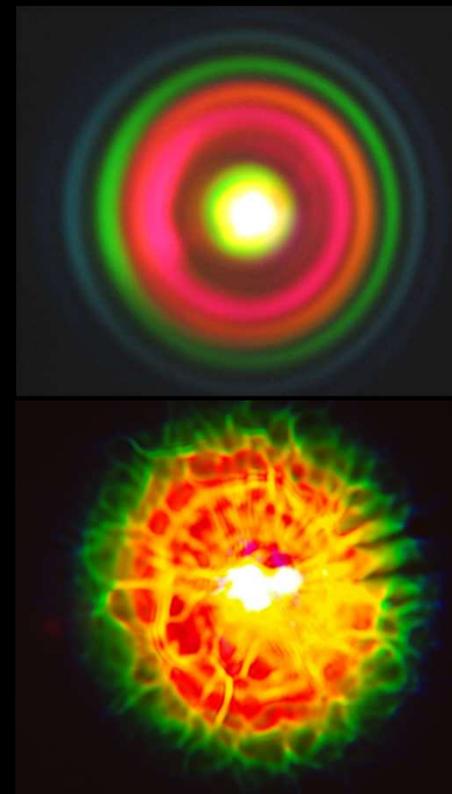




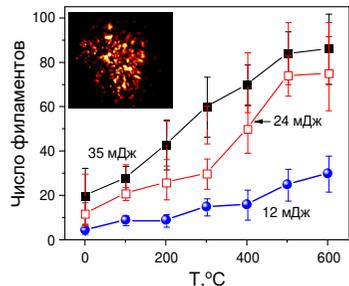
Повышение эффективности нелинейного взаимодействия мощного фемтосекундного лазерного излучения с аэрозолем путем создания пространственно-локализованного турбулентного слоя



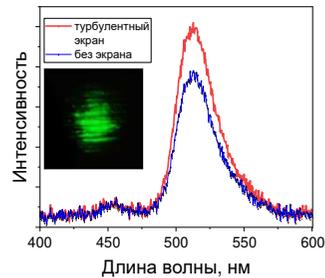
Авторы: Д.В. Апексимов, П.А. Бабушкин, А.Д. Булыгин, Ю.Э. Гейнц, А.А. Землянов, А.М. Кабанов
В.К. Ошлаков, А.В. Петров, Е.Е. Хорошаева

Повышение эффективности нелинейного взаимодействия мощного фемтосекундного лазерного излучения с аэрозолем с помощью создания пространственно-локализованного турбулентного слоя

Д.В. Апексимов, П.А. Бабушкин, А.Д. Булыгин, Ю.Э. Гейнц, А.А. Землянов, А.М. Кабанов, В.К. Ошлаков, А.В. Петров, Е.Е. Хорошаева



Рост числа лазерных филаментов при увеличении температуры нагревателя и энергии фемтосекундного импульса.



Повышение интенсивности флуоресценции жидкого аэрозоля при модуляции лазерного пучка турбулентным слоем воздуха.

Атмосферная турбулентность кардинально изменяет условия нелинейного распространения мощного фемтосекундного лазерного импульса и может вызвать его хаотичную филаментацию и повышенную расходимость, что снижает потенциал использования ультракороткого излучения для задач атмосферной нелинейной оптики. Впервые в мире экспериментально и теоретически показано, что процессом множественной филаментации можно управлять с помощью сформированного в начале оптического пути тонкого слоя искусственной воздушной турбулентности. С усилением турбулентности такого слоя происходит многократное увеличение числа высокоинтенсивных областей в лазерном пучке, обладающих малой расходимостью, что способствует более эффективному нелинейному взаимодействию фемтосекундного лазерного излучения с флуоресцирующим аэрозолем.

1. D.V. Apeksimov, A.D. Bulygin, Y.E. Geints, A.M. Kabanov, E.E. Khoroshaeva, A.V. Petrov, V.K. Oshlakov Statistical parameters of femtosecond laser pulse post-filament propagation on 65m air path with localized optical turbulence // J. Opt. Soc. Am. B. 2022. V.39, No.12. P.3237-3246 B DOI: 10.1364/JOSAB.473298. IF: 2,058
2. Apeksimov, Dmitry V.; Geints, Yury E.; Oshlakov, Victor K.; Petrov, Aleksey V. Experimental demonstration of dyed water aerosol fluorescence stimulated by femtosecond laser // Applied Optics. 2023. 62(24) . P.6401-6406. DOI: 10.1364/AO.496542. DOI: 10.1364/JOSAB.495239. IF: 1,905
3. A. Bulygin and Y. Geints, "Toward high-speed effective numerical simulation of multiple filamentation of high-power femtosecond laser radiation in a transparent medium // J. Opt. Soc. Am. B . 2023. 40(9), P.2339-2348. IF: 2,058
4. Апексимов Д.В., Бабушкин П.А., Землянов А.А., Кабанов А.М., Кочетов Д.И., Ошлаков В.К., Петров А.В., Хорошаева Е.Е. Влияние турбулентности на формирование интенсивных световых каналов при распространении интенсивных фемтосекундных лазерных импульсов на 100 метровой воздушной трассе // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т.36. №10. С. 811-817, IF: 0,473

Краткая формулировка

Атмосферная **турбулентность** кардинально изменяет условия нелинейного распространения мощного фемтосекундного лазерного импульса и может вызвать его хаотичную филаментацию и повышенную расходимость, что **снижает потенциал** использования ультракороткого излучения для задач атмосферной нелинейной оптики.

