой Ж. Клеруэна и В. Рекуле [15,20] из французского Комиссариата по атомной энергии.

Оказалось, что находятся в согласии данные для плотностей электронных состояний как при низких, так и высоких электронных температурах. Не менее важно, то, что получаемая в *ab initio* расчете зависимость давления от плотности гидростатического сжатия при нулевой температуре, обнаружена в хорошем согласии с имеющимися данными экспериментов по сжатию в алмазных наковальнях [16,17], а также с данными работы С.В. Старикова [18,19] по построению EAM потенциала золота для проведения расчетов методом молекулярной динамики фемтосекундной абляции в золоте. Эти результаты доказывают, что выбранная схема расчета термодинамического состояния золота при изменении плотности является корректной, а обнаруженное поведение плотности электронных состояний в данных условиях позволяет построить двухпараболическую модель, необходимую для воспроизведения эффектов электронного нагрева и изменения плотности, влияющих на значения кинетических коэффициентов.

Группой впервые было произведено изучение влияния электронного нагрева на температуру плавления по весьма простой схеме. Известно, что продольная скорость звука в кристаллическом веществе определяется через величину упругого модуля C_{11} . Расчет такого модуля в наиболее простом, но в то же время достаточно точном вблизи равновесного объема, случае может быть произведен избегая расчетов фоновых динамических матриц, как это было сделано в работе [15]. Такой расчет был основан на определении отклика нескольких металлов, включая золото, на одноосное сжатие в направлении с индексами Миллера [100] для гранецентрированных кубических кристаллов и направлении [110] для объемно-центрированных кубических кристаллов. Используя аналогично работе [15] критерий Линдемана, связывающий величину температуры плавления с величиной скорости звука в веществе, можно найти связь между температурой неравновесной электронной подсистемы в холодной решетке и температуры плавления. Два подхода для золота приводят к приблизительно одинаковому результату, показывая, что нагрев до 5 эВ, ведет к двукратному увеличению температуры плавления. Объем металла при этом оставался фиксированным. В таких условиях совместно с электронным нагревом проявляется значительное электронное давление, составляющее в зависимости от металла от нескольких десятков до нескольких сотен ГПа при указанной температуре электронов. Таким образом, можно утверждать, что в при изохорном электронном нагреве согласно данным *ab initio* расчетов стоит ожидать заметной стабилизации твердой фазы.

Нами рассчитан тепловой вклад в электронные термодинамические функции золота в зависимости от электронной температуры и плотности кристалла. Учет зависимости этих функций от плотности важен, т.к. разработанный нами гидродинамический код позволяет изучать волны сжатия-расширения, возникающие в металле на двухтемпературной стадии. Впервые это сделано в широком интервале как плотности металла (охватывающем и разреженное вещество, и сильно сжатое), так и температуры электронов (от температур порядка 10^4 - 10^5 К, до значений, составляющих несколько эВ). Только такой широкий диапазон параметров, характеризующих вещество мишени, позволяет адекватно описывать процессы, происходящие в нем, при действии на твердую мишень ультракоротких лазерных импульсов. Как показывают наши расчеты, изменение плотности является существенным фактором, влияющим на электронный спектр. В золоте со сжатием увеличиваются ширины зон и уменьшаются значения эффективных масс как электронов как в s-p зонах, так и в d-зоне. В то же время в алюминии эффективная масса электронов внешних зон не меняется в рассматриваемом нами диапазоне плотностей, переходящем от расширения в 1.36 раз к сжатию в 2 раза.

Рассчитаны свободная энергия, внутренняя энергия и давление золота и алюминия в зависимости от двух параметров - электронной температуры и сжатия. Это позволило найти тепловой вклад во внутреннюю энергию и давление. Расчеты для золота показывают сильное отклонение тепловой части внутренней энергии от значений, получаемых в часто используемой для теплового возбуждения электронов модели свободного Ферми-газа. В то же время эта модель хорошо описывает тепловое изменение внутренней энергии в алюминии. То же самое справедливо в отношении теплового вклада в давление. В алюминии этот вклад хорошо описывается моделью свободного Ферми-газа. В золоте такая модель дает результаты, плохо согласующиеся с полученными в квантовомеханических расчетах. Это приводит к тому, что такой важный параметр как электронный коэффициент Грюнайзена, показатель в степенной зависимости энергии от плотности, равный $2/3$ в модели свободного Ферми-газа, оказывается близким к этому значению в алюминии и сильно отличается в золоте. Получены аналитические выражения для тепловой части электронной внутренней энергии и давления золота в зависимости от плотности и температуры электронов в рассматриваемом нами диапазоне, представляющем большой интерес в задачах гидродинамического исследования абляции металлов под действием ультракороткого лазерного излучения. Применение этих аналитических выражений в таких задачах позволяет ускорить процесс их численного решения.

Гидродинамические уравнения, описывающие динамику абляции твердых мишеней под действием ультракоротких лазерных импульсов в том числе и на временах, соответствующих двухтемпературному состоянию вещества, содержат коэффициенты, определяющие кинетику электронной теплопроводности и обмена теплом между электронами и ионами. Эти коэффициенты переноса, коэффициент электронной теплопроводности и коэффициент электрон-ионной релаксации энергии, определяют скорость распространения тепловой энергии, поглощаемой электронами на глубине проникновения излучения данной частоты, вглубь мишени. От величины этих коэффициентов зависит, таким образом, толщина поверхностного слоя мишени, в котором создаются повышенная температура и повышенное давление, приводящие к расширению этого нагретого слоя и в конечном итоге к абляции на поверхности мишени. Для вычисления коэффициента электронной теплопроводности наряду с частотами столкновений электронов с фононами важно нахождение частот электрон-электронных столкновений, величина которых растет с увеличением температуры электронов,

достигающей в нашем случае величин порядка нескольких эВ. Рассчитан коэффициент электронной теплопроводности за счет только электрон-электронных столкновений (столкновений электронов s-p-зон между собой и столкновений электронов s-p-зоны с электронами d-зоны). Получены эффективные частоты электрон-электронных столкновений для золота (благородного металла с энергетической зоной d-электронов, находящейся целиком внутри s-, p-зоны) в двухтемпературном режиме взаимодействия лазерного излучения с металлической мишенью в широком диапазоне электронных температур до 55 кК. При достаточно высоких температурах из рассмотренного нами диапазона происходит возбуждение d-электронов под действием лазерного излучения, которое сказывается также на кинетике электрон-фононных столкновений. С добавлением частот электрон-фононных столкновений, рассчитываемых с использованием системы кинетических уравнений для столкновений s- и d-электронов с фононами, рассчитан в зависимости от температуры электронов коэффициент электронной теплопроводности. При этом впервые учтена зависимость этих частот от электронной температуры. В том же диапазоне температур как функция электронной температуры вычислен коэффициент электрон-ионного обмена энергией, определяющий скорость выравнивания температур электронов и ионов после поглощения лазерного излучения электронами. Проведено сравнение зависимости вычисленных коэффициентов от электронной температуры со случаем простых металлов (алюминия), в которых лазерным излучением возбуждаются только s- и p-электроны.

При вычислении как коэффициента электронной теплопроводности, так и коэффициента электрон-ионного теплообмена важное значение имеет экранирование электрон-электронного взаимодействия. Расчеты частот коэффициента электрон-ионного теплообмена проведены с использованием различных видов функций, описывающих такое экранирование (Томаса-ферми [21], Линдхарда [22], Хаббарда [23], Сингви-Шьеландера [24]).

При вычислении коэффициента электрон-ионного теплообмена показано, что вклад d-электронов в коэффициент более чувствителен к виду экранирующей функции, чем вклад s-электронов.

Полученные кинетические коэффициенты использованы в уравнениях двухтемпературной гидродинамики при исследовании динамики движения пленок из золота под действием фемтосекундных лазерных импульсов умеренной интенсивности.

Одним из основных инструментов в нашей работе является двухтемпературный гидрокod. В этом коде учтена вся физика, связанная с двухтемпературными состояниями. Сюда входит обобщение уравнений термодинамического состояния (УРС) на двухтемпературный случай (см. выше описание случаев золота и алюминия), аппроксимации теплопроводности в двухтемпературных состояниях, аппроксимации коэффициента электрон-ионного теплообмена. При этом учтены эффекты упругости среды, существенные в упругих волнах сжатия и растяжения.

