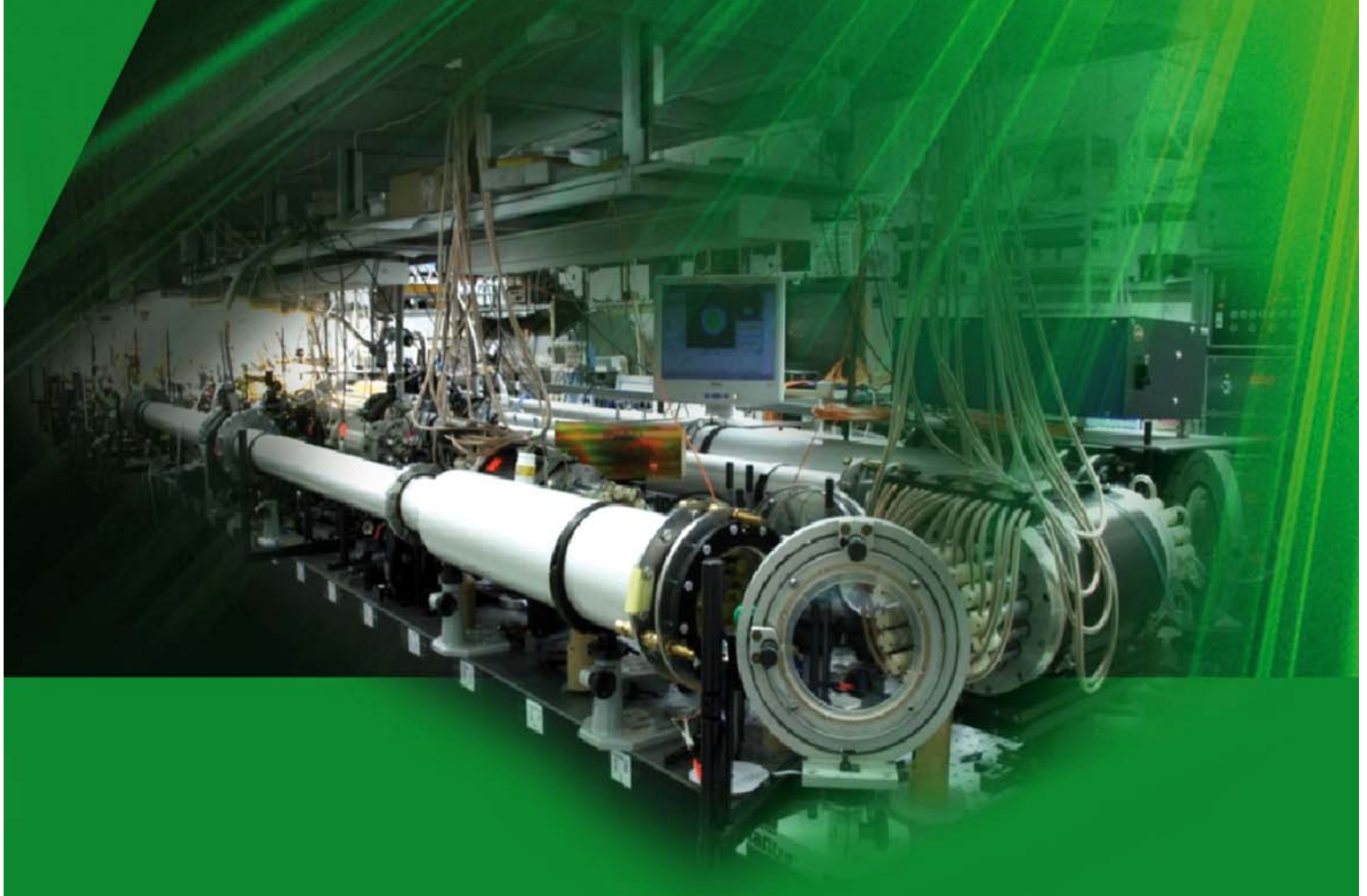
Международный центр исследований экстремальных световых полей (ЦИЭС)

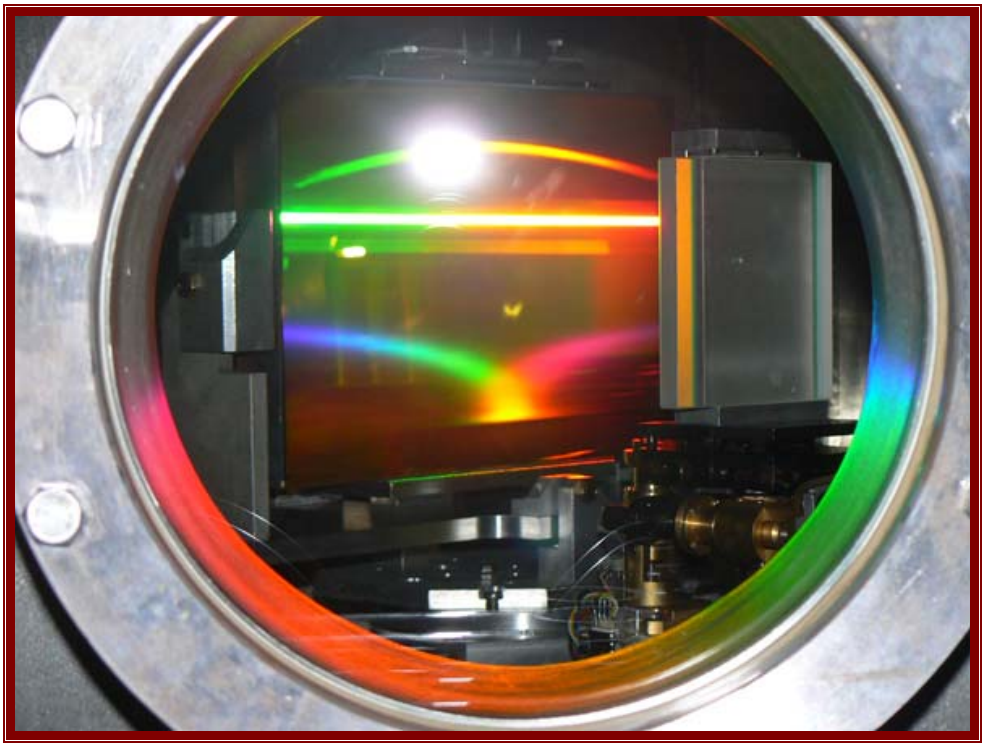
ОБОСНОВАНИЕ МЕГАПРОЕКТА



«Международный центр исследований экстремальных световых полей»

(ЦИЭС)

ОБОСНОВАНИЕ МЕГАПРОЕКТА



СОДЕРЖАНИЕ

ОБОСНОВАНИЯ МЕГАПРОЕКТА

1. Краткое описание проекта 3

2. Создаваемая экспериментальная база и ожидаемые результаты. Научная значимость проекта 4

2.1. приоритетность научных направлений, исследования, в рамках которых будет обеспечивать создаваемая установка 4

2.2. многофункциональность и междисциплинарность создаваемой установки 5

2.3. важность ожидаемых основных научных результатов, которые могут быть получены с использованием создаваемой установки 5

2.4. заинтересованность в проекте других стран 6

2.5. значимость результатов для научно-технического развития 8

3. Технико-экономическая оценка проекта 9

3.1. основные параметры установки и период сохранения уникальности (превосходства) 9

3.2. оценка реализуемости проекта с точки зрения технологической составляющей 15

3.3. общий бюджет проекта и сроки его реализации 19

3.4. ожидаемый состав стран-участниц проекта и структура финансирования 20

4. Структура мегапроекта – цели, задачи, мероприятия 20

4.1. Цель 1 и задачи по ее достижению 21

4.2. Цель 2 и задачи по ее достижению 27

4.3. Цель 3 и задачи по ее достижению 31

5. Соответствие проекта ЦИЭС критериям отнесения исследовательских установок к международным научным мегапроектам 32

1. Краткое описание проекта

Целью проекта является создание крупной научной инфраструктуры – Международного центра исследований экстремальных световых полей (ЦИЭС) на базе использования источников лазерного излучения с гигантской (экзаваттного уровня) пиковой мощностью. Проект базируется на значительных успехах, достигнутых в России и мире в последнее десятилетие по созданию петаваттных лазеров (1 Петаватт = 10^{15} Ватт) с интенсивностью до 10^{22} Вт/см^2, излучение которых сконцентрировано в импульсах сверхкороткой длительности (< 100 фемтосекунд = 10^{-13} с). В основе планируемой инфраструктуры будет находиться новый уникальный источник света с мощностью 0.1-0.2 Экзаватта ($1\text{-}2\cdot10^{17}$ Вт), в сотни раз превосходящей имеющиеся сейчас лазеры (для сравнения, подобная мощность приблизительно в 10000 раз больше мощности всех источников энергии, работающих на планете). Фундаментальные процессы взаимодействия такого излучения с веществом представляют совершенно новую область знания и будут основной исследовательской задачей инфраструктуры. Наряду с этим, впервые откроются возможности изучения пространственно-временной структуры вакуума и неизвестных явлений на стыке физики высоких энергий и физики сверхсильных полей. Планируемые приложения результатов исследований будут включать, в том числе, разработку компактных ускорителей заряженных частиц с размерами в сотни раз меньшими имеющихся ускорителей, создание источников сверхкоротких импульсов когерентного и некогерентного излучения в жестком рентгеновском и гамма-диапазонах для диагностики материалов с пикометровым (10^{-12} м) пространственным и аттосекундным (10^{-18} с) временным разрешением, разработку новых источников излучений и частиц для диагностики и терапии онкологических заболеваний и др.

ЦИЭС существенно превзойдет по характеристикам источника излучения уровень, заложенный в настоящее время в самые мощные из строящихся либо проектируемых лазерных комплексов в мире, включая наиболее передовые из них в рамках европейского инфраструктурного мегапроекта ELI (Extreme Light Infrastructure).

2. Создаваемая экспериментальная база и ожидаемые результаты. Научная значимость проекта

2.1. Приоритетность научных направлений, исследования, в рамках которых будет обеспечивать создаваемая установка

Программа исследований, обеспечивающая приоритетность работы ЦИЭС, будет включать следующие основные направления:

1. Создание источников сверхкороткого когерентного и некогерентного излучения с рекордно высокой яркостью в жестком рентгеновском и гамма-диапазонах на основе синхротронного излучения ультрарелятивистских заряженных частиц в сверхсильных лазерных полях; использование этих источников для диагностики процессов и структур с пикометровым пространственным и субфемтосекундным временным разрешением.

2. Разработка многокаскадных компактных лазерных ускорителей электронов с энергиями более 100 ГэВ, использование лазерно-плазменных ускорителей для разработки перспективных ускорительных комплексов с энергиями частиц на уровне 1-10 ТэВ, в том числе в рамках создания и развития будущего Международного линейного коллайдера ILC.

