

## **Тема работы:**

Численное моделирование распространения мощных ультракоротких лазерных импульсов в нелинейной среде в режиме самовоздействия.

## **Состав коллектива:**

Гейнц Юрий Эльмарович, д.ф.-м.н., г.н.с. ИОА СО РАН;  
Землянов Александр Анатольевич, д.ф.-м.н., г.н.с. ИОА СО РАН;  
Булыгин Андрей Дмитриевич, к.ф.-м.н., н.с. ИОА СО РАН;  
Минина Ольга Владимировна, м.н.с. ИОА СО РАН

## **Финансовая поддержка:**

РНФ № 16-17-10128 «Дальнее распространение мощного лазерного излучения ультракороткой длительности в атмосфере в режиме множественной филаментации», рук. Ю.Э. Гейнц (ИОА), 2016-2018.

## **Научное содержание работы:**

### **1. Цель исследований**

Теоретические исследования по созданию кучного распределения филаментов в зоне мишени при помощи профилирования лазерного пучка и фазовой коррекции его пространственных зон. Обобщение разработанной методологии управляемой филаментации на случай распространения мощного фемтосекундного лазерного излучения тераваттной мощности в воздухе.

### **2. Современное состояние проблемы**

Атмосферное распространение мощного ультракороткого лазерного излучения на километровые дистанции впервые наблюдалось франко-немецкой научной группой в рамках международного лидарного проекта "Teramobile" (*H. Wille et al., European Physical Journal - Applied Physics, 2002*). В опубликованных на рубеже прошедшего и нынешнего столетий работах сообщается о наблюдении нелинейных трансформаций пучка тераваттного Ti:Sapphire-лазера (длина волны 800 нм, длительность импульса 100 фс, пиковая мощность до 3 ТВт, диаметр пучка 3 см) вплоть до 2-х км на вертикальной атмосферной трассе. Эти трансформации выражались в каналировании центральной части лазерного пучка вблизи нелинейного фокуса и были идентифицированы авторами как филаментация излучения. Возникающее при этом широкополосное излучение («белый свет») регистрировалось с расстояний порядка 20 км астрономическим телескопом. Авторы сообщают о развитии хаотичной множественной филаментации пучка излучения и регистрации до 400 индивидуальных высокоинтенсивных каналов на дистанции от 100 м до 320 м в зависимости от глубины начального chirпирования импульсов (*Bejot et al., Appl. Phys. Lett., 2007*).

Важным аспектом проблемы дальнейшей передачи высокой мощности ультракороткого лазерного излучения является рассмотрение внутренней структуры филаментированного пучка и ее динамических характеристик вдоль трассы распространения. Предварительные исследования, выполненные в работах канадской (*Hosseini et al., Appl. Phys. B, 2004; Luo et al., Appl. Opt., 2005*) и франко-немецкой групп (*Berge et al., Phys. Rev. Lett., 2004*), показали, что в режиме множественной филаментации происходит взаимодействие отдельных филаментов внутри пучка. Причем это взаимодействие может носить характер конкуренции, или же кооперации в борьбе за энергию «резервуара» пучка. Близко расположенные филаменты эффективно взаимодействуют через интерференцию концентрических колец,

окружающих каждый из филаментов (*Aközбек et al., J. Modern Opt., 2002*), что приводит к генерированию новых нелинейных фокусов в режиме «оптической турбулентности». Если филаменты пространственно рассеяны по сечению светового пучка, то каждый из них развивается по своему, достаточно изолированному сценарию, однако воздействие на «соседей» проявляется посредством керровской нелинейности, способствующей забору энергии пучка из широкой области вокруг филамента. От того, как протекает взаимодействие филаментов, зависит общая протяженность области филаментации, а также суммарная передаваемая мощность атмосферной трассы (*Mejean et al., Phys. Rev. E, 2005*). Следовательно, контроль над динамикой множественной филаментации мощного лазерного импульса, управление числом и взаимным расположением филаментов имеют первостепенное значение для решаемой в проекте задачи.

### **3. Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы.**

В основу сценария управления самофокусировкой мощного импульсного лазерного излучения в атмосфере положена концепция физической природы филаментации, разработанная в авторском коллективе. Она отличается от таковых, принятых в других научных коллективах. Практически для всех моделей филамент рассматривается как некоторая волновая структура. В нашей концепции основной «активный элемент» – дифракционно-лучевая трубка, внутри которой сформирован филамент. Взаимодействие между различными трубками в режиме множественной филаментации определяет конфигурацию области филаментации. Управление конфигурацией филаментарной структуры позволяет создавать экстремальные для атмосферы световые поля в прогнозируемом месте пространства. Авторами проекта также используется подход нахождения критериев подобия физических явлений, протекающих в лабораторных условиях и в реальной атмосфере.