Причем этот код написан в одномерной плоской геометрии, соответствующей задаче о воздействии УКЛИ с большим пятном нагрева на поверхности мишени, когда размер пятна намного больше, чем глубина слоя прогрева. В работе за 2014 г. этот код был переписан на случай сферической симметрии. Проведены расчеты. Пока это расчеты воздействия УКЛИ на шарик в вакууме. Далее будет рассмотрен случай шарика в конденсированной среде – наночастица в твердой матрице или в составе эмульсии. Проведены первые расчеты нагрева наночастиц методом МД. Правда, пока в цилиндрической геометрии. Соответствующие материалы готовятся к публикации.

Сравнительно недавно в Канзайском институте фотонных исследований (Kansai Photon Science Institute, Япония) был создан малогабаритный (table-top) рентгеновский лазер на Ne-подобных ионах серебра с длительностью импульса 7 пс, энергией в импульсе порядка 100 нДж и частотой повторения импульсов 0.1 Гц. Как указано выше, длина волны излучения равна 13.9 нм. Не смотря на то, что такие длины волн обычно относятся к ВУФ диапазону спектра, в терминологии лазерного сообщества такие лазеры называются лазерами мягкого рентгеновского диапазона. Далее в тексте будет использована аббревиатура МРЛ.

Канзайский МРЛ построен по схеме усилитель-генератор с двойной плазменной мишенью, имеет высокую монохроматичность и когерентность, что позволяет иметь на выходе пучок с расходимостью, близкой к дифракционной. Количество когерентных фотонов, производимых за один импульс равно $\sim 10^{10}$, что достаточно для зондирования поверхности и получения изображений на ПЗС камере в одной вспышке. Лазер был использован в двух схемах диагностики облученных поверхностей. Во-первых, это рентгеновская интерферометрия и, во-вторых, это метод получения изображений (изображающая рефлектометрия)

рентгеновских пучков, отраженных от поверхностей мишеней, после облучения мишени интенсивным фемтосекундным лазерным излучением видимого диапазона.

Таким образом, была разработана рентгеновская методика, позволяющая проводить пространственно - временные исследования абляционных процессов при воздействии фемтосекундных импульсов видимого лазерного излучения с веществом. Методика включает в себя три цикла измерений, наилучшим образом реализующих преимущества как интерференционных, так и теневых диагностических методов на разных этапах абляционного процесса. Предложены принципиальные схемы микроинтерферометрии с использованием двойного зеркала Ллойда, получения колец Ньютона в излучении рентгеновского лазера на длине волны 13.9 нм и теневых изображений на больших временах.

Данные, полученные с помощью рентгеновской диагностики, позволили проследить за эволюцией облученной поверхности. Впервые такие измерения доведены до очень больших времен до нескольких сотен наносекунд, на которых оболочка облака удаляется от мишени на доли миллиметра. В настоящее время ведется работа по описанию краевой зоны кратера с помощью двумерного гидродинамического кода и с помощью МД. Проведенные исследования позволили подготовить и отправить статью [4] в журнал Applied Physics B: Laser and Optics, имеющий импакт фактор 1.634.

Все запланированные в отчетном году научные результаты достигнуты: да (в случае выбора «Нет» необходимо дать пояснения о причинах неполного достижения научных результатов)

1.5. Описание выполненных в отчетном году работ и полученных научных результатов для публикации на сайте РФФ

на русском языке

Решена проблема, связанная с формированием наноструктур при облучении тонких пленок ультракоротким лазерным импульсом (УКЛИ) с предельно малым пятном освещения (порядка длины волны света, дифракционный предел). Впервые выяснены механизмы деламинации пленки от подложки, полета пленки и формирования куполообразного нанобампа (выпучивания пленки) с застывшей струей на вершине. Явление имеет широкий круг приложений в технике лазерного переноса вещества, дозированного производства наночастиц, структурирования, для микроэлектроники и наноопластики [1,3,4,6].

Впервые решена задача о динамике тонкой пленки на подложке под действием УКЛИ [1,3,6]. Вычислены коэффициент отражения и фаза отраженного диагностического сигнала, который пребывает с заданной задержкой на облученную пленку на подложке.

Разработана и направлена в печать [5] аппроксимация уравнения состояния золота с возбужденными электронами (двухтемпературная система с горячими электронами и холодными ионами). Впервые эти удобные для работы аналитические аппроксимации учитывают не только вариацию электронной и ионной температур, но и зависимость от плотности. Данные аппроксимации опираются на серию квантовых расчетов, проведенных методом функционала плотности для золота в двухтемпературном состоянии.

Впервые выполнены измерения и соответствующие оценки излучения металлов в двухтемпературном состоянии [2], порожденном воздействием короткого (7 пс) лазерного импульса с мягким рентгеновским квантом (энергия кванта 89.3 эВ).

Выполнены работы по разработке двумерного гидрокода и двумерного кода для решения двухтемпературной задачи теплопроводности. Результаты готовятся к публикации.

Выполнен также ряд других работ.

Публикации в рамках проекта РФФ 14-19-01599

[1] Н.А. Иногамов, В.В. Жаховский, "Формирование наноразмерных струек и капель ультракоротким лазерным импульсом при фокусировке на дифракционном пределе", Письма ЖЭТФ Т. 93, В. 1, С. 6-12 (2014).

[2] M. Ishino, N. Hasegawa, M. Nishikino, T. Pikuz, I. Skobelev, A. Faenov, N. Inogamov, T. Kawachi, and M.

Yamagiwa, «Very low electron temperature in warm dense matter formed by focused picosecond soft x-ray laser pulses,» J. Appl. Phys. V. 116, 183302 (2014).

[3] Иногамов Н.А., Жаховский В.В., Хохлов В.А., «Струеобразование при отрыве металлогической пленки от подложки в результате воздействия фемтосекундного лазерного импульса,» готовится к печати (ЖЭТФ г., том 147, выпуск 1, стр. 20).

[4] N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky, N. Hasegawa, M. Nishikino, M. Yamagiwa, M. Ishino, M.B. Agranat, S.I. Ashitkov, A.Ya. Faenov, V.A. Khokhlov, D.K. Il'inskiy, T.A. Pikuz, S. Takayoshi, T. Tomita, T. Kawachi, "Three-dimensional hydrodynamics driven by ultrashort laser pulse," Applied Physics B (sent to J.)

[5] Yu.V. Petrov, K.P. Migdal, N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky, "Two-temperature equation of state for aluminum and gold with electrons excited by a ultrashort laser pulse," Applied Physics B (sent to J.)

[6] Иногамов Н.А., Жаховский В.В., Хохлов В.А., Хищенко К.В., Петров Ю.В., Ильницкий Д.К., Мигдал К.П., "Роль геометрических параметров при фемтосекундной лазерной абляции," готовится к публикации в электронном журнале "Физико-химическая кинетика в газовой динамике" (2015).

Дополнительная литература

[7] C. Unger, J. Koch, L. Overmeyer, and B.N. Chichkov, "Time-resolved studies of femtosecond-laser induced melt dynamics," Optics Express V. 20, N. 22, 24864 (2012).

[8] Y. Nakata, N. Miyanaga, and T. Okada, "Effect of pulse width and fluence of femtosecond laser on the size of nanobump array," Appl. Surf. Sci. V. 253, P. 6555–6557 (2007).

[9] Емельянов В.И., Зяряный Д.А., Ионин А.А., Киселева И.В., Кудряшов С.И., Макаров С.В., Нгуен Ч.Т.Х., Руденко А.А., «Наномасштабная гидродинамическая неустойчивость расплава при абляции тонкой пленки золота фемтосекундным лазерным импульсом,» Письма ЖЭТФ Т. 99, В. 9, С. 601-605 (2014).

[10] С.И. Анисимов, В.В. Жаховский, Н.А. Иногамов, К. Нишихара, А.М. Опарин, Ю.В. Петров, «Разрушение твердой пленки в результате действия ультракороткого лазерного импульса,» Письма ЖЭТФ Т. 77, В. 11, С. 731-736 (2003).