3. Создание компактных лазерных ускорителей ионов с энергией 0.1-10 ГэВ и разработка их клинических приложений для лучевой диагностики и терапии.

4. Получение и исследование экстремальных состояний вещества, возникающих под действием лазерных полей ультрарелятивистской интенсивности; моделирование астрофизических и ранних космологических явлений в лабораторных условиях.

5. Создание источников электромагнитных волн аттосекундной (10^{-18} с) и субаттосекундной длительности на основе генерации высоких гармоник лазерного излучения и суперконтинуума в сверхширокой спектральной области от инфракрасного до рентгеновского диапазона в процессе нелинейного взаимодействия мощных фемтосекундных лазерных импульсов с веществом; разработка методов применений таких источников для фундаментальной метрологии и диагностики быстропротекающих процессов веществе.

6. Создание источника электромагнитного излучения с пиковой мощностью более 1 Экзаватта (10^{18} Вт) на основе взаимодействия мультипетаваттных лазерных импульсов с плазмой в ультрарелятивистском режиме.

7. Исследование пространственно-временной структуры вакуума при его зондировании излучением с интенсивностью более 10^{25} Вт/см^2; изучение явлений квантовой электродинамики в присутствии экстремально сильных лазерных полей, в том числе создание вещества и антивещества с помощью излучения.

8. Создание нового научного направления – ядерной оптики – на основе использования вторичных сверхъярких источников гамма-излучения для возбуждения и диагностики внутриядерных процессов

2.2. Многофункциональность и междисциплинарность создаваемой установки

Представленная выше программа приоритетных исследований определяет многофункциональность ЦИЭС. Значительный объем исследований будет выполняться на стыке с другими областями знаний – физики высоких энергий, ядерной физики, астрофизики, биомедицины.

2.3. Важность ожидаемых результатов с использованием создаваемой установки

Результаты, ожидаемые по всем разделам программы, будут иметь прорывной характер, обеспечивая получение совершенно новых знаний и развитие новых технологий. Будет создана уникальная научная инфраструктура мирового уровня, которая позволит проводить экспериментальные исследования свойств материи и вакуума в недостижимых прежде условиях. Они будут определяться гигантской пиковой мощностью оптического излучения, на 2-3 порядка превышающей достигнутый к настоящему времени уровень, ультрарелятивистской интенсивностью излучения, на 5-6 порядков превышающей рекордные на сегодняшний день значения, и сверхкороткой длительностью излучения, позволяющей разрешать внутриатомные и внутриядерные процессы. Будут разработаны вторичные источники излучения и быстрых частиц, которые могут революционизировать ускорительные технологии и сделать исследования по физике высоких энергий доступными для широкого класса лабораторий, в том числе академических и университетских. Будут созданы новейшие методы диагностики вещества с пикометровым (10^{-12} м) пространственным и аттосекундным (10^{-18} с) временным

разрешением и тем самым существенно расширены горизонты фундаментальной метрологии. Впервые будет исследована пространственно-временная структура вакуума и разработаны методы создания вещества и антивещества в вакууме в присутствии полей сверхвысокой интенсивности.

2.4. Заинтересованность в проекте других стран

Заинтересованность предполагаемых стран-участников проекта обусловлена их участием в национальных и международных программах по исследованию и использованию экстремальных световых полей и перспективой создания в рамках ЦИЭС источника излучения следующего поколения с уникальными характеристиками, не доступными для исследовательских центров стран-участников.

К настоящему времени интерес к участию в создании и эксплуатации ЦИЭС высказали Министерство образования и науки Франции, Комиссариат атомной энергетики Франции, Агентство по атомной энергии Японии, Европейский центр ядерных исследований ЦЕРН, Лос-Аламосская национальная лаборатория (США), Национальная лаборатория ускорителей им. Ферми (США), Институт исследования ускорителей больших энергий КЕК (Япония), Резерфордовская лаборатория (Великобритания), Институт ускорителей им. Дж.Адамса (Великобритания), Центр исследований антипротонов и ионов FAIR (Германия), Национальный институт научных исследований Канады. В приложении 2 содержится список зарубежных организаций и ответственных лиц, с которыми ведутся переговоры о поддержке ЦИЭС. Предполагается, что основной вклад зарубежных партнеров будет состоять в поставках высокотехнологичного научного оборудования для оснащения лазерного комплекса и исследовательских лабораторий на общую сумму около 150 млн. Евро.

В настоящее время наиболее важный зарубежный вклад в развитие проекта ЦИЭС вносит Франция. В 2009 г. между Россией и Францией было подписано международное соглашение о развитии исследований в области экстремальных световых полей ELISA (Приложение 5), которое стимулировало разработку проекта ЦИЭС. В сентябре 2011 г. Министерство образования и науки Франции организовало новый международный институт IZEST (International Institute for Zettawatt-Exawatt Science and Technology) с целью обеспечения научной и научно-организационной поддержки проектам по созданию лазеров экзаваттной мощности и их применениям. ЦИЭС рассматривается этим институтом в качестве основного научного проекта в мире, который определит на ближайшее десятилетие развитие соответствующей области знаний. Имеются письма поддержки данной инициативы (см. Приложение 3)

со стороны крупнейших исследовательских лабораторий, желающих принять участие в сотрудничестве с IZEST и ЦИЭС (используемое международное название ЦИЭС - XCELS (Exawatt Center for Extreme Light Studies)).

Переговоры о сотрудничестве по проекту ЦИЭС ведутся с руководителями европейского инфраструктурного проекта ELI и представителями Европейской комиссии. Проект ELI, имеющий целью создание и использование источников экстремальных световых полей, успешно прошел подготовительный этап, в котором приняли участие 13 европейских государств. По результатам этапа в 2010 г. Европейская Комиссия приняла решение о строительстве в 2011-2016 г.г. трех новых лазерных центров с источниками с мощностью около 10 ПВт в Венгрии, Чехии и Румынии со стоимостью строительства каждого около 280 млн. евро. На установке, которая будет построена в Венгрии, планируется проводить исследования по генерации и использованию аттосекундных импульсов. На установке, конструируемой в Чехии, будут разрабатываться лазерно-плазменные ускорители и новые источники рентгеновского и гамма-излучения. В Румынии будет развернута установка для проведения исследований в области фотоядерной физики. ЦИЭС естественным образом будет представлять интерес для международного сотрудничества с консорциумом ELI в области экстремальных световых полей, имея в своем составе лазерный источник следующего поколения и программу исследований с использованием полей, не доступных в других исследовательских центрах. При этом реализация проекта ЦИЭС обеспечит сохранение и развитие конкурентных преимуществ российской науки в областях создания сверхмощных лазеров и применения экстремальных световых полей.

Важную роль играет поддержка проекта ЦИЭС со стороны инициатора и руководителя подготовительной стадии европейского проекта ELI, директора IZEST проф. Жерара Муру (Франция). В 2009 г. по предложению Ж. Муру Президент РАН Ю.С. Осипов обратился к Президенту РФ Д.А. Медведеву с просьбой рассмотреть предложение о полномасштабном участии России в международной программе по изучению экстремальных световых полей. Предложение было рассмотрено и направлено Администрацией Президента на согласование в ряд министерств, в том числе в Минобрнауки РФ, которое, в целом, поддержав предложение, выразило мнение о том, что такое участие предпостительно при строительстве на территории страны международного центра как субъекта международной кооперации в области экстремальных световых полей при решении ряда вопросов юридического международного права. В настоящее время готовится визит представителя

Европейской Комиссии, куратора проекта ELI г-жи Марии Доука в Россию для обсуждения плана полномасштабного участия Российской Федерации в международной программе по изучению экстремальных световых полей.

Проект ЦИЭС имеет поддержку ведущей международной организации по созданию и использованию сверхмощных лазеров ICUIL (International Committee on Ultra Intense Lasers), которая координирует деятельность крупнейших лазерных лабораторий во всем мире. Письмо поддержки ЦИЭС со стороны председателя ICUIL проф. Т. Таджимы и его интервью представлены в Приложениях 3 и 6.

2.5. Значимость результатов для научно-технического развития

Наряду с решением уникальных задач фундаментальной науки, значимость результатов создания ЦИЭС будет определяться многочисленными приложениями, которые планируется разработать в процессе эксплуатации комплекса. Они, в том числе, включают разработку новых источников излучений и частиц для диагностики и терапии онкологических заболеваний, новых диагностических и метрологических комплексов для диагностики материалов с пикометровым (10^{-12} м) пространственным и аттосекундным (10^{-18} с) временным разрешением. Важный экономический эффект может дать существенное удешевление ускорительной техники, работающей на новых принципах, для создания новых исследовательских центров физики высоких энергий.

3. Технико-экономическая оценка проекта

3.1. Основные параметры установки и период сохранения уникальности (превосходства)

Субэкзаваттный лазер, существенно (более чем на порядок) превосходящий по мощности излучения уровень, заложенный в настоящее время в самые мощные из строящихся либо проектируемых лазерных комплексов в мире, будет создан на основе уникальной техники параметрического усиления частотно модулированных лазерных импульсов (OPCPA) до уровня петаваттной мощности, разработанной в Институте прикладной физики РАН. Комплекс будет включать 12 одинаковых каналов, в каждом из которых будет генерироваться импульс с энергией 300-400 Дж, длительностью 20-30 фс, максимальной интенсивностью при фокусировке более 10^{23} Вт/см^2 и частотой повторения 1 выстрел/мин (Рис. 1). Каналы работают по схеме параметрического усиления в кристаллах KD*P с апертурой оконечных каскадов 20×20 см^2.