Теоретические исследования в рамках проекта проводились в нескольких направлениях. Первое из них связано с моделированием нелинейного самовоздействия мощного импульсного излучения на воздушной трассе с частотно-зависимым поглощением. Были исследованы закономерности филаментации импульсов с длиной волны в ближней и в средней ИК областях спектра с целью оценки перспективности их использования в атмосферно-оптических приложениях.

В качестве эволюционного уравнения для оптического поля лазерного импульса в нелинейной среде рассматривалось уравнение однонаправленного распространения комплексной огибающей в 4D-мерной области пространственно-временных частот. Полная задача описания множественной филаментации лазерного импульса заключается в расчете пространственной динамики оптического поля по всем координатным осям в условиях действия оптической нелинейности среды (эффект Керра), ее фотоионизации и образования плазменных областей. Исходная система уравнений помимо линейных эффектов (дифракция, поглощение) позволяет корректно учесть «временную память» среды распространения, связанную с частотной дисперсией временного профиля светового импульса, инерционностью кубичной нелинейности (комбинационным саморассеянием) и нестационарностью плазменной дефокусировки. В данном представлении постоянная распространения волны содержит всю необходимую информацию о дифракции пучка, а также о частотной дисперсии групповой скорости спектрально ограниченного волнового пакета – импульса. Для задания хроматической дисперсии показателя преломления воздуха в окнах прозрачности атмосферы была использована формула Коши. В среднем ИК диапазоне излучения в присутствии сильных полос поглощения атмосферных составляющих (от 2 до 8 мкм) мы воспользовались атласом молекулярных линий HITRAN.

Вычисления проводились для целого набора параметров лазерного излучения и среды распространения (длина волны, радиус пучка, длительность импульса, форма амплитуды и фазы, модель оптической нелинейности среды). Как правило, использовались счетные конфигурации с 24-мя, или 48-ю процессорными ядрами и до 200 Гб оперативной памяти.

#### **4. Полученные результаты.**

Были проведены численные эксперименты для двух длин волн лазерного излучения 0.8 мкм и 10.6 мкм. Вычисление скорости фотоионизации проводилось по широко известной модели ионизации Переломова-Попова-Герентьева для синтетической воздушной среды, состоящей из 79% N<sub>2</sub> и 21% O<sub>2</sub> с потенциалами ионизации 15.6 эВ и 12.1 эВ соответственно. Расчеты выполнялись для импульсов с начальным значением энергии 30 мДж (0.8 мкм) и 19 Дж (10.6 мкм), что соответствовало приблизительно стократному превышению пиковой мощности над пороговой мощностью самофокусировки в воздухе.

Установлено, что характер протекания множественной филаментации излучения зависит от его начальных параметров (рис. 1). Действительно, изменением одной лишь только фазы световой волны на входе в нелинейную среду можно абсолютно случайное пространственное распределение «горячих» зон с субтераваттной интенсивностью скомпоновать либо в связку (сноп) каналов вблизи центра пучка, или же в детерминированную пространственную решетку.

Наши исследования показали, что в сравнении с обычной параболической фокусировкой, использование биморфного деформируемого зеркала позволяет перемещать область филаментации и плазмообразования по всей длине трассы в более широком диапазоне дистанций от 20 м÷50 м до конца трассы без существенного сокращения протяженности существования филаментов (рис. 2). При использовании абберрационной фокусировки пучка область плазмообразования (филаментации) может быть смещена в дальний конец оптической трассы. Так, для одной из ситуаций филаментации излучения с абберрационным волновым фронтом начало зоны филаментации удаляется практически на 20 м от ее положения для плоского зеркала. Протяженность области филаментации при этом также увеличивается. В этом заключается основное отличие абберрационной фокусировки пучка от традиционной фокусировки параболическим зеркалом для управления положением области филаментации. В первом случае возможно перемещать по трассе всю зону филаментации без сокращения ее протяженности, а во втором удастся сдвинуть только точку старта филаментации, при этом длина области филаментации всегда уменьшается.