[11] B.J. Demaske, V.V. Zhakhovsky, N.A. Inogamov, I.I. Oleynik, «Ablation and spallation of gold films irradiated by ultrashort laser pulses,» Phys. Rev. B V. 82, 064113 (2010).

[12] <http://elk.sourceforge.net>

[13] H.J. Monkhorst, J.D. Pack. "Special points for Brillouin-zone integrations", Phys. Rev. B13, 5188, 1976.

[14] J.P. Perdew, K. Burke, M. Ernzerhof. "Generalized gradient approximation made simple", Phys. Rev. Lett., 77, No 18, 3865-3868, 1996.

[15] V. Recoules, J. Clerouin, G. Zerah et al. "Effect of Intense Laser Irradiation on the Lattice Stability of Semiconductors and Metals", Physical Review Letters, 96, 055503,1-4, (2006).

[16] D. L. Heinz, R. Jeanloz, Journal of Applied Physics, 55, 885-893, (1984).

[17] A. Dewaele, M. Torrent, P. Loubeyre et al. Physical Review B, 78, 104102,1-13, (2008).

[18] С. В. Стариков, В. В. Стегайлов, Г. Э. Норман и др. Письма в ЖЭТФ, 93, 11, 719-725, (2011).

[19] Г. Э. Норман, С. В. Стариков, В. В. Стегайлов. ЖЭТФ, 141, 5, 910-918, (2012).

[20] Fourment C., Deneuille F., Descamps D, et al. Physical Review B, 89, 161110,1-5, (2014).

- [21] L. H. Thomas. Proc. Cambridge Philos. Soc., 23, 542, (1987).
- [22] J. K. Lindhard. Dan. Vidensk. Selsk. Mat. Fys. Medd., 28, 8, (1954).
- [23] J. Hubbard. Proc. R. Soc. London Ser. A, 243, 336, (1957).
- [24] K. S. Singwi, M.P. Tosi et al. Physical Review, 176, 589, (1968).

на английском языке

The problem related to the formation of nanostructures when thin films are irradiated by ultrashort laser pulse (USLP) with extremely small light spot (of the order of the wavelength of light, at the diffraction limit) is solved. For the first time the mechanisms of delamination of the film from the substrate, film flight and the formation of cupola-shaped nanobump (bulging of the film) with a frozen stream on the top. This phenomenon has a wide range of applications in the laser technology of mass transfer, dosed production of nanoparticles , structuring , for microelectronics and nanoplasmonics [1,3,4,6] .

For the first time the problem of the dynamics of a thin film on a substrate under the influence of USLP [1,3,6] is solved. Reflection coefficient and phase of the reflected diagnostic signal, which arrives with the predetermined delay onto the irradiated on the substrate film, are calculated.

An approximation of the equation of state of gold with excited electrons (two-temperature system with hot electrons and cold ions) is developed and submitted for publication [5]. For the first time these useful analytical approximations take into account not only the variation of the electron and ion temperatures, and density dependence. These approximations are based on a series of quantum calculations made by the density functional method for gold in the two-temperature state.

For the first time measurements and appropriate evaluation of irradiation from metals in the two-temperature state [2] generated by the action of a short (7 ps) laser pulse with a soft X-ray photons (photon energy is 89.3 eV) has been made.

The works on the creation of two-dimensional hydrocode and two-dimensional code for the solution of the two-temperature heat conduction problem were carried out. The results are being published.

A number of other works were carried out.

Publications within the project RNF-14-19-01599

- [1] Inogamov N. A., Zhakhovskii V. V. "Formation of nanojets and nanodroplets by an ultrashort laser pulse at focusing in the diffraction limit", JETP Letters, V. 100, 4-10 (2014)
- [2] M. Ishino, N. Hasegawa, M. Nishikino, T. Pikuz, I. Skobelev, A. Faenov, N. Inogamov, T. Kawachi, and M. Yamagiwa, «Very low electron temperature in warm dense matter formed by focused picosecond soft x-ray laser pulses,» J. Appl. Phys. V. 116, 183302 (2014).
- [3] Inogamov N. A. , Zhakhovskii V.V, Khokhlov V.A, "Jet formation in the separation of the metal film on the substrate by the impact of a femtosecond laser pulse", JETP, V 120 (2015)
- [4] N.A. Inogamov, V .V. Zhakhovsky, N. Hasegawa, M. Nishikino, M. Yamagiwa, M. Ishino, M.B. Agranat, S.I. Ashitkov, A.Ya. Faenov, V.A. Khokhlov, D.K. Ilitsky, T.A. Pikuz, S. Takayoshi, T. Tomita, T. Kawachi, "Three-dimensional hydrodynamics driven by ultrashort laser pulse," Applied Physics B (sent to J.)
- [5] Yu.V. Petrov, K.P. Migdal, N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky, "Two-temperature equation of state for aluminum and gold with electrons excited by a ultrashort laser pulse," Applied Physics B (sent to J.)
- [6] Inogamov N.A, Zhakhovskii V.V, Khokhlov V.A, Khishchenko K.V, Petrov Yu.V, Ilitsky D.K, Migdal K.P, "The role of geometrical parameters in femtosecond laser ablation, "to be published in the electronic journal" Physical and

chemical kinetics in gas dynamics "(2015).

Additional literature

- [7] C. Unger, J. Koch, L. Overmeyer, and B.N. Chichkov, "Time-resolved studies of femtosecond-laser induced melt dynamics," *Optics Express* V. 20, N. 22, 24864 (2012).
- [8] Y. Nakata, N. Miyanaga, and T. Okada, "Effect of pulse width and fluence of femtosecond laser on the size of nanobump array," *Appl. Surf. Sci.* V. 253, P. 6555–6557 (2007).
- [9] Emel'yanov V.I., Zayamiy D.A., Ionin A.A., Kiseleva I.V., Kudryashov S.I., Makarov S.V., Nguyen T.H.T., Rudenko A.A. "Nanoscale hydrodynamic instability in a molten thin gold film induced by femtosecond laser ablation", *JETP Letters*, V. 99, 518-522, (2014)
- [10] Anisimov S.I., Zhakhovskii V.V., Inogamov N.A., et al. "Destruction of a solid film under the action of ultrashort laser pulse" *JETP Lett.*, 2003, 77, 606-610
- [11] B.J. Demaske, V.V. Zhakhovsky, N.A. Inogamov, I.I. Oleynik, «Ablation and spallation of gold films irradiated by ultrashort laser pulses,» *Phys. Rev. B* V. 82, 064113 (2010).
- [12] {it <http://elk.sourceforge.net>}
- [13] H.J. Monkhorst, J.D. Pack. "Special points for Brillouin-zone integrations", *Phys. Rev. B* 13, 5188, 1976.
- [14] J.P. Perdew, K. Burke, M. Ernzerhof. "Generalized gradient approximation made simple", *Phys. Rev. Lett.*, 77, No 18, 3865-3868, 1996.
- [15] V. Recoules, J. Clerouin, G. Zerah et al. "Effect of Intense Laser Irradiation on the Lattice Stability of Semiconductors and Metals", *Physical Review Letters*, 96, 055503,1-4, (2006).
- [16] D. L. Heinz, R. Jeanloz, *Journal of Applied Physics*, 55, 885-893, (1984).
- [17] A. Dewaele, M. Torrent, P. Loubeyre et al. *Physical Review B*, 78, 104102,1-13, (2008).
- [18] С. В. Стариков, В. В. Стегайлов, Г. Э. Норман и др. *Письма в ЖЭТФ*, 93, 11, 719-725, (2011).
- [19] Г. Э. Норман, С. В. Стариков, В. В. Стегайлов. *ЖЭТФ*, 141, 5, 910-918, (2012).
- [20] Fourment C., Deneuille F., Descamps D, et al. *Physical Review B*, 89, 161110,1-5, (2014).
- [21] L. H. Thomas. *Proc. Cambridge Philos. Soc.*, 23, 542, (1987).
- [22] J. K. Lindhard. *Dan. Vidensk. Selsk. Mat. Fys. Medd.*, 28, 8, (1954).
- [23] J. Hubbard. *Proc. R. Soc. London Ser. A*, 243, 336, (1957).
- [24] K. S. Singwi, M.P. Tosi et al. *Physical Review*, 176, 589, (1968).