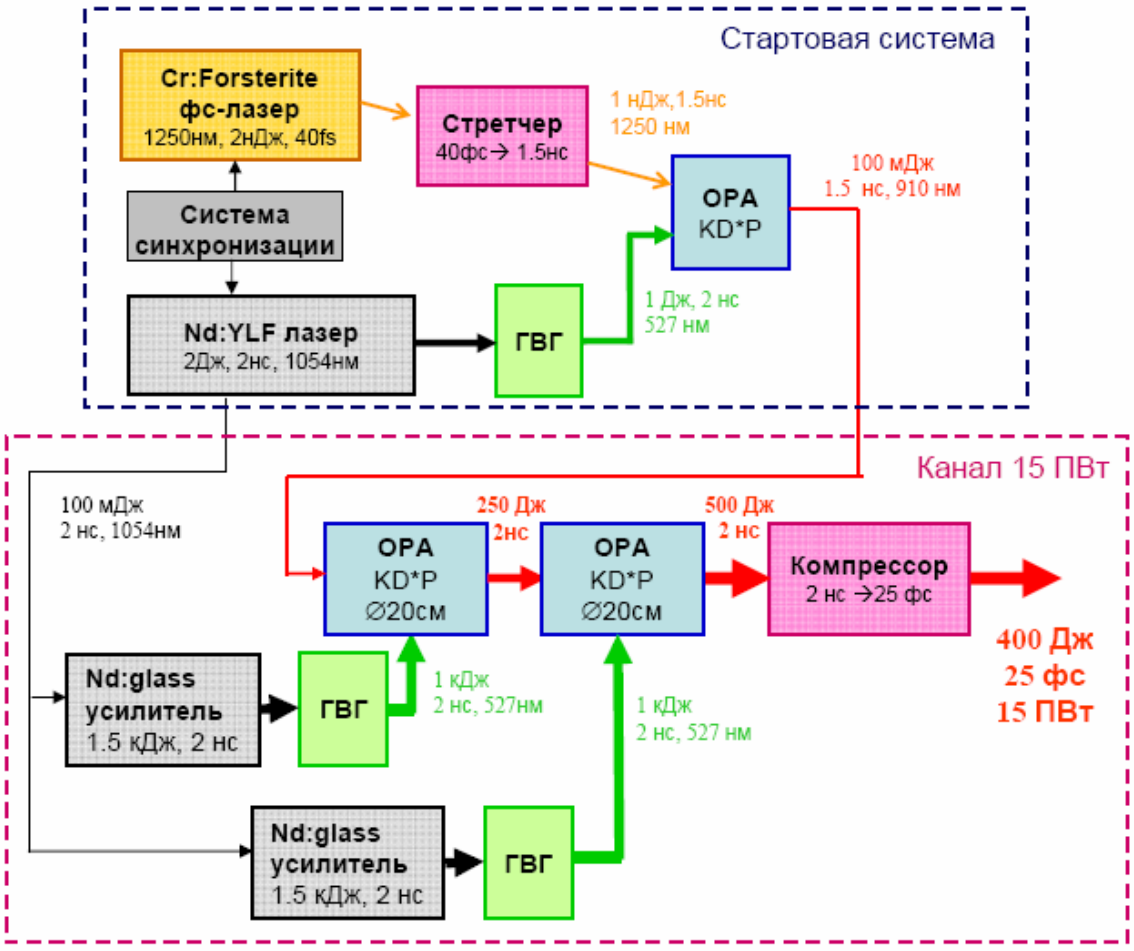


Рис. 1. Принципиальная схема одного из 12 каналов субэкзаваттного лазера

В настоящее время OPCPA является единственной существующей техникой усиления с обеспеченной компонентной базой, позволяющей проектировать и строить лазерные комплексы с мощностью 10 ПВт и выше. Лидирующее положение в мире в освоении и развитии OPCPA занимает ИПФ РАН. В 2007 г. в этом институте в результате выполнения совместного проекта с РФЯЦ-ВНИИЭФ был запущен лазер "PEARL" с импульсной мощностью 0.56 ПВт, длительностью импульсов около 45 фс и энергией 25 Дж, который входит сейчас в пятерку наиболее мощных лазеров в мире. В этом лазере использовано параметрическое усиление в кристалле KD*P с апертурой 10×10 см^2, который выращен в ИПФ РАН по оригинальной технологии быстрого направленного роста кристаллов. В институте имеется технология производства кристаллов с существенно большей апертурой, что открывает уникальные возможности по продвижению техники OPCPA в мультипетаваттный диапазон лазерной мощности.

Предполагается, что оптические импульсы в лазерных модулях субэкзаваттного комплекса будут сфазированы с точностью до сотых долей периода световой волны (10^{-16} с). Первой фазой реализации проекта будет создание в ИПФ РАН двух таких модулей с мощностью 15 ПВт каждый на основе параметрического усиления в кристаллах KD*P (Рис. 2). Это позволит не только создать надежный прототип модуля ЦИЭС, но и решить принципиальные вопросы, связанные с фазировкой каналов, а также с отработкой диагностического оборудования для приложений. При этом будут внесены окончательные коррективы в архитектуру и компонентную базу установки ЦИЭС. В дальнейшем по отработанной технологии будут собраны 12 каналов основного лазерного комплекса ЦИЭС во вновь построенном здании международного центра.

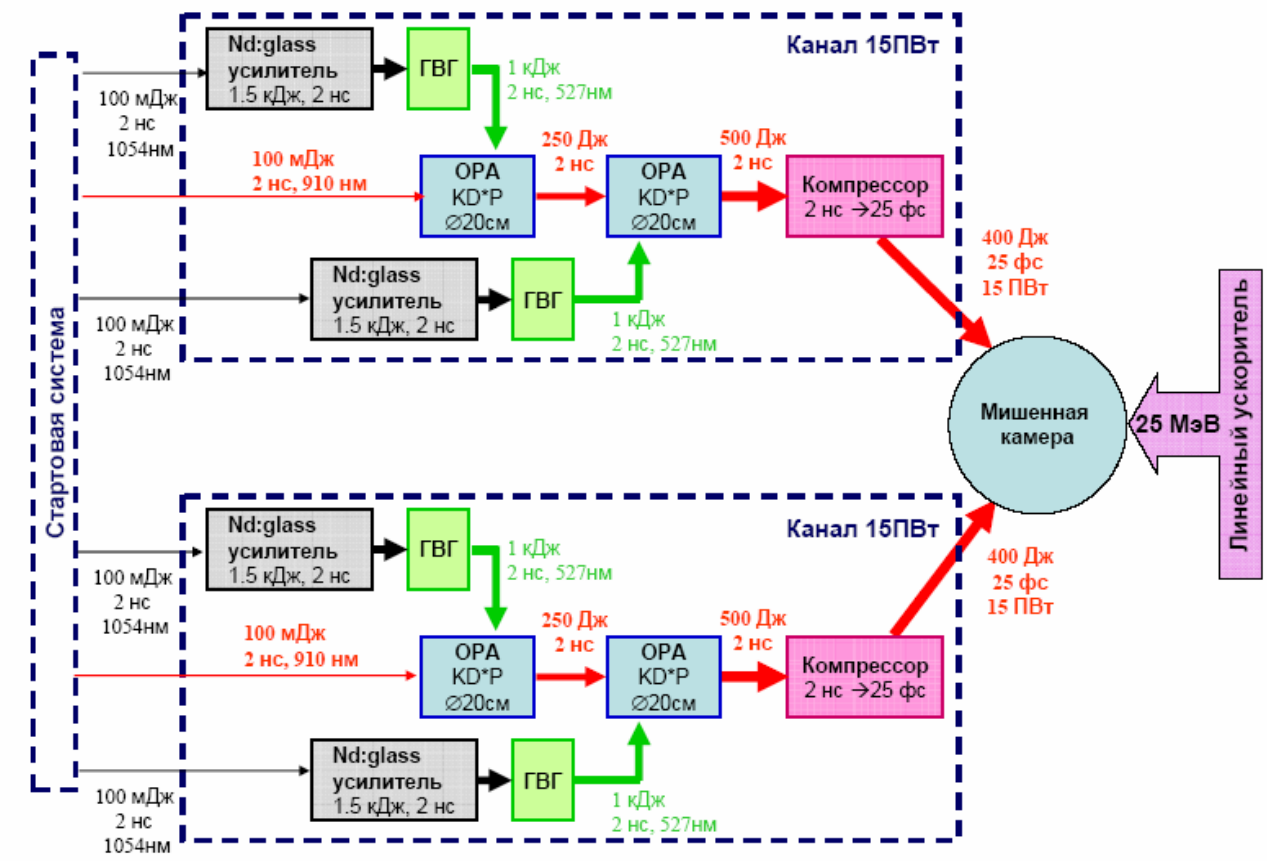


Рис. 2. Принципиальная схема 2-х канального прототипа субэкзаваттного лазера

В результате излучение на выходе лазерного комплекса будет иметь следующие параметры: мощность 200 ПВт, длительность импульса 25 фс, длина волны 910 нм, расходимость не более 3 дифракционных пределов.

В ЦИЭС вместе с залом для размещения субэкзаваттного лазера будут располагаться уникальные лаборатории для проведения экспериментов по физике сильных полей, физике высоких энергий, лабораторной астрофизике и космологии, ядерной оптике, нейтронной физике, по изучению свойств вакуума, аттосекундной и зептосекундной физике, фундаментальной метрологии (Рис. 3). В составе ЦИЭС будет находиться мощный центр обработки данных и компьютерного моделирования взаимодействий экстремальных световых полей.

ЦИЭС будет уникальным исследовательским центром международного уровня как по параметрам источника излучения, так и по программе планируемых исследований (Рис. 4). Период превосходства над имеющимися и строящимися зарубежными установками по исследованию экстремальных световых полей начнется с момента запуска первого лазера прототипа на уровень мощности 10 ПВт (2014 г.) и будет продолжаться по мере нарастания мощности лазерного комплекса (2018 г.). В дальнейшем превосходство будет обеспечено созданием источника

электромагнитного излучения с пиковой мощностью более 1 Экзаватта на основе взаимодействия мультипетаваттных лазерных импульсов с плазмой в ультрарелятивистском режиме (2020 г.). Превосходство по совокупной программе экспериментальных работ будет сохраняться с момента начала первых экспериментов на двухканальном прототипе (2015 г.) на далекую перспективу.

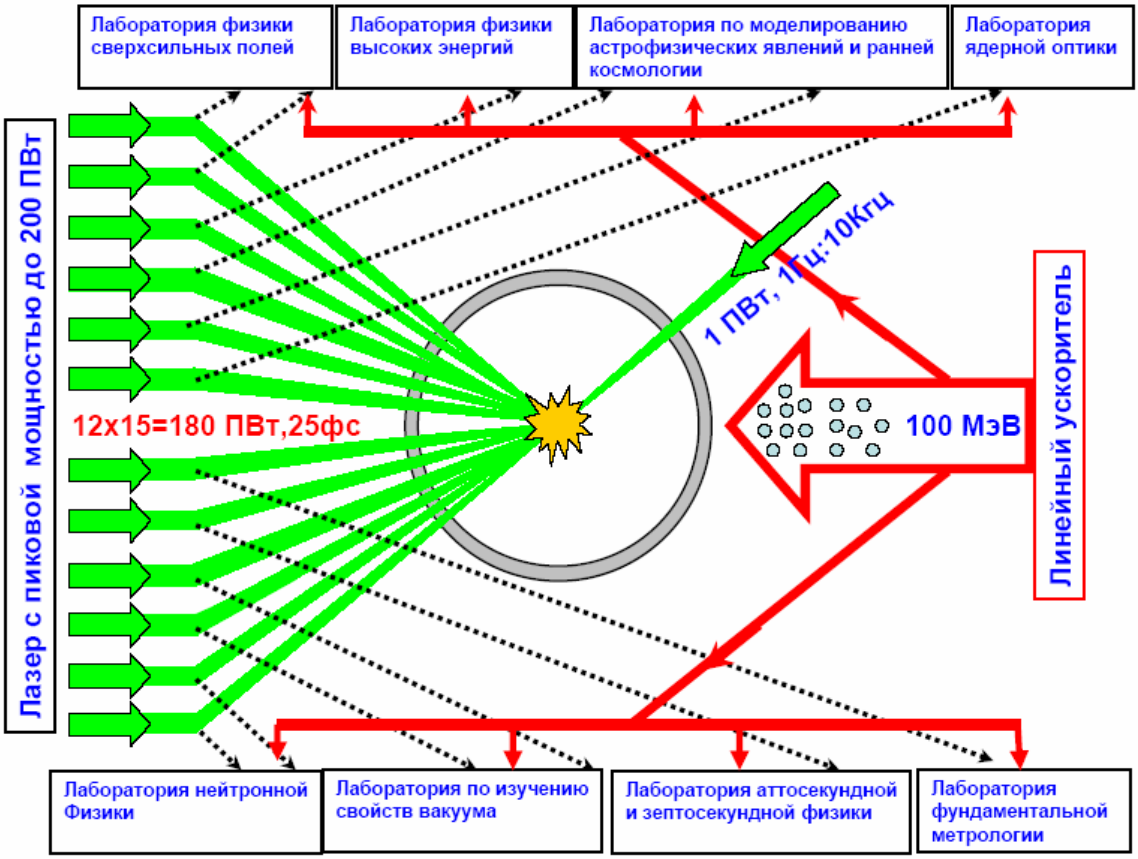


Рис. 3. Схема расположения каналов субэкзаваттного лазера, главной мишенной камеры, линейного ускорителя и научных лабораторий