Кроме того, появляется возможность осуществлять конфигурирование пространственного расположения высокоинтенсивных световых каналов в поперечном сечении пучка. Для ряда специальных конфигураций волнового фронта пучка обнаружен режим бесплазменного распространения излучения в форме упорядоченной связки («снопа») высокоинтенсивных ( $10^{11}$ - $10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>) слаборасходящихся световых каналов (< 0.01 мрад), имеющих миллиметровый поперечный размер и высокую пространственную протяженность (>100 м).

5. *Иллюстрации, визуализация результатов*

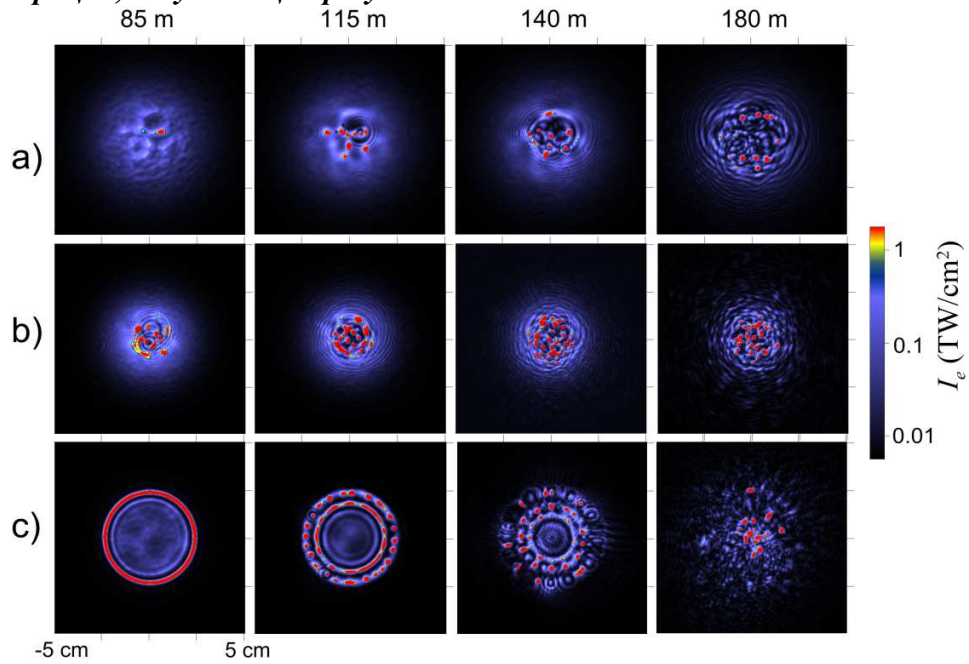


Рис. 1. Поперечные профили интенсивности лазерного пучка (800 нм) при филаментации в воздухе: (а) - плоский волновой фронт; (б) – сходящийся; (в) – абберационный.