1.6. Файл с дополнительными материалами (при необходимости представления экспертному совету РНФ дополнительных графических материалов к отчету по проекту имеется возможность прикрепить файл размером до 3 Мб в формате pdf).

скачать...

1.7. Перечень публикаций за год по результатам проекта (публикации добавляются из списка зарегистрированных участниками проекта публикаций)

Ishino M., Hasegawa N., Nishikino M., Pikuz T., Skobelev I., Faenov A., Inogamov N., Kawachi T., Yamagiwa M. (2014) **Very low electron temperature in warm dense matter formed by focused picosecond soft x-ray laser**

1.8. В 2014 году возникли исключительные права на результаты интеллектуальной деятельности, созданные при выполнении проекта:

Нет

1.9. Показатели реализации проекта

Показатели	Единица измерения	2014 год	
		план	факт
Число членов научной группы	человек	12	12
Число исследователей в возрасте до 39 лет среди членов научной группы	человек	3	4
в том числе:			
кандидатов наук в возрасте до 35 лет (включительно)	человек		1
аспирантов (интернов, ординаторов) и (или) студентов очной формы обучения	человек		2
Количество лиц категории «Вспомогательный персонал»	человек		
Количество публикаций по проекту членов научной группы в рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях, индексируемых в базе данных «Сеть науки» (Web of Science)	Ед.	3	3
Количество публикаций по проекту членов научной группы в рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях, индексируемых в базе данных «Скопус» (SCOPUS)	Ед.	3	3
Количество публикаций по проекту членов научной группы, индексируемых в базе данных «РИНЦ»	Ед.	3	3
Количество монографий по проекту членов научной группы	Ед.	0	0
Количество зарегистрированных результатов интеллектуальной деятельности по проекту членов научной группы	Ед.		0

1.10. Информация о представлении достигнутых научных результатов на научных мероприятиях (конференциях, симпозиумах и пр.) (в том числе форма представления – приглашенный доклад, устное выступление, стендовый доклад и пр.)

Конференция "New Models and Hydrocodes for Shock Wave Processes in Condensed Matter, 10th Meeting" Pardubice, Czech Republic, July 27 – August 1, 2014

Устный доклад Vasily Zhakhovsky, Nail Inogamov, Sergey Anisimov, "Peculiar Structure of Two-Zone Elastic-Plastic Single Shock Wave in Copper in [100] Direction"

и стендовый доклад Denis Il'nitsky, Nail Inogamov, Vasily Zhakhovsky, Kirill Migdal, "Mathematical Modeling of Elasto-Plastic Deformation of Metals Irradiated by Ultrashort Laser Pulses"

Конференция "Twelfth International Seminar MATHEMATICAL MODELS & MODELING IN LASER PLASMA PROCESSES &

ADVANCED SCIENCE TECHNOLOGIES", May 31 - June 7, 2014

Приглашенный доклад N.A. Inogamov, "Femtosecond ablation: excitation of electrons, thermomechanical disintegration, and surface structuring"

Конференция "9th International Conference on Photo-Excited Processes and Applications ICPEPA-9", September 30 – October 3, 2014, Matsue, Japan

Устный доклад М. В. Агранат, С. И. Ашитков, Баба, Т. Еяма, А. Я. Фаенов, Н. Хасегавы, Д. Хатоми, Д. К. Илнitsky, Н. А. Иногамов, Т. Кавачи, В. А. Хохлов, Я. Минами, М. Нishikino, Н. А. Ониси, Т. А. Пикюз, В. В. Шепелев, Т. Суэмото, С. Такэюши, Р. Такеи, Т. Томита, М. Ямагива, В.В. Zhakhovsky, Yu.V. Petrov, "Hydrodynamics driven by ultrashort laser pulse"

Научно-координационная сессия "Исследования неидеальной плазмы"
2-3 декабря 2014 г., Президиум РАН, Ленинский проспект 32а, Москва

Устный доклад:

Иногамов Н.И., Анисимов С.И., Хохлов В.А., Петров Ю.В., Жаховский В.В.

"Новые возможности диагностики двухтемпературных состояний, возникающих при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов"

Конференция "The Seventh International EMMI Workshop on Plasma Physics with Intense Heavy Ion and Laser Beams at FAIR"

December 9-10, 2014, Moscow, Russia

Стеновый доклад Н.А. Иногамов, "FEMTOSECOND LASER ABLATION: THREE-DIMENSIONAL EFFECTS"

8-я Всероссийская школа-семинар «Аэротермодинамика и физическая механика классических и квантовых систем», 2-3 декабря 2014 г., Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН

Устный доклад:

«Молекулярная динамика и методы Монте-Карло в задачах лазерной абляции: результаты применения».

Докладчик Н.А. Иногамов

Настоящим подтверждаю:

- самостоятельность и авторство текста отчета о выполнении проекта;
- что при обнародовании результатов выполненной в рамках поддержанного РНФ проекта научная группа ссылалась на получение финансовой поддержки проекта от РНФ и на организацию, на базе которой выполнялось исследование;
- что согласен с опубликованием РНФ сведений из отчета о выполнении проекта, в том числе в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»;
- что проект не имеет других источников финансирования;
- что проект не является аналогичным по содержанию проекту, одновременно финансируемому из других источников.

Подпись руководителя проекта _____/С.И.Анисимов/

Сведения о публикациях по результатам проекта
№ 14-19-01599
Фемтосекундное лазерное плавление, кавитация и абляция в
трехмерной геометрии
на 2014 год.

(заполняется отдельно на каждую публикацию, для формирования п.1.7. отчета) В карточке публикации все данные приводятся на языке и в форме, используемой базами данных «Сеть науки» (Web of Science), «Скопус» (Scopus) и/или РИНЦ, каждая статья упоминается только один раз (независимо от языков опубликования).

2.1. Авторы публикации

Ishino M., Hasegawa N., Nishikino M., Pikuz T., Skobelev I., Faenov A., Inogamov N., Kawachi T., Yamagiwa M.

2.2. Название публикации

Very low electron temperature in warm dense matter formed by focused picosecond soft x-ray laser pulses

2.3. Год публикации

2014

2.4. Ключевые слова

picosecond laser ablation, optical electron emission, x-ray laser

2.5. Вид публикации

статья

2.6. Название издания (для монографий также указываются название издательства, город)

Journal of Applied Physics

русскоязычное издание нет

2.7. Выходные данные публикации (номер, том, выпуск, страницы, реквизиты документа о регистрации исключительных прав)

V. 116, P. 183302, 1-6

2.8. DOI

10.1063/1.4901943

2.9. Принята к публикации (указывается в случае официального принятия к публикации в последующих изданиях, положительного решения о регистрации исключительных прав)**2.10. Издание индексируется базой данных Web of Science**

да

2.11. Импакт-фактор издания (По JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition последнего на момент составления отчета года.)

2.185

2.12. Издание индексируется базой данных Scopus

да

2.13. Издание индексируется базой данных РИНЦ

да

2.14. Публикация аффилирована с организацией – адресатом финансирования, а в качестве источника финансирования исследования указан Российский научный фонд

да

2.15. Файл с текстом публикации (для материалов со статусом «принят к публикации» и для монографий не предоставляется, размер до 3 Мб в формате pdf)

скачать...

2.1. Авторы публикации

Иногамов Н. А., Жаховский В. В., Хохлов В. А.

2.2. Название публикации

Струеобразование при отрыве металлической пленки от подложки в результате воздействия фемтосекундного лазерного импульса

2.3. Год публикации

2014

2.4. Ключевые слова

фемтосекундные лазерные импульсы, поверхностные наноструктуры

2.5. Вид публикации

статья

2.6. Название издания (для монографий также указываются название издательства, город)

Журнал экспериментальной и теоретической физики

русскоязычное издание

2.7. Выходные данные публикации (номер, том, выпуск, страницы, реквизиты документа о регистрации исключительных прав)

147

2.8. DOI

2.9. Принята к публикации (указывается в случае официального принятия к публикации в последующих изданиях, положительного решения о регистрации исключительных прав)

да

2.10. Издание индексируется базой данных Web of Science

да

2.11. Импакт-фактор издания (По JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition последнего на момент составления отчета года.)