Рис. 4. Предполагаемый вид Международного центра экстремальных световых полей

Исходя из планируемой программы научных исследований, уровня технологических требований к уникальному лазерному комплексу и необходимой квалификации научного и инженерно-технического персонала, наиболее подходящей базой для строительства ЦИЭС представляется Институт прикладной физики РАН в Нижнем Новгороде. При этом в процессе создания и эксплуатации ЦИЭС будет работать большая коллаборация российских исследовательских и образовательных центров, включая ИПФ РАН, ИПЛИТ РАН, РНЦ «Курчатовский институт», ОИЯИ, ФИАН, ИОФ РАН, ИЯФ СО РАН, ОИВТ РАН, ИЛФ СО РАН, РФЯЦ-ВНИИЭФ, МГУ, МИФИ, ННГУ, НГУ и др.

Наряду с основной базой для строительства в структуре ЦИЭС предусматриваются сателлитные лаборатории, занимающиеся отработкой различных критических технологий субэкзаваттного лазера и развитием некоторых приложений результатов фундаментальных исследований, полученных в ЦИЭС. Такие лаборатории могут быть прежде всего организованы в ИПЛИТ РАН, РНЦ «Курчатовский институт» и в Национальном исследовательском ядерном университете (МИФИ).

Для размещения ЦИЭС необходим земельный участок площадью около 5 Га, удаленный на значительное расстояние от автомобильных магистралей и промышленных предприятий. Общая площадь лабораторных, административно-хозяйственных и вспомогательных помещений составит около 25 000 м^2, из них около 15 000 м^2 – с различной степенью радиационной защиты.

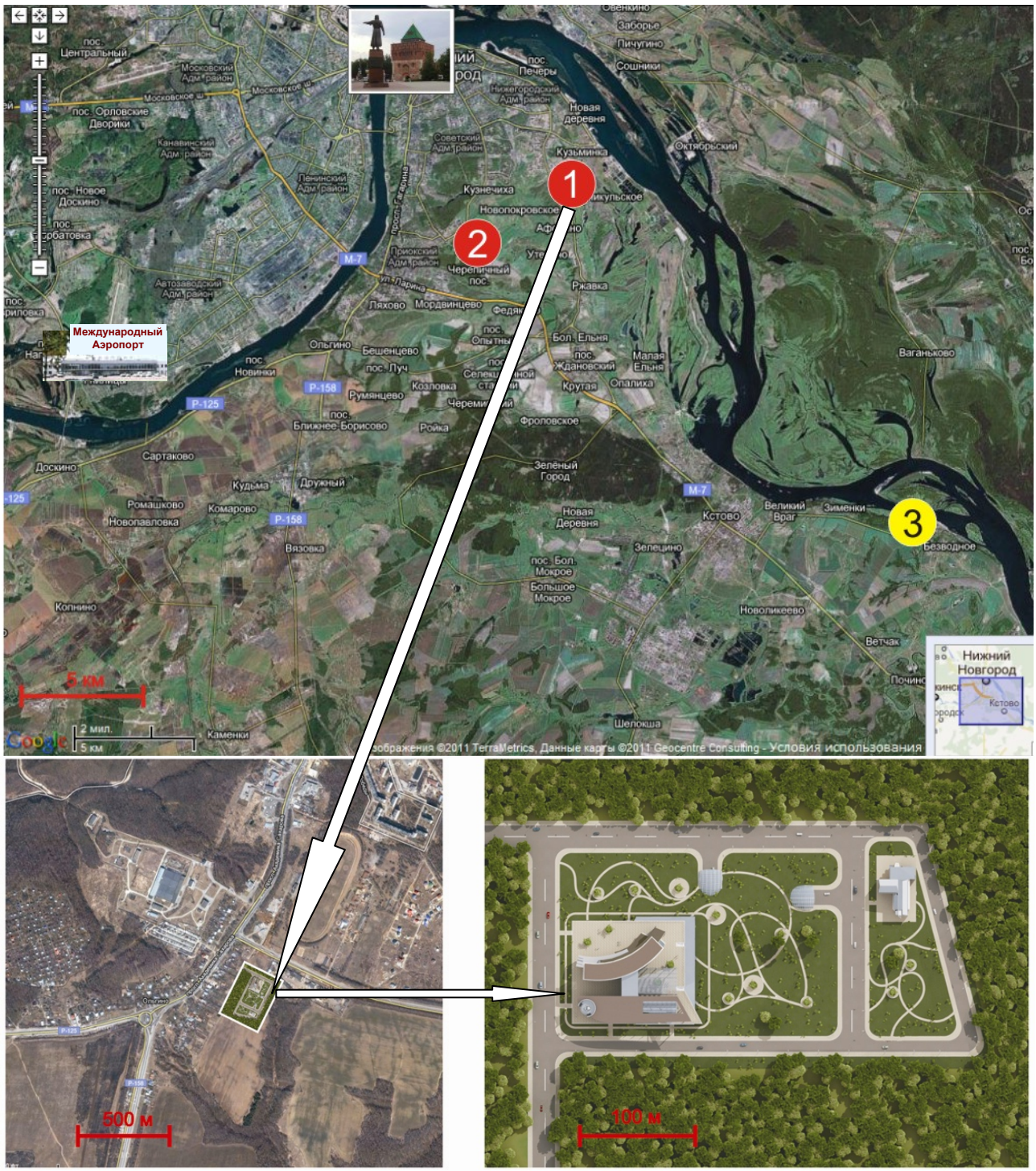
Предложения о предоставлении земельных участков поступили от Администрации Нижегородской области, Нижегородского научного центра РАН и Нижегородского госуниверситета. На рис. 5 показаны два возможных местоположения ЦИЭС (участки 1, 2) и участок 3, принадлежащий ИПФ РАН, для размещения строительства прототипа 200 ПВт лазера. Конкретный участок для размещения ЦИЭС будет выбран на основании международной экспертизы проекта.

Средняя численность сотрудников ЦИЭС составит около 300 чел., из них 100 чел. – постоянный инженерно-технический и административный состав; 100 чел. – постоянный состав российских ученых, 100 чел. – приезжающие зарубежные и российские специалисты.

Реализация проекта ЦИЭС одобрена 5.07.2011 Правительственной комиссией по высоким технологиям и инновациям под председательством В.В. Путина.

http://www.xcels.iapras.ru/

Предполагаемые земельные участки для строительства объектов ЦИЭС



1. Участок земли, предлагаемый ННЦ РАН, закрепленный в настоящее время в бессрочное пользование Института физики микроструктур РАН (федеральная собственность)
2. Участок земли, предлагаемый Нижегородским государственным университетом (федеральная собственность) – полностью отсутствует инфраструктурное обеспечение
3. Участок земли, предлагаемый ИПФ РАН для размещения прототипа (федеральная собственность)

Рис. 5.

3.2. Оценка реализуемости проекта с точки зрения технологической составляющей

Уверенность в реализуемости проекта создания субэкзаваттного лазера основывается на высоком технологическом уровне участников. Она подтверждается результатами, достигнутыми при создании петаваттного лазера "PEARL" в ИПФ РАН в 2007 г., и успешным развитием работ по строительству, начиная с 2009 г., лазерного комплекса "PEARL-10" с импульсной мощностью более 5 ПВт (Рис. 6).

Оборудовано чистое помещение с развязанным заглубленным фундаментом площадью около 200 м^2 и специальными средствами радиационной защиты от повреждающих факторов, сопровождающих взаимодействие сверхмощного излучения с веществом. Ведется монтаж оптического оборудования. Реализация первой фазы проекта ЦИЭС, – создание двух модулей с мощностью15 ПВт, будет естественным продолжением этих работ и может быть завершена в 2016 году. Дальнейшие работы по созданию субэкзаваттного лазера будут связаны с тиражированием лазерных каналов (12 каналов) и сборкой единого комплекса в здании ЦИЭС.

Рис. 6. Строящийся в ИПФ РАН лазерный комплекс "PEARL-10":
лазер накачки для параметрического усилителя (слева),
стартовая часть и оптический компрессор диаметром 110см и длиной 500см (справа)

Другим важным фактором для успешной реализации проекта является наличие в ИПФ РАН уникальной технологии выращивания широкоапертурных нелинейно-оптических кристаллов KDP и KD*P, являющихся ключевыми элементами сверхмощных параметрических усилителей света. Эта технология основана на методе скоростного роста профилированных моносекториальных кристаллов. Она явилась результатом научных исследований, ведущихся в течение нескольких десятилетий в ИПФ РАН. Данный метод позволяет получать оптические элементы с апертурой до 40×40 см^2 и, что немаловажно для уникальной установки, содержащей

десятки нелинейно-оптических кристаллов, почти на порядок уменьшить время роста по сравнению с классическим методом и минимизировать отходы кристалла при его обработке.

Исполнитель обладает производственными мощностями, необходимыми для производства нелинейно-оптических компонентов лазерных систем для обеспечения проекта ЦИЭС (Рис. 7). Имеется линия механической обработки кристаллических заготовок, включая уникальные станки алмазного точения, установки для контроля монокристаллических заготовок и параметров шероховатости обработанной поверхности нанометровой точности.