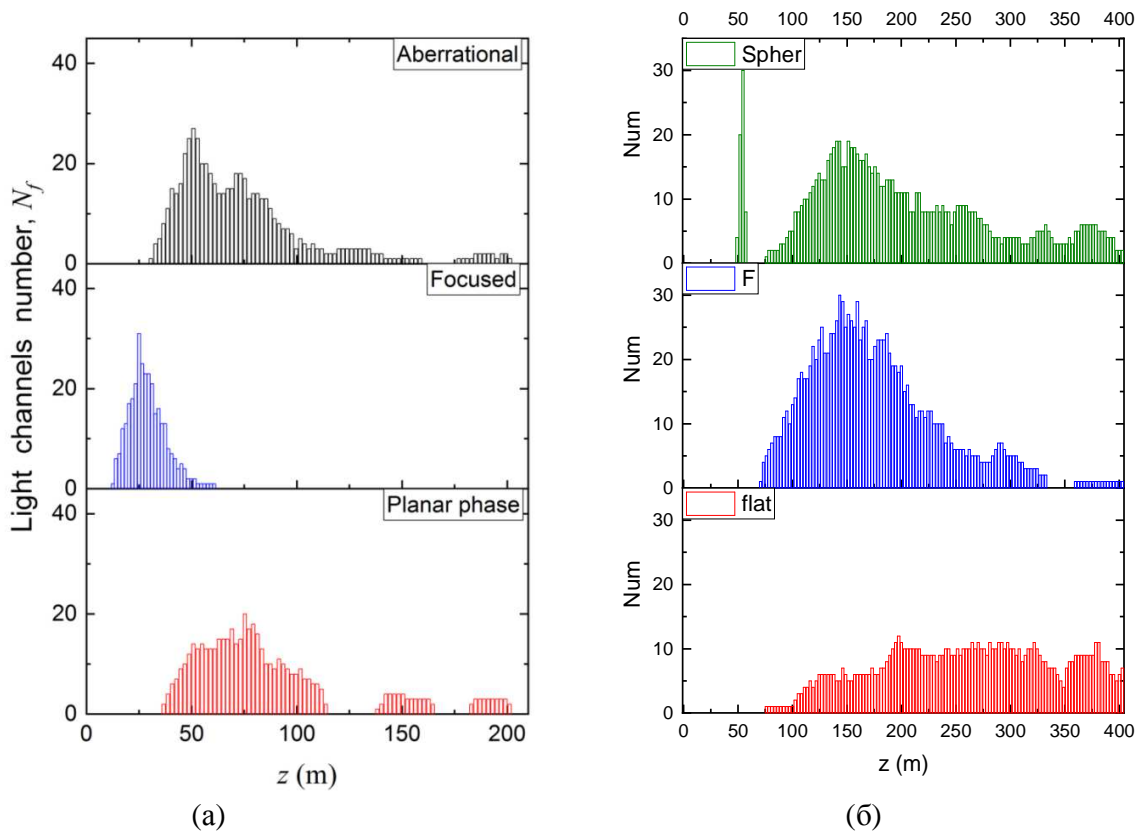


Рис. 2. Изменение числа филаментов вдоль трассы распространения излучения с различным типом фазового фронта для  $\lambda_0 = 0.8 \mu\text{м}$  (а) и  $10.6 \mu\text{м}$  (б).

## Эффект от использования кластера в достижении целей работы

Необходимость использования вычислительного кластера связана с необходимостью численно решить четырехмерное уравнение Шредингера для комплексной огибающей э/м поля световой волны в нелинейной среде. Задача требует высокой дискретизации пространства-времени и, соответственно, как больших ресурсов оперативной памяти, так и высокой производительности CPU, чего невозможно достичь на обычных рабочих станциях.

## Перечень публикаций, содержащих результаты работы

1. Geints Yu.E., Zemlyanov A.A. Near- and mid-IR ultrashort laser pulse filamentation in a molecular atmosphere: a comparative analysis // *Appl. Opt.* 2017. Vol. 56. N 5. pp. 1397–1403. Импакт-фактор журнала SJR 2017 = 0.72.
2. Geints Yu.E., Zemlyanov A.A. Ring-Gaussian laser pulse filamentation in a self-induced diffraction waveguide // *Journal of Optics.* 2017. Vol. 19, 105502 (10 pp.) <https://doi:10.1088/2040-8986/aa8028> ). Импакт-фактор журнала SJR 2017 = 0.84.
3. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А. Закономерности фемтосекундной филаментации при суперпозиции гауссовского и кольцевого лазерных пучков // *Квантовая электроника.* 2017. Т.47, № 8. С. 722–729. Импакт-фактор журнала SJR 2017 = 0.5.
4. Ю.Э.Гейнц, А.А.Землянов, О.В.Минина. Дифракционно-лучевая оптика филаментации: I. Формализм дифракционных лучей и световых трубок // *Оптика атмосферы и океана.* 2018. Т. 31. №5. С. 364-371. <https://DOI:10.15372/AOO20180505> . Импакт-фактор журнала SJR 2017 = 0.39.
5. Ю.Э.Гейнц, А.А.Землянов, О.В.Минина. Дифракционно-лучевая оптика филаментации: II. Дифракционно-лучевая картина филаментации лазерного импульса // *Оптика атмосферы и океана.* 2018. Т. 31. № 7. С. 515-522. Импакт-фактор журнала SJR 2017 = 0.39.
6. Yu.E. Geints, A.A. Zemlyanov. Diffraction-ray optics of laser-pulse filamentation // *Phys. Rev. A.* 2018. V.98. № 023846. P.023846-1 – 023846-12. <https://DOI:10.1103/PHYSREVA.98.023846> . Импакт-фактор журнала SJR 2017 = 1.29.
7. D.V. Apeksimov, Yu.E. Geints, A.A. Zemlynov, A.M. Kabanov, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov, G.G. Matvienko. Controlling TW-laser pulse long-range filamentation in air by a deformable mirror // *Applied Optics.* 2018. V.57. №34. 10 p. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.99.099999> . Импакт-фактор журнала SJR 2017 = 0.72.