.931

2.12. Издание индексируется базой данных Scopus

да

2.13. Издание индексируется базой данных РИНЦ

да

2.14. Публикация аффилирована с организацией – адресатом финансирования, а в качестве источника финансирования исследования указан Российский научный фонд

да

2.15. Файл с текстом публикации (для материалов со статусом «принят к публикации» и для монографий не предоставляется, размер до 3 Мб в формате pdf)

2.1. Авторы публикации

Иногамов Н. А., Жаховский, В. В.

2.2. Название публикации

Формирование наноразмерных струек и капель ультракоротким лазерным импульсом при фокусировке на дифракционном пределе

2.3. Год публикации

2014

2.4. Ключевые слова

фемтосекундные лазерные импульсы, поверхностные наноструктуры

2.5. Вид публикации

статья

2.6. Название издания (для монографий также указывается название издательства, город)

Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики

русскоязычное издание да

2.7. Выходные данные публикации (номер, том, выпуск, страницы, реквизиты документа о регистрации исключительных прав)

Т. 93, В. 1, С. 6-12

2.8. DOI

10.1134/S0021364014130050

2.9. Принята к публикации (указывается в случае официального принятия к публикации в последующих изданиях, положительного решения о регистрации исключительных прав)

2.10. Издание индексируется базой данных Web of Science

да

2.11. Импакт-фактор издания (По JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition последнего на момент составления отчета года.)

1.364

2.12. Издание индексируется базой данных Scopus

да

2.13. Издание индексируется базой данных РИНЦ

да

2.14. Публикация аффилирована с организацией – адресатом финансирования, а в качестве источника финансирования исследования указан Российский научный фонд

да

2.15. Файл с текстом публикации (для материалов со статусом «принят к публикации» и для монографий не предоставляется, размер до 3 Мб в формате pdf)

скачать...

Подпись руководителя проекта _____/С.И. Анисимов/

План работ на 2015 год и ожидаемые результаты по проекту № 14-19-01599

Фемтосекундное лазерное плавление, кавитация и абляция в трехмерной геометрии

3.1. План работы на 2015 год (в том числе указываются запланированные командировки по проекту), до 5 стр.

1). Важной составляющей работы по гранту РНФ являются исследования наноструктурирования поверхности мишеней в результате воздействия ультракороткого лазерного импульса (УКЛИ). Эти работы имеют широкий круг приложений, например, изменение оптических характеристик обработанной поверхности или резкое изменение смачиваемости – после обработки гидрофильная поверхность превращается в гидрофобную. В 2015 г. будет закончен цикл работ по изучению трансформации наноструктур в зависимости от размера пятна фокусировки на поверхности мишени. Морфология структур качественно меняется при уменьшении пятна воздействия, так сказать некоторые формы просто «не помещаются» в малых пятнах. Будет изучено, каким образом параметры мишени, речь идет о пленках, напыленных на подложки, сказываются на характере наноструктур. Поскольку темп остывания определяет темп рекристаллизации структур, а от соотношения между скоростью рекристаллизации и гидродинамическими скоростями зависит морфология, то ясно, что меняя параметры тепловой задачи можно управлять формированием структур. Такой подход потенциально может иметь важные последствия для будущих технологий выращивания наноструктур заданного вида.

2). Будет продолжена деятельность по изучению свойств веществ в состояниях с возбужденной электронной подсистемой. Термализация электронов при сильных возбуждениях (температуры электронной подсистемы единицы эВ) происходит быстро, за несколько фемтосекунд, поэтому можно говорить о горячих электронах и о двухтемпературной системе. Наши предыдущие исследования опирались на решение кинетического уравнения в приближении времени релаксации. Новым при этом было то, что не предполагалась малость электронной температуры по сравнению с энергией Ферми. При этом использовались результаты нашего моделирования с помощью теории функционала плотности (DFT, Density Functional Theory) для определения электронного спектра, вычислялась плотность электронных состояний конкретных металлов. Параметры спектра входили в решение кинетического уравнения. В 2015 г. будут применены новые методики, которые используют технику квантовой молекулярной динамики (QMD, Quantum Molecular Dynamics), обобщенную на двухтемпературный (2Т) случай (2Т-QMD).

Пока работы в этом направлении, которые мы считаем весьма перспективными, можно пересчитать по пальцам. Они ведутся только 1-2-мя коллективами, которые являются крупными специалистами по DFT и QMD. Нам предстоит выяснить влияние ионной упорядоченности (нагрев, плавление) на двухтемпературное уравнение термодинамического состояния. И сверить полученные данные с нашими и другими литературными данными, которые были получены в обычно молчаливо предполагавшемся предположении о независимости электронной и ионной подсистем (1 - электронный спектр реагирует на плотность, но не на упорядоченность, а значит ионную температуру; 2 – межатомное взаимодействие слабо реагирует на электронную температуру).

Другая важнейшая составляющая – это вычисление с помощью QMD и формулы Кубо-Гринвуда проводимости и теплопроводности двухтемпературного вещества в твердом и жидком состояниях. Требуется вычислить проводимость и теплопроводность и сверить полученное с нашими предыдущими вычислениями с помощью кинетической теории и тау-приближения. С одной стороны это проверка наших предыдущих вычислений, с другой это серьезный способ расчета транспортных свойств двухтемпературной конденсированной фазы.

3). Много сил потрачено в отчетном году на молекулярно-динамические расчеты ударных волн (в основном алюминий и никель) двухступенчатой формы (упругий и пластический скачки). С другой стороны, были проведены гидродинамические расчеты по двум моделям пластичности (модель Прадтля-Рейса и дислокационная модель). В 2015 г. эта работа будет продолжена, в результате будут получены эмпирические параметры, входящие в эти модели в условиях, которые характерны для лазерных экспериментов.

4). Будут выполнены гидродинамические и тепловые расчеты с помощью разностных (не МД) многомерных

кодов. Коды были разработаны и приспособлены к условиям лазерного эксперимента в течение предыдущего этапа выполнения гранта РФФИ. Теперь предстоит применить их для практических расчетов. Это позволит нам анализировать существенно неоднородные ситуации на больших временах порядка наносекунд, до которых нелегко «дотянуть» МД моделирование.

Данный подход позволит нам исследовать важные явления инкубации при нескольких последовательных лазерных выстрелах. Кроме того, будет видно, как устроены зона, в которой поглощенный флюенс пересекает порог абляции.

5). Будут выполнены расчеты разогрева, перехода в двухтемпературное состояние, двухтемпературной релаксации электронной и ионной подсистем, вместе с описанием гидродинамического расширения сферической наночастицы после воздействия на неё УКЛИ. Мы изучим как случай расширения в вакуум, так и случай, когда наночастица погружена в окружающую среду. Окружающая среда будет либо жидкой (эмульсия наночастиц), либо твердой (твердый раствор наночастиц). Это важная для практики часть нашей работы в 2015 г. Дело в том, что такие воздействия уже применяются в опытах для изменения распределения наночастиц по размерам или для их разрушения.

6). Будет продолжено решение задачи об абляции твердой мишени в конденсированную (твердую или жидкую) среду. На сегодня с такого рода абляцией связан основной способ производства наночастиц.

7). Будет разработан новый EAM (Embedded Atom Model) потенциал железа. МД расчеты полиморфных превращений в ударных волнах в железе невозможны без потенциала, который корректен в области альфа – эпсилон перехода. EAM потенциал основан на нахождении трех функций. Эти функции в нашем подходе аппроксимируются рациональными функциями. Подгонка коэффициентов трех рациональных функций EAM будет осуществляться с помощью метода подгонки напряжений (stress-matching method) по базе данных напряжений рассчитанных из первых принципов. В базу данных будут вноситься компоненты тензора напряжений, рассчитанных при однородном и трех одноосных сжатиях кристалла в широком диапазоне давлений при абсолютном нуле температуры. Известные давления, при которых происходят фазовые переходы ОЦК решетки железа в ГПУ и ГЦК решетки, также будут использованы в качестве условий подгонки. Кроме того, в базу данных будут входить такие экспериментальные величины как упругие постоянные, энергия связи кристалла, и энергия образования вакансии.