Рис. 7. Установки для роста широкоапертурных нелинейно-оптических кристаллов в ИПФ РАН (слева) и элемент для преобразования частоты сверхмощного оптического излучения

Для создания каналов с пиковой мощностью 15 ПВт в составе комплекса ЦИЭС должны быть использованы лазерные системы накачки на неодимовом стекле с импульсной энергией более 1 КДж и длительностью импульсов около 2 нс. Большой опыт в создании и эксплуатации таких систем имеет РФЯЦ-ВНИИЭФ. В этом институте имеется лазерная установка «Луч» с 4 каналами с энергий импульса в каждом канале более 3 КДж и длительностью около 3 нс. В рамках совместного проекта РФЯЦ-ВНИИЭФ и ИПФ РАН установка «Луч» была использована для получения импульсов с энергией около 100 Дж в параметрическом усилителе «Фемта». Данный результат является мировым рекордом по энергии параметрического усиления фемтосекундных импульсов и демонстрацией владения одной из критических технологий для реализации проекта ЦИЭС (Рис. 8).

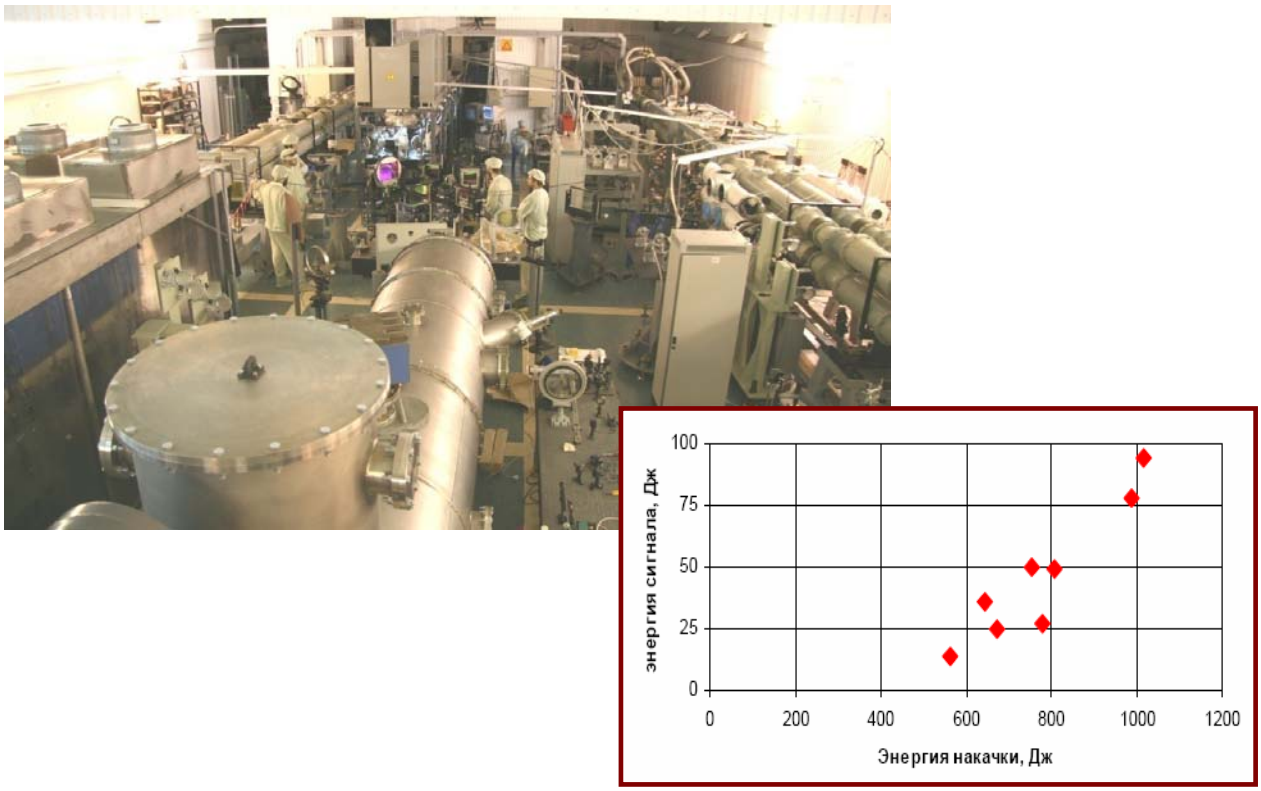


Рис. 8. Установка «Луч» с параметрическим усилителем «Фемта» в РФЯЦ-ВНИИЭФ (Саров) и рекордные характеристики параметрического усиления фемтосекундных импульсов

Для большинства фундаментальных исследований на создаваемом комплексе ЦИЭС ключевым требованием является максимальная интенсивность излучения, для достижения которой необходима фокусировка мощных импульсов в минимальное по размеру световое пятно. Это осуществляется посредством применения систем управления волновым фронтом излучения и фазирования световых пучков и базируется на использовании современного арсенала адаптивной оптики. Огромный опыт в данной области имеется в ИПЛИТ РАН, где разработана технология деформируемых зеркал с пьезоэлектрическими приводами распределенного действия и созданы системы датчиков волнового фронта, управляющих формой поверхности зеркала в режиме обратной связи в реальном времени. Эти устройства с успехом используются во многих крупных лазерных лабораториях в мире, в том числе в Институте квантовой оптики Макса Планка в Гархинге (Германия), Университете г. Лаваль (Канада) и др. (Рис. 9).

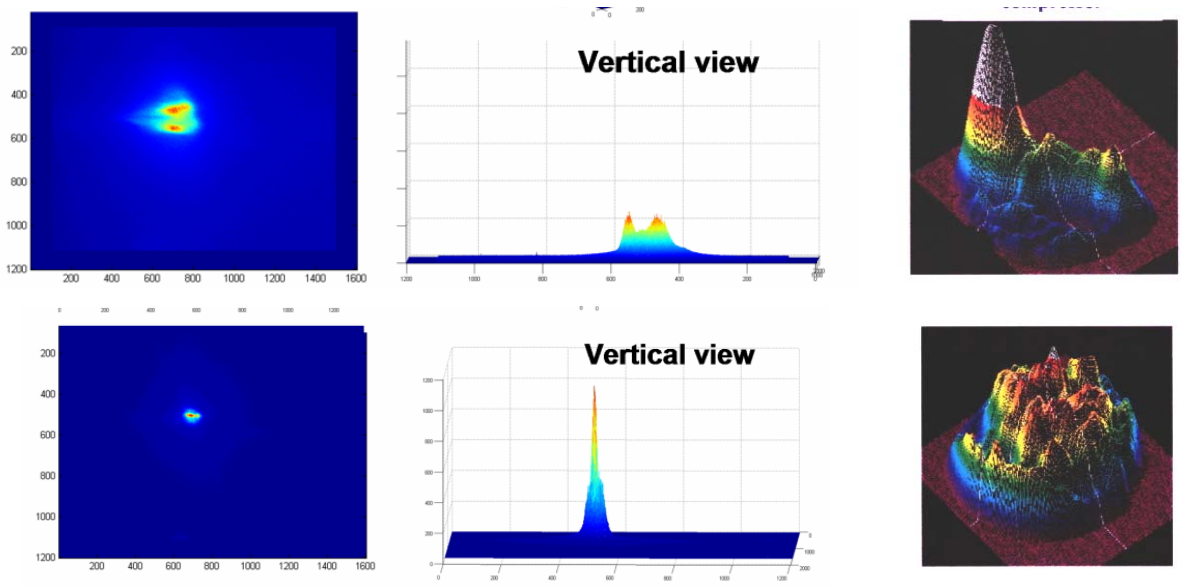


Рис. 9. Примеры использования устройств адаптивной оптики ИПЛИТ РАН: возрастание пиковой интенсивности в фокусе в 10 раз при включении адаптивной системы (Университет г. Лаваль) – слева; гомогенизация распределения интенсивности на поверхности дифракционной решетки для увеличения световой нагрузки в оптическом компрессоре лазерной системы ATLAS (Институт квантовой оптики Макса Планка) – справа

Экспериментальные исследования фундаментальных научных проблем и новых приложений, которые будут проводиться в ЦИЭС, также основаны на серьезном научно-технологическом заделе, имеющемся у ученых нашей страны. Например, в ИПФ РАН на базе петаватного лазера "PEARL" была создана установка по исследованию лазерно-плазменного ускорения электронов при взаимодействии мощного оптического излучения с газовыми мишенями. Были получены ускоряющие поля > 1 ГэВ/см и продемонстрировано ускорение сгустков электронов с энергией до 300МэВ, шириной спектра около10МэВ, зарядом до 200 пКл, угловым разбросом около 2мрад, что находится на уровне лучших мировых результатов по лазерно-плазменному ускорению заряженных частиц. Данные результаты были получены полностью на отечественной экспериментальной и диагностической базе (Рис. 10).

Одним из факторов реализуемости проекта является наличие в нашей стране кадрового потенциала для участия в создании и использовании ЦИЭС. В Приложении 7 к обоснованию мегапроекта приведен список всемирно известных школ по тематике проекта в России.

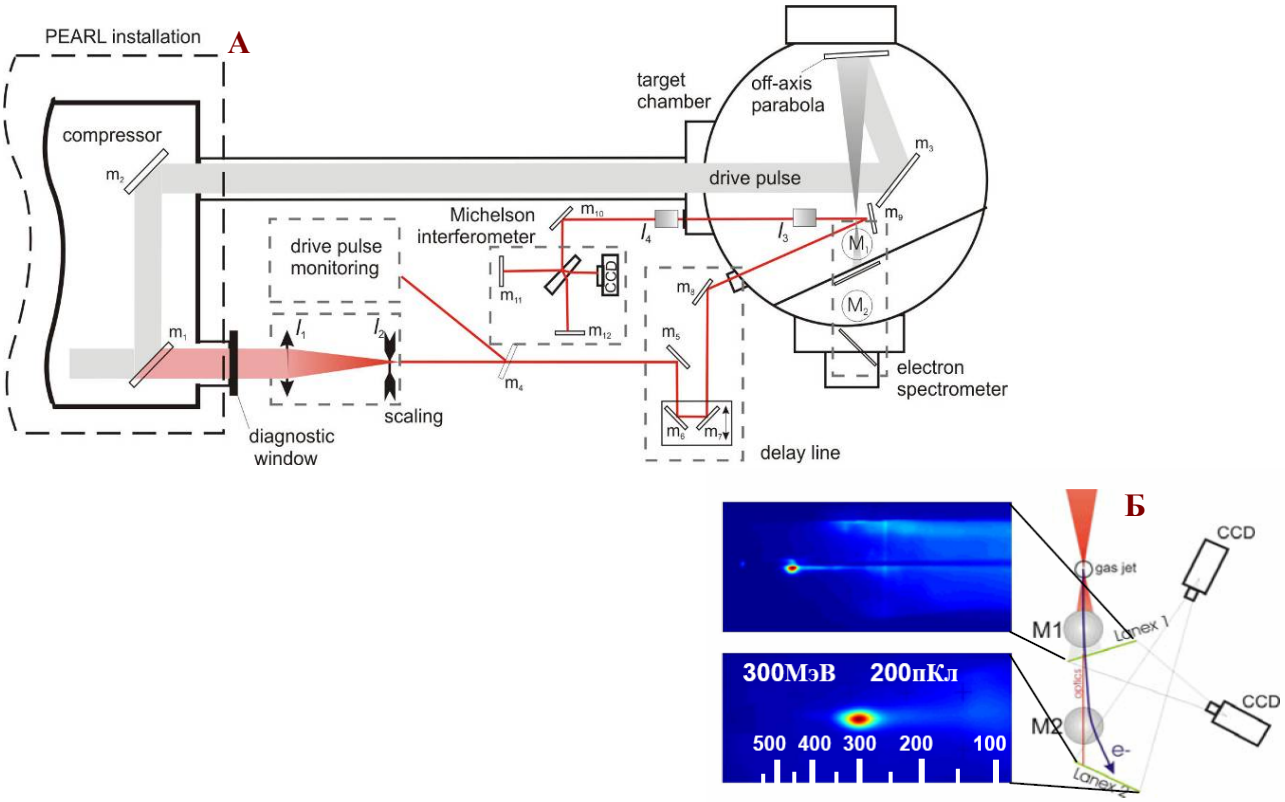


Рис 10. Схема экспериментов по лазерно-плазменному ускорению электронов на установке "PEARL" в ИПФ РАН (А) распределения ускоренных электронов по углам и энергиям, полученные с помощью уникального спектрометра (Б)