8) В план 2015 г. вносится также новая задача, которая не входила в первоначальную заявку на грант РФФИ. Речь идет о генерации ударной волны лазерным импульсом и явлениях, которые возникают на тыльной стороне пленки. Лазер воздействует на фронтальную сторону пленки. Пленка имеет две границы – фронтальную и тыльную. Тыльная сторона может быть контактом с вакуумом или с конденсированной средой (твердой или жидкой). Воздействие лазера создает ударную волну, которая распространяется от фронтальной стороны к тыльной границе.

Выход ударной волны на тыльную границу изучался ранее в наших работах и работах других авторов. При этом первоначально тыльная граница была гладкой (идеальная плоскость без возмущений). Новая интересная постановка, которая будет исследована в 2015 г., связана с постановкой, в которой на тыльной границе имеются начальные (т.е. до прихода ударной волны) возмущения. Это обобщение классической задачи о гидродинамической неустойчивости Рихтмайера-Мешкова на случай лазерной инициации ударной волны и конденсированных сред. Интерес представляет разрушение возмущенной границы и генерация твердых или жидких наночастиц.

3.2. Ожидаемые в конце 2015 года конкретные научные результаты (форма изложения должна дать возможность провести экспертизу результатов и оценить степень выполнения заявленного в проекте плана работы), до 5 стр.

1). Будут описаны все динамические режимы эволюции пленки на подложке. Изучение этой задачи интересно само по себе и в связи с проблемой формирования наноструктур под действием УКЛИ. Хотя имеется достаточно работ по эволюции пленок (первыми, кстати, были работы нашей группы), но там речь шла о свободных пленках. В них свободными (т.е. границами с вакуумом) были и фронтальная, и тыльная поверхности. При контакте одной из границ с конденсированной средой (пленка на подложке) ситуация меняется качественно. В 2015 г. соответствующие явления будут детально описаны.

Задача об эволюции пленки на подложке решается также в связи с проблемой наноструктурирования пленок. Будут проведены серии расчетов, которые позволят изучить механизмы наноструктурирования и то, каким образом вариация параметров задачи сказывается на конечных структурах.

2). Будут выполнены расчеты уравнения состояния и транспортных коэффициентов веществ в двухтемпературных состояниях. Для этого будут использованы пакеты прикладных программ QMD. Результаты будут сопоставлены с нашими предыдущими результатами, в которых использовались решения кинетического уравнения в тау-приближении в двухтемпературной среде при произвольном отношении электронной температуры и энергии Ферми.

3). Будут детально сопоставлены гидродинамические решения для ударных волн с учетом упругости и пластичности среды и результаты МД моделирования. Это позволит определить совокупность настроечных параметров, используемых в полуфеноменологических моделях пластичности в гидрокодах. Речь идет об анализе генерации реальных ударно-волновых структур под действием лазерного воздействия.

4). Будут выполнены гидродинамические и тепловые расчеты с помощью разностных многомерных (в 2015 г. в двумерной геометрии) кодов. Коды были разработаны и приспособлены к условиям лазерного эксперимента в течение предыдущего этапа выполнения гранта РФФИ. Теперь они будут применены для анализа лазерных опытов.

5). Будут выполнены расчеты облучения наночастиц в виде шариков УКЛИ. Будут рассмотрены случаи (1) наночастицы в вакууме, (2)

наночастицы в твердом растворе и (3) наночастицы в составе эмульсии. Расчеты с помощью гидрокода будут включать полную двухтемпературную модель. Кроме того, будут проведены МД расчеты реакции наночастиц на быстрый нагрев.

6). Будет решена задача об абляции твердой мишени в конденсированную (твердую или жидкую) среду.

7). Будет разработан новый EAM (Embedded Atom Model) потенциал железа. Будут проведены МД расчеты полиморфных превращений в ударных волнах в железе. Результаты будут сопоставлены с данными гидродинамического моделирования таких волн. Конечной целью является анализ уже проведенных в лаборатории М.Б. Аграната экспериментов по лазерной генерации ударных волн в железе.

8) В 2015 г. будет решена задача о выходе лазерной ударной волны на шероховатую тыльную границу. Будет изучено развитие неустойчивости Рихтмайера-Мешкова в конденсированных средах. Будут рассмотрены случаи как средних, так очень сильных ударных волн, за фронтом которых происходит плавление твердой среды. Будет изучено разрушение тыльной границы и формирование облака наночастиц вследствие такого разрушения.

3.3. Файл с дополнительной информацией (при необходимости, с графиками, фотографиями, рисунками и иной информацией о содержании проекта. В формате pdf, до 3 Мб.

Подпись руководителя проекта _____/С.И.Анисимов/

**Запрашиваемое финансирование по проекту
№ 14-19-01599**
**Фемтосекундное лазерное плавление, кавитация и абляция в
трехмерной геометрии
на 2015 год.**

4.1. Планируемые расходы по проекту

№ п.п.	Направления расходования средств гранта	Сумма расходов (тыс.руб.)
	ВСЕГО	1800
1	Вознаграждение исполнителям проекта, в том числе:	1380
	вознаграждение членов научной группы	1380
	вознаграждение членов научной группы – исследователей в возрасте до 39 лет (включительно)	0
	ввознаграждение членов научной группы – молодых исследователей	345
	вознаграждение вспомогательного персонала	0
2	Оплата услуг сторонних организаций	
3	Расходы на приобретение оборудования и иного имущества, необходимых для проведения научного исследования (включая монтаж, пуско-наладку, обучение сотрудников и ремонт)	
4	Расходы на приобретение материалов и комплектующих для проведения научного исследования	
5	Иные расходы для целей выполнения проекта	150
6	Накладные расходы организации	270

4.2. Расшифровка планируемых расходов

№ п.п.	Направления расходования средств гранта	Расшифровка
1	Вознаграждение исполнителям проекта (указывается сумма вознаграждения (включая руководителя, основных исполнителей и иных исполнителей, привлекаемых к выполнению работ по проекту), включая установленные трудовым законодательством Российской Федерации гарантии, отчисления по страховым взносам на обязательное пенсионное страхование, на обязательное медицинское страхование, на обязательное социальное страхование на случай временной нетрудоспособности и в связи с материнством, на обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний)	Сумма вознаграждения исполнителям 1380, в том числе молодым 345
2	Оплата услуг сторонних организаций (приводится перечень планируемых договоров (счетов) со сторонними организациями с указанием предмета и суммы каждого договора)	
3	Расходы на приобретение оборудования и иного имущества, необходимых для проведения научного исследования (включая монтаж, пуско-наладку обучение сотрудников и ремонт) (представляется перечень планируемых к закупке оборудования и иного имущества, необходимых для проведения научного исследования)	
5	Иные расходы для целей выполнения проекта (приводятся иные затраты на цели выполнения проекта, в том числе на командировки, оплату услуг связи, транспортных услуг, расходы не расшифровываются)	Оплата командировок для участия в конференциях и совместной научной работы по теме проекта 150

Подпись руководителя проекта _____/С.И. Анисимов/

Подпись руководителя организации, заверенная печатью

_____/_____/

М.П.

**ОТЧЕТ О ЦЕЛЕВОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ
средств гранта Российского научного фонда
№ 14-19-01599**

**Фемтосекундное лазерное плавление, кавитация и абляция в
трехмерной геометрии
на 2014 год.**

(все суммы приводятся в тыс. рублей, без разделителей, с одним знаком после запятой)

6.1. Объем финансирования, полученный в отчетном периоде от РНФ, всего

1800 тыс. руб.

6.2. Использовано всего средств гранта

1800.0 тыс. руб.

6.3. Неиспользованный остаток

0 тыс. руб.

6.4. Фактические расходы по проекту

№ п.п.	Направления расходования средств гранта	Сумма расходов (тыс.руб.)	
		План	Факт
	ВСЕГО	1800	1800
1	Вознаграждение исполнителям проекта, в том числе:	1510	1510.0
	вознаграждение членов научной группы		1510.0
	вознаграждение членов научной группы – исследователей в возрасте до 39 лет (включительно)		0
	ввознаграждение членов научной группы – молодых исследователей		377.5
	вознаграждение вспомогательного персонала		0
2	Оплата услуг сторонних организаций	0	0
3	Расходы на приобретение оборудования и иного имущества, необходимых для проведения научного исследования (включая монтаж, пуско-наладку, обучение сотрудников и ремонт)	20	38.1
4	Расходы на приобретение материалов и комплектующих для проведения научного исследования	0	
5	Иные расходы для целей выполнения проекта	0	
6	Накладные расходы организации	270	251.9

6.5. Расшифровка расходов

№ п.п.	Направления расходования средств гранта	Расшифровка
2	Оплата услуг сторонних организаций	
	(приводится перечень планируемых договоров (счетов) со сторонними организациями с указанием предмета и суммы каждого договора)	
5	Иные расходы для целей выполнения проекта	
	(приводятся иные затраты на цели выполнения проекта, в том числе на командировки, оплату услуг связи, транспортных услуг, расходы не расшифровываются)	

6.6. Обоснование объема остатка средств (при наличии)

6.7. Информация о вознаграждении за счет гранта членов научной группы за выполнение проекта (заполняется на каждого члена научной группы):

6.7.1. ФИО члена научной группы

Анисимов Сергей Иванович

6.7.2. Возраст на дату представления отчета

79

6.7.3. Должность

г.н.с.

6.7.4. Ученая степень (без степени, кандидат наук, доктор наук)

доктор наук

6.7.5. Являлся на момент подписания соглашения о предоставлении гранта сотрудником организации - адресатом финансирования:

да

6.7.6. Статус

иное

Статус изменялся в данном году: нет

дата изменения статуса

6.7.7. Форма отношений с организацией

трудовой договор

6.7.8. Дата включения в состав научной группы

2014-06-27

6.7.9. Реквизиты документа о включении в состав научной группы

№1252-12 от 27.06.2014

6.7.10. Дата исключения из состава научной группы (при наличии)

6.7.11. Реквизиты документа об исключении из состава научной группы (при наличии)

6.7.12. Сумма вознаграждения с начислениями, тыс. руб. (если изменялся статус - до изменения статуса, в том числе в месяц, когда изменился статус)

173.3

6.7.13. Сумма вознаграждения с начислениями, тыс. руб. после изменения статуса (заполняется в случае изменений статуса)

6.7.1. ФИО члена научной группы

Жаховский Василий Викторович

6.7.2. Возраст на дату представления отчета

51

6.7.3. Должность

с.н.с.

6.7.4. Ученая степень (без степени, кандидат наук, доктор наук)

кандидат наук

6.7.5. Являлся на момент подписания соглашения о предоставлении гранта сотрудником организации - адресатом финансирования:

6.7.6. Статус

иное

Статус изменялся в данном году: нет

дата изменения статуса

6.7.7. Форма отношений с организацией

трудовой договор

6.7.8. Дата включения в состав научной группы

2014-06-27

6.7.9. Реквизиты документа о включении в состав научной группы

№1252-12 от 27.06.2014

6.7.10. Дата исключения из состава научной группы (при наличии)

6.7.11. Реквизиты документа об исключении из состава научной группы (при наличии)

6.7.12. Сумма вознаграждения с начислениями, тыс. руб. (если изменялся статус - до изменения статуса, в том числе в месяц, когда изменился статус)

173.4

6.7.13. Сумма вознаграждения с начислениями, тыс. руб. после изменения статуса (заполняется в случае изменений статуса)

6.7.1. ФИО члена научной группы

Ильницкий Денис Константинович

6.7.2. Возраст на дату представления отчета

34

6.7.3. Должность

инженер-исследователь

6.7.4. Ученая степень (без степени, кандидат наук, доктор наук)

без степени

6.7.5. Являлся на момент подписания соглашения о предоставлении гранта сотрудником организации - адресатом финансирования:

6.7.6. Статус

исследователь в возрасте до 39 лет (включительно)

Статус изменялся в данном году: нет

дата изменения статуса

6.7.7. Форма отношений с организацией

трудовой договор

6.7.8. Дата включения в состав научной группы

2014-06-27

6.7.9. Реквизиты документа о включении в состав научной группы

№1252-12 от 27.06.2014

6.7.10. Дата исключения из состава научной группы (при наличии)

6.7.11. Реквизиты документа об исключении из состава научной группы (при наличии)

6.7.12. Сумма вознаграждения с начислениями, тыс. руб. (если изменялся статус - до изменения статуса, в том числе в месяц, когда изменился статус)

113.4

6.7.13. Сумма вознаграждения с начислениями, тыс. руб. после изменения статуса (заполняется в случае изменений статуса)

6.7.1. ФИО члена научной группы

Иногамов Наиль Алимович

6.7.2. Возраст на дату представления отчета

63

6.7.3. Должность

в.н.с.

6.7.4. Ученая степень (без степени, кандидат наук, доктор наук)

доктор наук

6.7.5. Являлся на момент подписания соглашения о предоставлении гранта сотрудником организации - адресатом финансирования:

да

6.7.6. Статус

иное

Статус изменялся в данном году: нет

дата изменения статуса

6.7.7. Форма отношений с организацией

трудовой договор

6.7.8. Дата включения в состав научной группы

2014-06-27

6.7.9. Реквизиты документа о включении в состав научной группы

№1252-12 от 27.06.2014

6.7.10. Дата исключения из состава научной группы (при наличии)

6.7.11. Реквизиты документа об исключении из состава научной группы (при наличии)

6.7.12. Сумма вознаграждения с начислениями, тыс. руб. (если изменялся статус - до изменения статуса, в том числе в месяц, когда изменился статус)

136

6.7.13. Сумма вознаграждения с начислениями, тыс. руб. после изменения статуса (заполняется в случае изменений статуса)

6.7.1. ФИО члена научной группы

Мигдал Кирилл Петрович

6.7.2. Возраст на дату представления отчета

26

6.7.3. Должность

инженер-исследователь

6.7.4. Ученая степень (без степени, кандидат наук, доктор наук)

без степени

6.7.5. Являлся на момент подписания соглашения о предоставлении гранта сотрудником организации - адресатом финансирования:

6.7.6. Статус

аспирант (интерн, ординатор) очной формы обучения

Статус изменялся в данном году: нет

дата изменения статуса

6.7.7. Форма отношений с организацией

трудовой договор

6.7.8. Дата включения в состав научной группы

2014-06-27

6.7.9. Реквизиты документа о включении в состав научной группы
№1252-12 от 27.06.2014

6.7.10. Дата исключения из состава научной группы (при наличии)

6.7.11. Реквизиты документа об исключении из состава научной группы (при наличии)

6.7.12. Сумма вознаграждения с начислениями, тыс. руб. (если изменялся статус - до изменения статуса, в том числе в месяц, когда изменился статус)

113.4

6.7.13. Сумма вознаграждения с начислениями, тыс. руб. после изменения статуса (заполняется в случае изменений статуса)

6.7.1. ФИО члена научной группы

Паршиков Анатолий Николаевич

6.7.2. Возраст на дату представления отчета

58

6.7.3. Должность

с.н.с.

6.7.4. Ученая степень (без степени, кандидат наук, доктор наук)

кандидат наук

6.7.5. Являлся на момент подписания соглашения о предоставлении гранта сотрудником организации - адресатом финансирования:

6.7.6. Статус

иное

Статус изменялся в данном году: нет

дата изменения статуса

6.7.7. Форма отношений с организацией

трудовой договор

6.7.8. Дата включения в состав научной группы

2014-06-27

6.7.9. Реквизиты документа о включении в состав научной группы

№1252-12 от 27.06.2014

6.7.10. Дата исключения из состава научной группы (при наличии)

6.7.11. Реквизиты документа об исключении из состава научной группы (при наличии)

6.7.12. Сумма вознаграждения с начислениями, тыс. руб. (если изменялся статус - до изменения статуса, в том числе в месяц, когда изменился статус)

86.7

6.7.13. Сумма вознаграждения с начислениями, тыс. руб. после изменения статуса (заполняется в случае изменений статуса)

6.7.1. ФИО члена научной группы

Петров Юрий Васильевич

6.7.2. Возраст на дату представления отчета

65

6.7.3. Должность

с.н.с.