3.3. Общий бюджет проекта и сроки его реализации

Предварительная стоимость центра оценивается в 40.3 млрд. руб., из них средства госбюджета 32.2 млрд. руб., средства иностранных партнеров 6.1 млрд. руб., внебюджетные средства из отечественных источников 2 млрд. руб.

Планируемое распределение средств госбюджета по годам:

год	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
млрд. руб	2.1	3.3	3.3	5.4	7.5	5.8	2.4	0.8	0.8	0.8

Детальное распределение средств по задачам проекта представлено в Дорожной карте проекта (см. Приложение к обоснованию мегапроекта).

3.4. Ожидаемый состав стран-участников проекта и структура финансирования

ЦИЭС будет функционировать как международный научный центр в рамках международных соглашений о сотрудничестве с научными агентствами и крупными исследовательскими лабораториями других стран, включая Францию, Великобританию, Германию, Японию, США, Канаду, а также с европейским консорциумом ELI (Венгрия, Румыния, Чехия). На стадии строительства научной инфраструктуры ожидается вклад в проект со стороны иностранных участников в размере около 15% полной стоимости ЦИЭС в виде безвозмездной поставки ряда компонентов лазерного комплекса и оборудования нескольких экспериментальных лабораторий. На стадии эксплуатации оперативные расходы на функционирование ЦИЭС будут покрываться РФ и странами-участниками пропорционально времени использования источника экстремального света и экспериментальных лабораторий и объему амортизации оборудования.

4. Структура мегапроекта – цели, задачи, мероприятия

Мегапроект ЦИЭС имеет три основные цели.

Цель 1: ***Создание и функционирование инфраструктуры МЕГА-проекта.***

Цель 2: ***Проведение фундаментальных исследований на базе созданной инфраструктуры.***

Цель 3: ***Осуществление инновационных разработок с использованием инфраструктуры.***

Для достижения этих целей в проекте предусмотрено выполнение 11, 7 и 3 задач посредством осуществления 67, 22 и 11 мероприятий, соответственно. Цели, задачи и мероприятия, планируемые к выполнению в рамках мегапроекта ЦИЭС, приведены в виде Дорожной карты (Графическая форма и Итоговая таблица) в Приложении к обоснованию мкгапроекта.

Расширенное описание схемы реализации проекта приведено ниже.

4.1. Цель 1 и задачи по ее достижению

Первая цель проекта заключается в создании инфраструктуры, которая включает в себя здания, инженерные коммуникации, прототип двух 15 ПВт-ных лазерных модулей, 200 ПВт-ный лазерный комплекс, комплекс фемтосекундных лазеров с высокой средней мощностью для инновационных приложений, источник электронов с энергией 100 МэВ на основе фотокатода и СВЧ резонаторов, главную мишенную камеру, комплекс экспериментальных лабораторий, вычислительно-коммуникационный центр, инженерно-вспомогательные мастерские. Для полноценного выполнения следующих целей необходимо не только создание указанной инфраструктуры, но поддержание ее функционирования на протяжении всего проекта, для чего в структуру **Цели 1** включены мероприятия, носящие инженерно-техническую, управленческую, кадровую направленность, а также мероприятия, обеспечивающие радиационную защиту персонала.

Для достижения **Цели 1** планируется решить 11 задач.

Задача 1. Создание прототипов двух 15 ПВт лазерных модулей.

Ключевым элементом проекта ЦИЭС является лазерный комплекс с мощностью 200 ПВт, который будет состоять из 12 одинаковых модулей, оптические импульсы которых сфазированы с точностью, много меньшей периода световой волны. В связи с этим, первой задачей является создание двух прототипов таких модулей и их фазировка. Прототип будет строиться на основе отработанной в ИПФ РАН технологии параметрического усиления света, однако мощность одного модуля более чем на порядок превосходит мощность лазерного излучения, достигнутую на сегодняшний день в России и в мире. В связи с этим, создание и тестирование прототипа до начала строительства всех 12 модулей является необходимым. Кроме того, несмотря на большое количество теоретических и экспериментальных работ в области фазировки лазерных модулей, работ по фазировке импульсов с огромной энергией (сотни Дж) и/или с длительностью порядка десятка периодов лазерного поля нам не известно. Это связано, на наш взгляд, с двумя ключевыми физическими проблемами: широкополосностью излучения и с разовым режимом работы лазера (один импульс в минуту или даже десятки минут). Первая делает невозможным применение широкоразвитых методов фазировки с помощью нелинейной оптики, а вторая значительно затрудняет использование линейной адаптивной оптики. Все это делает необходимым проведение экспериментального исследования фазировке на прототипе до строительства системы фазировки 12 модулей. С другой стороны,

решение *Задачи 1* позволит также начать проведение как фундаментальных, так и инновационных исследований на уровне, значительно превышающем мировой за несколько лет до создания 200ПВт лазерного комплекса и ввода в строй всей инфраструктуры проекта ЦИЭС. По результатам мероприятий *Задачи 1* будут внесены необходимые окончательные коррективы в архитектуру и компонентную базу установки ЦИЭС.

Задача 2. Строительство зданий и инженерных сетей МЕГА-проекта.

Здания ЦИЭС должны будут включать в себя:

- помещения для всего экспериментального оборудование: “чистые“ помещения для 200 ПВт лазерного комплекса и комплекса мощных фемтосекундных лазеров с высокой средней мощностью для инновационных приложений, тоннель для источника электронов с энергией 100 МэВ на основе фотокатода и СВЧ резонаторов, зал для главной мишенной камеры, лаборатории для экспериментальных исследований, зал для вычислительно-коммуникационного центра, инженерно-вспомогательные мастерские;
- инженерную инфраструктуру: котельная, трансформаторная, парковка и т.д.;
- помещения для сотрудников центра: офисы, конференц-залы, столовая, гостиничный комплекс.

Кроме мероприятий, направленных на проектирование и строительство, в *Задачу 2* входит мероприятие по выбору места строительства, отводу земельного участка и оформление соответствующих правовых документов. Эти работы уже ведутся совместно с Правительством Нижегородской области.

Задача 3. Создание 200 ПВт лазера.

Мощность излучения 200 ПВт более чем на два порядка превышает мировой рекорд. Она будет обеспечивать превосходство создаваемой установки не только в момент ее создания, но и на многие годы вперед. Лазерный комплекс с выходной мощностью 200 ПВт является сердцем всего проекта, его создание – ключевая и самая дорогостоящая задача проекта. *Задача 3* включает в себя два подготовительных мероприятия (3.1 и 3.2), пять мероприятий, направленных собственно на создание лазерного комплекса (3.3 - 3.7), транспортировку двенадцати лазерных пучков в главную мишенную камеру и другие лаборатории (мероприятие 3.8) и ввод комплекса в эксплуатацию (мероприятие 3.9).

Разработка детальной проектной документации (мероприятие 3.1) будет сделана как на основе имеющегося опыта, так и опыта, полученного при создании и

эксплуатации прототипов двух модулей (*Задача 1*). До начала создания 200 ПВт лазерного комплекса будут развиты необходимые ключевые технологии (мероприятие 3.2):

варки и полировки неодимового стекла, производства ламп накачки, производства дифракционных решеток, роста широкоапертурных нелинейных кристаллов, напыления стойких тонкопленочных покрытий с заданными дисперсионными свойствами, изготовления адаптивной оптики. Важно, что эти два мероприятия будут завершены до окончания строительства зданий центра (*Задача 2*).

Создание общей стартовой части (мероприятие 3.3) будет начато также до завершения строительства зданий в помещении двух прототипов. Впоследствии стартовая часть будет перенесена и введена в эксплуатацию в главном здании центра. Несмотря на общие принципы построения, стартовая часть 200 ПВт лазера существенно отличается от стартовой части прототипа двух модулей, энергия выходного импульса будет примерно в 10 раз больше.

Создание двенадцати модулей (мероприятие 3.4) начинается с комплектации базовых элементов сразу после физического пуска прототипа первого модуля (мероприятие 1.3). После завершения работ по созданию (мероприятие 1.3 и 1.4) и фазировке (мероприятие 1.5) двух прототипов окончательные детали схемы будут определены, что позволит закончить комплектацию и далее произвести сборку, юстировку, отладку, синхронизацию и апробацию одновременной работы12 модулей в несфазированном режиме.

Мероприятие 3.5 – фазировка двенадцати модулей – начинается сразу после создания стартовой части (мероприятие 3.3): будут проведены эксперименты по фазировке 12 модулей без усиления лазерных пучков в модулях. Это позволит протестировать большую часть функциональных параметров системы фазировки еще до создания 12 модулей. Отладка и доработка фазировки модулей в силовом варианте начинается после завершения мероприятия 3.4.

Система диагностики и система управления являются важной частью любой физической установки, но в столь уникальной и масштабной установке, как 200 ПВт лазерный комплекс, эти системы приобретают особую значимость. Им посвящены соответственно мероприятия 3.6 и 3.7.

Для использования излучения 200 ПВт лазера в физических экспериментах необходимо доставить 12 пучков в главную мишенную камеру и другие лаборатории (мероприятие 3.8). Основными трудностями при создании системы транспортировки являются большой диаметр лазерных пучков (около 30 см), необходимость

обеспечить вакуум на всей трассе от компрессора лазерных импульсов до мишеней, а также прецизионная фокусировка и контроль оптического пути с погрешностью много меньше длины волны.