6.7.4. Ученая степень (без степени, кандидат наук, доктор наук)

доктор наук

6.7.5. Являлся на момент подписания соглашения о предоставлении гранта сотрудником организации - адресатом финансирования:

да

6.7.6. Статус

иное

Статус изменялся в данном году: нет

дата изменения статуса

6.7.7. Форма отношений с организацией

трудовой договор

6.7.8. Дата включения в состав научной группы

2014-06-27

6.7.9. Реквизиты документа о включении в состав научной группы

№1252-12 от 27.06.2014

6.7.10. Дата исключения из состава научной группы (при наличии)

6.7.11. Реквизиты документа об исключении из состава научной группы (при наличии)

6.7.12. Сумма вознаграждения с начислениями, тыс. руб. (если изменялся статус - до изменения статуса, в том числе в месяц, когда изменился статус)

136

6.7.13. Сумма вознаграждения с начислениями, тыс. руб. после изменения статуса (заполняется в случае изменений статуса)

6.7.1. ФИО члена научной группы

Пикуз Татьяна Александровна

6.7.2. Возраст на дату представления отчета

58

6.7.3. Должность

6.7.4. Ученая степень (без степени, кандидат наук, доктор наук)

кандидат наук

6.7.5. Являлся на момент подписания соглашения о предоставлении гранта сотрудником организации - адресатом финансирования:

6.7.6. Статус

иное

Статус изменялся в данном году: нет

дата изменения статуса

6.7.7. Форма отношений с организацией

гражданско-правовой договор

6.7.8. Дата включения в состав научной группы

2014-06-27

6.7.9. Реквизиты документа о включении в состав научной группы

№1252-12 от 27.06.2014

6.7.10. Дата исключения из состава научной группы (при наличии)

6.7.11. Реквизиты документа об исключении из состава научной группы (при наличии)

6.7.12. Сумма вознаграждения с начислениями, тыс. руб. (если изменялся статус - до изменения статуса, в том числе в месяц, когда изменился статус)

59.2

6.7.13. Сумма вознаграждения с начислениями, тыс. руб. после изменения статуса (заполняется в случае изменений статуса)

6.7.1. ФИО члена научной группы

Сергеев Олег Вячеславович

6.7.2. Возраст на дату представления отчета

26

6.7.3. Должность

инженер-исследователь

6.7.4. Ученая степень (без степени, кандидат наук, доктор наук)

без степени

6.7.5. Являлся на момент подписания соглашения о предоставлении гранта сотрудником организации - адресатом финансирования:

6.7.6. Статус

аспирант (интерн, ординатор) очной формы обучения

Статус изменялся в данном году: нет

дата изменения статуса

6.7.7. Форма отношений с организацией

трудовой договор

6.7.8. Дата включения в состав научной группы

2014-06-27

6.7.9. Реквизиты документа о включении в состав научной группы

№1252-12 от 27.06.2014

6.7.10. Дата исключения из состава научной группы (при наличии)

6.7.11. Реквизиты документа об исключении из состава научной группы (при наличии)

6.7.12. Сумма вознаграждения с начислениями, тыс. руб. (если изменялся статус - до изменения статуса, в том числе в месяц, когда изменился статус)

150.7

6.7.13. Сумма вознаграждения с начислениями, тыс. руб. после изменения статуса (заполняется в случае изменений статуса)

6.7.1. ФИО члена научной группы

Фаенов Анатолий Яовлевич

6.7.2. Возраст на дату представления отчета

64

6.7.3. Должность

6.7.4. Ученая степень (без степени, кандидат наук, доктор наук)

доктор наук

6.7.5. Являлся на момент подписания соглашения о предоставлении гранта сотрудником организации - адресатом финансирования:

6.7.6. Статус

иное

Статус изменялся в данном году: нет

дата изменения статуса

6.7.7. Форма отношений с организацией

гражданско-правовой договор

6.7.8. Дата включения в состав научной группы

2014-06-27

6.7.9. Реквизиты документа о включении в состав научной группы

№1252-12 от 27.06.2014

6.7.10. Дата исключения из состава научной группы (при наличии)

6.7.11. Реквизиты документа об исключении из состава научной группы (при наличии)

6.7.12. Сумма вознаграждения с начислениями, тыс. руб. (если изменялся статус - до изменения статуса, в том числе в месяц, когда изменился статус)

118.5

6.7.13. Сумма вознаграждения с начислениями, тыс. руб. после изменения статуса (заполняется в случае изменений статуса)

6.7.1. ФИО члена научной группы

Хохлов Виктор Александрович

6.7.2. Возраст на дату представления отчета

62

6.7.3. Должность

н.с.

6.7.4. Ученая степень (без степени, кандидат наук, доктор наук)

кандидат наук

6.7.5. Являлся на момент подписания соглашения о предоставлении гранта сотрудником организации - адресатом финансирования:

да

6.7.6. Статус

иное

Статус изменялся в данном году: нет

дата изменения статуса

6.7.7. Форма отношений с организацией

трудовой договор

6.7.8. Дата включения в состав научной группы

6.7.9. Реквизиты документа о включении в состав научной группы

6.7.10. Дата исключения из состава научной группы (при наличии)

6.7.11. Реквизиты документа об исключении из состава научной группы (при наличии)

6.7.12. Сумма вознаграждения с начислениями, тыс. руб. (если изменялся статус - до изменения статуса, в том числе в месяц, когда изменился статус)

136

6.7.13. Сумма вознаграждения с начислениями, тыс. руб. после изменения статуса (заполняется в случае изменений статуса)

6.7.1. ФИО члена научной группы

Шепелев Вадим Владимирович

6.7.2. Возраст на дату представления отчета

31

6.7.3. Должность

м.н.с.

6.7.4. Ученая степень (без степени, кандидат наук, доктор наук)

кандидат наук

6.7.5. Являлся на момент подписания соглашения о предоставлении гранта сотрудником организации - адресатом финансирования:

6.7.6. Статус

кандидат наук в возрасте до 35 лет (включительно)

Статус изменялся в данном году: нет

дата изменения статуса

6.7.7. Форма отношений с организацией

трудовой договор

6.7.8. Дата включения в состав научной группы

2014-06-27

6.7.9. Реквизиты документа о включении в состав научной группы

№1252-12 от 27.06.2014

6.7.10. Дата исключения из состава научной группы (при наличии)

6.7.11. Реквизиты документа об исключении из состава научной группы (при наличии)

6.7.12. Сумма вознаграждения с начислениями, тыс. руб. (если изменялся статус - до изменения статуса, в том числе в месяц, когда изменился статус)

113.4

6.7.13. Сумма вознаграждения с начислениями, тыс. руб. после изменения статуса (заполняется в случае изменений статуса)

6.8. Изменялся ли состав исполнителей проекта?

Да

В случаях изменения состава исполнителей Проекта, указанных в заявке, поданной на конкурс, в составе отчета представляются сведения об исключении членов научной группы из состава исполнителей и о новых исполнителях проекта в соответствии с формой 2 приложения № 1 к конкурсной документации о проведении конкурса.

6.9. Файл с заверенными копиями приказов о составе (изменении состава) научной группы (размером до 3 Мб в формате pdf).

скачать...

Настоящим подтверждаем, что:

- организация состоит на время реализации проекта с руководителем научной группы в трудовых отношениях;
- организация заключила с членами научной группы гражданско-правовые или трудовые (срочные трудовые) договоры;
- по поручению руководителя проекта всем членам научной группы выплачивалось вознаграждение за выполнение работ по проекту;
- научной группе предоставлено помещение и доступ к необходимой экспериментальной базе для осуществления научного исследования.

Подпись руководителя проекта _____/С.И. Анисимов/

Подпись руководителя организации, заверенная печатью

_____/_____/
М.П.

Подпись главного бухгалтера организации

_____/_____/

Изменения в составе участников

Фаенов А.Я.

Мигдал К.П.

Петров Ю.В.

Хохлов В.А.

Ильницкий Д.К.

Жаховский В.В.

Щепелев В.В.

Сергеев О.В.

Дьячков С.А.

Паршиков А.Н.

Иногамов Н.А.

Пикуз Т.А.