Задача 4. Создание комплекса мощных фемтосекундных лазеров с высокой средней мощностью для инновационных приложений.

200 ПВт лазер (*Задача 3*) является, безусловно, главным элементом ЦИЭС, однако не единственным. Естественной ”платой” за эту рекордную мощность является маленькая частота повторения импульсов (один раз в несколько часов). Для целого ряда приложений, особенно инновационных приложений, столь низкая частота повторения недопустима, однако и столь огромная мощность не нужна. В связи с этим важной составляющей проекта ЦИЭС является создание комплекса мощных фемтосекундных лазеров с большой частотой повторения (от 1 Гц до 10 кГц) и относительно небольшой мощностью – до 1 ПВт. Этот комплекс, являясь комплементарным к 200 ПВт лазеру, с точки зрения физических приложений, будет использовать ту же инженерно-техническую инфраструктуру (*Задача 2, 5 - 10*). Кроме того, синхронизация 200 ПВт лазера с лазерами, работающими с большой частотой повторения, открывает большие возможности для использования последних для диагностики взаимодействия 200 ПВт излучения с веществом. Для создания лазеров с большой частотой повторения необходимо использование мощной диодной накачки. Развитию технологии производства диодных лазеров посвящено специальное мероприятие в рамках данной задачи. Заметим, что приложения этой технологии гораздо шире рамок проекта ЦИЭС.

Задача 5. Создание источника электронов с энергией 100 МэВ на основе фотокатода и СВЧ резонаторов.

Одно из направлений исследований в ЦИЭС – это взаимодействие мощного лазерного излучения с пучками (сгустками) заряженных частиц. Эти сгустки могут создаваться при воздействии мощного лазерного излучения на мишень, что обеспечивает их синхронизацию с лазерным импульсом, однако качество таких сгустков не велико и частота повторения ограничена. Использование традиционного источника электронов на основе СВЧ резонаторов позволяет получить электронные сгустки хорошего качества, а использование фотокатода – синхронизовать электронный пучок с лазерным импульсом. Энергия электронного сгустка – 100 МэВ – выбрана исходя из требований к параметрам электронного сгустка для инжекции в лазерно-плазменный ускоритель. В результате открывается возможность для

проведения уникальных экспериментов по ускорению электронов до энергий более 10 ГэВ (**Цель 2**, *Задача 2*, мероприятие 2.1).

Задача 6. Создание главной мишенной камеры.

В ЦИЭС исследование взаимодействия лазерного излучения с веществом будет проводиться в главной мишенной камере и экспериментальных лабораториях. К этой камере будут подведены все 12 пучков 200 ПВт лазера, электронный сгусток, а также излучение лазеров с большой частотой повторения. Камера должна быть оснащена необходимым инженерным и диагностическим оборудованием. Размер камеры будет определен позднее, однако опыт больших лазерных установок (например, NIF в Ливерморской национальной лаборатории США) показывает, что камеру необходимо устанавливать во время строительства здания (мероприятие 2.7), что и предусмотрено в Дорожной карте.

Задача 7. Создание и оснащение экспериментальных лабораторий.

Исследование взаимодействия лазерного излучения с веществом будет проводиться не только в главной мишенной камере (*Задача 6*), но экспериментальных лабораториях, которых будет около десяти. Точное их число и назначение каждой из них будет определено позднее. Одна из функций этих лабораторий – проведение специальных экспериментов, другая – моделирование (на относительно низкой мощности) экспериментов, планируемых в главной мишенной камере, и отработка диагностического оборудования. В соответствии с этими требованиями будут проведены мероприятия по разработке концепции и созданию системы доставки лазерных пучков и электронного сгустка в лаборатории, а также оснащению экспериментальных лабораторий необходимым оборудованием. В данную задачу также входит мероприятие по созданию и оснащению сателлитных лабораторий в ИПЛИТ РАН, РНЦ КИ и МИФИ, занимающихся отработкой различных критических технологий субэкзаваттного лазера и развитием ряда приложений фундаментальных исследований, ведущихся в ЦИЭС.

Задача 8. Обеспечение радиационной безопасности.

При взаимодействии мощного лазерного излучения с веществом заряженные частицы ускоряются до ультрарелятивистких скоростей. При их торможении неизбежно возникает тормозное излучение в рентгеновском и гамма-диапазонах. В некоторых случаях это излучение обладает уникальными свойствами и является непосредственной целью экспериментов, в других является паразитным. В любом случае радиационная

защита сотрудников и дозиметрический контроль является абсолютно необходимой задачей. Срок ее выполнения совпадает со сроком выполнения всего проекта. В рамках этой задачи, планируется семь мероприятий, включающих в себя определение требований к системе радиационной защиты; разработку проекта радиационной защиты персонала от источников излучения, находящихся в мишенном зале, в экспериментальных лабораториях и в тоннеле ускорителя; создание радиационной защиты персонала; изготовление и тестирование средств защиты, обеспечение дозиметрического контроля в процессе эксплуатации установки.

Задача 9. Создание вычислительно-коммуникационного центра.

Вычислительно-коммуникационный центр будет выполнять несколько функций. Во-первых, это обработка, систематизация и архивация экспериментальных данных, полученных в ЦИЭС. Во-вторых, это дистанционное управление научным и инженерным оборудованием. В-третьих, численное моделирование проводимых экспериментов как на стадии их планирования (предсказание результатов и оптимизация параметров экспериментов), так и интерпретации полученных результатов. В-четвертых, численное исследование новых явлений и эффектов. В-пятых, связь ЦИЭС с другими научными центрами в России и за рубежом.

Вычислительная мощность суперкомпьютера составит 1 Петафлопс.

Задача 10. Оснащение инженерно-вспомогательных мастерских.

Для эффективной работы ЦИЭС необходимо оперативное выполнение работ, связанных как с созданием установки, так и с проведением на ней запланированных исследований. Для этого в Центре будут созданы и оснащены соответствующим оборудованием оптический участок (полировка и нанесение тонкопленочных покрытий), радиоэлектронная лаборатория, лаборатория вакуумного оборудования, механические мастерские, криогенная станция.

Задача 11. Обеспечение функционирования МЕГА-установки.

Функционирование установки и на стадии создания, и на стадии проведения экспериментов требует проведения мероприятий в области управления (мероприятие 11.1), кадровой политики (мероприятие 11.2), поддержания инфраструктуры (мероприятие 11.3) и международного сотрудничества (мероприятие 11.4). Начинается выполнение мероприятий *Задачи 11* либо одновременно с началом проекта, вскоре после его начала. Окончание всех мероприятий совпадает с окончанием проекта.

4.2. Цель 2 и задачи по ее осуществлению

Второй целью проекта является проведение фундаментальных исследований на базе созданной инфраструктуры. Экспериментальные исследования планируется вести в четырех основных направлениях, которые в настоящее время принято называть «четырьмя колоннами физики экстремального света», включая создание вторичных источников ускоренных частиц и жестких фотонов на базе взаимодействия экстремально сильных полей с веществом, разработку аттосекундных и зептосекундных источников электромагнитного излучения, фотоядерную физику и изучение нелинейных свойств вакуума в сверхсильных полях. Дополнительным экспериментальным направлением, базирующимся в определенной мере на результатах предыдущих, является лабораторное моделирование астрофизических и ранних космологических явлений. Для обеспечения постановки экспериментов и интерпретации их результатов будет осуществляться теоретическое моделирование процессов взаимодействия излучения с веществом в диапазоне интенсивностей 10^{23}-10^{27} Вт/см^2, на несколько порядков превосходящих достигнутые к настоящему времени на наиболее передовых установках в мире. Наряду с этим, будет осуществляться разработка концепций создания источников излучения экзаваттного и зеттаваттного уровней мощности на базе взаимодействия мультипетаваттных импульсов с плазмой. Разработка этих концепций будет сопровождаться развитием соответствующей элементной базы.

Задача 1. Моделирование процессов взаимодействия экстремальных световых полей с веществом и вакуумом.

В мероприятия данной задачи входит разработка, анализ и расчет моделей лазерно-плазменного ускорения частиц, новых источников излучения в рентгеновском и гамма-диапазонах, включая источники аттосекундной и зептосекундной длительности, моделей квантовой электродинамики в сверхсильных лазерных полях, экстремальных состояний вещества в условиях сверхвысоких температур и давлений. Для обеспечения моделирования будут создаваться и внедряться новые компьютерные коды, в том числе предназначенные для расчетов на высокопроизводительных компьютерах вычислительно-коммуникационного центра ЦИЭС. На базе аналитических и численных расчетов будут планироваться эксперименты по наблюдению новых явлений и интерпретироваться экспериментальные результаты.

Задача 2. Проведение экспериментов по лазерно-плазменному ускорению заряженных частиц.

Данная задача направлена на создание компактных источников ускоренных заряженных частиц на основе лазерно-плазменных взаимодействий. Будет осуществлено исследование различных механизмов ускорения электронов и ионов в газовых, твердотельных и структурированных мишенях. Уже к настоящему времени продемонстрированы темпы лазерно-плазменного ускорения заряженных частиц на 3-4 порядка большие, чем в конвенциональных ускорителях. В планах ЦИЭС стоит вопрос о достижении в компактных установках интегральных характеристик ускорения и качества пучков, соответствующих требованиям экспериментов по физике высоких энергий. Отдельный интерес представляет вопрос о комбинированном ускорении электронов в линейных и лазерно-плазменных ускорителях, что даст возможность объединить высокое качество инжектируемых сгустков частиц и высокий темп их ускорения. Основываясь на прогнозируемых результатах ЦИЭС, ускорение электронов до энергий в сотни ГэВ и ионов до энергий десятки ГэВ может быть реализовано в относительно небольших лабораториях академических и университетских центров, что значительно расширит фронт исследований по физике высоких энергий. Работы по данной задаче будут включать в себя разработку лазерных мишеней, проведение экспериментов на прототипе экзаваттного комплекса, в том числе с использованием малого линейного ускорителя, и эксперименты на 200 ПВт лазере и 100 МэВ линейном ускорителе электронов.

Задача 3. Создание новых источников излучения в жестком рентгеновском и гамма-диапазонах.

В рамках данной задачи предполагается создание нескольких классов уникальных источников излучения рентгеновского и гамма-диапазонов, включая фемтосекундные источники некогерентного излучения рекордно высокой яркости, источники фемтосекундного когерентного излучения – компактные рентгеновские лазеры на свободных электронах, источники излучения аттосекундной и зептосекундной длительности, а также узкополосные источники гамма-излучения для задач фотоядерной физики. Для создания таких источников будут разработаны лазерные мишени и вигглеры, изучены особенности трансформации энергии сверхмощных оптических импульсов в рентгеновский и гамма-диапазоны, проведены эксперименты на прототипе и затем на 200 ПВт лазере. Новые источники излучения

будут иметь огромный диагностический потенциал, по существу, впервые открывая возможности исследования объектов с пикометровым пространственным и субфемтосекундным временным разрешением.

Задача 4. Исследование нелинейных свойств вакуума в экстремальных световых полях.

Данное направление (так называемая «четвертая колонна физики экстремального света») является наиболее фундаментальным и сложным для экспериментальных исследований, поскольку впервые ставит в повестку дня наблюдение пространственно-временной структуры и нелинейных свойств вакуума, и, с другой стороны, требует для проведения экспериментов предельно возможных параметров лазерного излучения. Эксперименты будут проводиться на 200 ПВт лазерном комплексе, позволяющим при острой фокусировке оптического излучения и когерентном сложении всех каналов достигать значений интенсивности более 10^{25} Вт/см^2, а в режиме генерации аттосекундных импульсов рентгеновского диапазона, до 10^{27} Вт/см^2. Эти уровни будут достаточными для наблюдения эффектов взаимодействия электромагнитных полей в вакууме и квантово-электродинамических эффектов, таких как генерация электронно-позитронных пар и рождение ливней частиц в вакууме.

Задача 5. Проведение исследований по фотоядерной физике.

Подобно тому, как создание источников когерентного оптического излучения привело к развитию атомной оптики, создание источников узкополосного гамма-излучения высокой яркости будет в недалеком будущем основой для становления ядерной оптики, или фотоядерной физики. Такие источники в проекте ЦИЭС будут получены в различных режимах взаимодействия мультипетаваттных лазерных импульсов с релятивистскими электронными пучками. Источники узкополосного гамма-излучения составят одну из основ инструментария фотоядерной физики. Другая основа – это адаптация традиционных методов и инструментов ядерной физики к данному научному направлению. Исследовательская часть данной задачи будет заключаться в изучении внутриядерных процессов, инициированных вторичными источниками излучения, создании экзотических ядерных структур и развитии методов лазерного управления внутриядерными процессами.

Задача 6. Экспериментальное моделирование астрофизических явлений.

Основой для моделирования астрофизических явлений с помощью сверхмощных лазеров являются рекордные значения давлений, ускорений и напряженностей электромагнитных полей, достигаемых при воздействии лазерного излучения на вещество. Тем самым в лабораторном эксперименте могут быть реализованы условия, имеющие место в крупномасштабных астрофизических явлениях, в том числе в недрах звезд или в окрестности черных дыр, а также некоторые особенности взаимодействия частиц на ранних стадиях эволюции Вселенной.

Задача 7. Исследование возможностей создания экзаваттных и зеттаваттных источников света.

Дальнейшее продвижение мощности лазерного излучения в экзаваттный и зеттаваттный диапазон за счет прямого масштабирования параметров лазерных каналов или простого увеличения их числа является невозможным в связи с принципиальными техническими ограничениями (например, размеры усилительных элементов, стойкость дифракционных решеток компрессора), либо нарастанием сложностей в управлении лазерным комплексом. Поэтому развитие новых концепций получения импульсов с мощностью более 1 Экзаватта является перспективной задачей ЦИЭС. Наиболее интересной концепцией в этом плане является отказ от традиционных решеточных компрессоров лазерных импульсов и переход к рамановскому усилению и сжатию мультипетаваттных импульсов в плазме в присутствии относительно длинноимпульсного (десятки пикосекунд) импульса накачки. Этот эксперимент планируется в ЦИЭС после запуска 200 ПВт лазера. Развитие данного и ряда других подходов к увеличению мощности излучения будет сопровождаться развитием соответствующей элементной базы.

4.3. Цель 3 и задачи по ее осуществлению

Третьей целью проекта является осуществление инновационных разработок с использованием созданной инфраструктуры ЦИЭС. Эта цель включает три задачи по разработке и созданию прототипов ускорительной техники, диагностических и метрологических комплексов, а также лазерных источников с высокой пиковой и средней мощностью.

Задача 1. Разработка и создание прототипов ускорительной техники нового поколения.

Мероприятия этой задачи включают разработку прототипов компактных лазерно-плазменных ускорителей электронов, комбинированных комплексов конвенциональных и лазерно-плазменных ускорителей электронов, а также компактных лазерно-плазменных ускорителей ионов. Разработка соответствующих прототипов будет базироваться на результатах фундаментальных исследований в рамках *Задачи 2*, **Цели 2** данного проекта.

Задача 2. Разработка прототипов диагностических и метрологических комплексов с рекордным разрешением.

Мероприятия этой задачи включают разработку прототипов диагностических комплексов для наблюдения процессов с аттосекундным временным разрешением, для изучения материалов с пикометровым пространственным и аттосекундным временным разрешением, а также для зондирования материалов и сред с комбинированным использованием световых и корпускулярных импульсов фемтосекундной длительности. Разработка соответствующих прототипов будет базироваться на результатах фундаментальных исследований в рамках *Задачи 3*, **Цели 2** данного проекта.

Задача 3. Новые технологии для создания лазерных источников с высокой пиковой и средней мощностью.

Мероприятия этой задачи включают разработку и создание прототипов лазерных источников нового поколения для промышленности, медицины, термоядерной и гибридной энергетике. По каждому из этих направлений будут разработаны и запатентованы концепции и технические решения, разработаны ключевые лазерные, оптические и электронные компоненты, соответствующие технологии будут переданы в производство. Разработка соответствующих прототипов будет базироваться на результатах исследований в рамках *Задачи 4*, **Цели 1** данного проекта.

5. Соответствие проекта ЦИЭС критериям отнесения исследовательских установок к международным научным мегапроектам

№ п/п	**Название критерия, подготовленного документа**	**Оценка, исходя из 100 баллов**	**Комментарии**
1	Исследовательская установка позволяет решать масштабные научные проблемы; ожидаемые научные результаты, получаемые только с ее использованием, открывают новые возможности в развитии мировой науки и создании не имеющих аналогов прорывных технологий		В основе планируемой инфраструктуры будет находиться новый уникальный источник света с мощностью 0.1-0.2 Экзаватта ($1\text{-}2\cdot10^{17}$ Вт). Впервые откроются возможности изучения пространственно-временной структуры вакуума и неизвестных явлений на стыке физики высоких энергий и физики сверхсильных полей. Планируемые приложения результатов исследований будут включать разработку компактных ускорителей заряженных частиц с размерами в сотни раз меньшими имеющихся ускорителей, создание источников сверхкоротких импульсов когерентного и некогерентного излучения в жестком рентгеновском и гамма-диапазонах для диагностики материалов с пикометровым (10^{-12} м) пространственным и аттосекундным (10^{-18} с) временным разрешением, разработку новых источников излучений и частиц для диагностики и терапии онкологических заболеваний и др.
2	Установка существенно превосходит по параметрам ближайший аналог, ожидаемый период сохранения уникальности – не менее 10 лет		Новый уникальный источник света с мощностью 0.1-0.2 Экзаватта ($1\text{-}2\cdot10^{17}$ Вт) в сотни раз будет превосходить имеющиеся сейчас лазеры (для сравнения, подобная мощность приблизительно в 10000 раз больше мощности всех источников энергии, работающих на планете)
3	Намерение участвовать в создании (содержании) установки высказали иностранные государства		К настоящему времени интерес к участию в создании и эксплуатации ЦИЭС высказали Министерство образования и науки Франции, Комиссариат атомной энергетики Франции, Агентство по атомной энергии Японии, Европейский центр ядерных исследований ЦЕРН, Лос-Аламосская национальная лаборатория (США), Национальная лаборатория ускорителей им. Ферми (США), Институт исследования ускорителей больших энергий КЕК (Япония), Резерфордовская лаборатория (Великобритания), Институт ускорителей им. Дж.Адамса (Великобритания), Центр исследований антипротонов и ионов FAIR (Германия), Национальный институт научных исследований Канады.

			Переговоры о возможностях сотрудничества по проекту ЦИЭС ведутся с руководителями европейского инфраструктурного проекта ELI и представителями Европейской комиссии. Проект ELI, имеющий целью создание и использование источников экстремальных световых полей, успешно прошел подготовительный этап, в котором приняли участие 13 европейских государств. По результатам этапа в 2010 г. Европейская Комиссия приняла решение о строительстве в 2011-2016 г.г. трех новых лазерных центров с источниками с мощностью около 10 ПВт в Венгрии, Чехии и Румынии со стоимостью строительства каждого около 280 млн. евро. ЦИЭС естественным образом будет представлять интерес для международного сотрудничества с консорциумом ELI в области экстремальных световых полей, имея в своем составе лазерный источник следующего поколения и программу исследований с использованием полей, не доступных в других исследовательских центрах. Важную роль играет поддержка проекта ЦИЭС со стороны инициатора и руководителя подготовительной стадии европейского проекта ELI проф. Жерара Муру.
4	Наличие положительной международной экспертизы проекта		Международная экспертиза под эгидой Минобрнауки РФ планируется в октябре 2011 г., список возможных экспертов представлен
5	Создание и работа установки осуществляются на основе международного договора		Имеется международное соглашение между Российской Федерацией и Францией о проведении исследований в области экстремальных силовых полей.
6	Наличие технического, экономического и финансового обоснования проекта		Субэкзаваттный лазер, существенно (более чем на порядок) превосходящий по мощности излучения уровень, заложенный в настоящее время в самые мощные из строящихся либо проектируемых лазерных комплексов в мире, будет создан на основе уникальной техники параметрического усиления частотно модулированных лазерных импульсов (OPCPA) петаваттной мощности, разработанной в Институте прикладной физики РАН. В 2007 г. в ИПФ РАН был запущен лазер "PEARL" с импульсной мощностью 0.56 ПВт, длительностью импульсов около 45 фс и энергией 25 Дж, который входит сейчас в пятерку наиболее мощных лазеров в мире.

7	Наличие в Российской Федерации всемирно признанных научных школ		Техника параметрического усиления частотно модулированных лазерных импульсов (OPCPA) является единственной существующей техникой усиления с обеспеченной компонентной базой, позволяющей проектировать и строить лазерные комплексы с мощностью 10 ПВт и выше. Лидирующее положение в мире в освоении и развитии OPCPA занимает ИПФ РАН. Всего в России имеется около 10 всемирно признанных научных школ в данном направлении, работающих в ИПФ РАН, ИОФ РАН, ОИВТ РАН, ИЛФ СО РАН, ФИАН, МГУ, МИФИ
8	Предполагаемая стоимость участия Российской Федерации в создании и/или содержании в течение 5 лет установки превышает 1,5 млрд. руб., для финансового участия Российской Федерации соответствует мировой практике для подобных установок		Проект рассчитан на 10 лет. Суммарная стоимость 40 300 млн. рублей из них: из бюджета РФ 32 200 млн. рублей, внебюджетных отечественных источников финансирования – 2 000 млн. рублей, средств иностранных партнеров – 6 100 млн. рублей
9	Дорожная карта		есть