Впервые (в мире) экспериментально и теоретически показано, что процессом множественной филаментации можно управлять с помощью сформированного в начале оптического пути тонкого слоя искусственной воздушной турбулентности.

С усилением **турбулентности** такого слоя происходит многократное увеличение числа высокоинтенсивных областей в лазерном пучке, обладающих малой расходимостью, что способствует **более эффективному** нелинейному взаимодействию фемтосекундного лазерного излучения с целевой средой (флуоресцирующим аэрозолем).

Актуальность и практическая Значимость

Актуальная проблема атмосферной фемтосекундной (нелинейной) оптики

Контроль и манипулирование
лазерной филаментацией в атмосфере

Цель исследований

Получение **заданной** конфигурации лазерных филаментов в **заданном** участке оптической трассы



сплошные объекты



компактный пучок филаментов



дисперсная среда (аэрозоль)



распределенная матрица филаментов

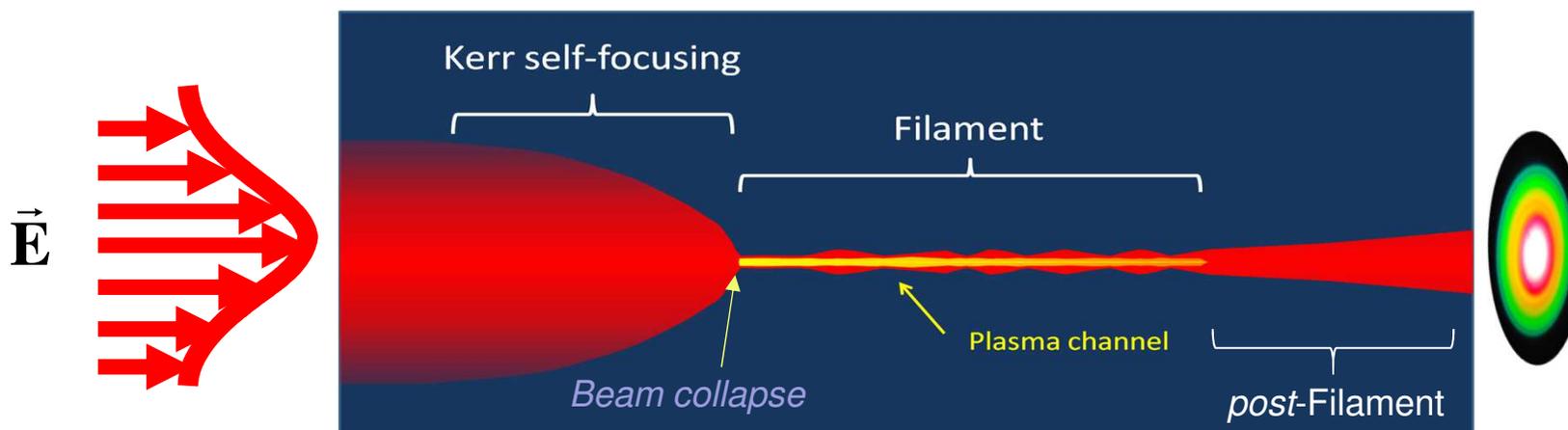
ЛАЗЕРНАЯ ФИЛАМЕНТАЦИЯ – ЧТО ЭТО?

Самофокусировка

За счет эффекта Керра оптическая среда (воздух) может «уплотняться» под действием оптического излучения и, подобно обычной выпуклой линзе, начинает **фокусировать** световую волну по мере ее распространения. -- Г. А. Аскарьян (1961) , В.И. Таланов (1964)

Филаментация

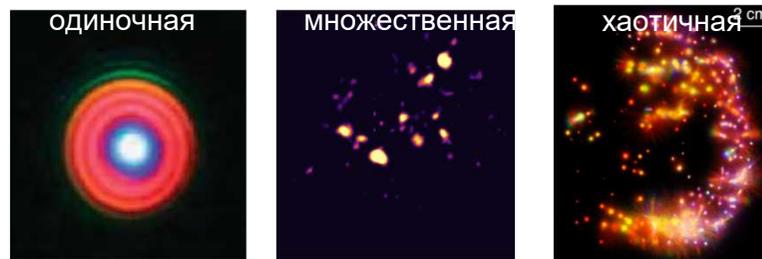
Это специфический режим распространения мощных лазерных импульсов в средах с фокусирующей оптической нелинейностью. Причина – **самофокусировка**. -- G.A. Mourou (1994)



Порог самофокусировки пучка:

$\lambda = 0.8 \text{ мкм}$
Воздух : 5 ГВт
Вода : 5 МВт

$P \gg$



Способы Манипулирования Филаментами

- **Пространственная фокусировка** (расходимость)
- **Временная фокусировка** (чирпирование)
- **Изменение энергетика** (нелинейная фокусировка)
- ✓ ➤ **Структурирование излучения** (профиль, сегменты)

Задачи:

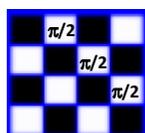


- Перемещение области филаментации
- Изменение длины филаментов
- ✓ – **Изменение числа и взаимной конфигурации филаментов**

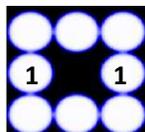
Манипулирование через Структурирование

Больше фрагментов → больше одиночных филаментов

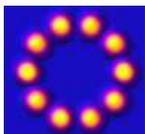
Методики:



○ Модуляция фазы (*SLM, гибкое зеркало*)

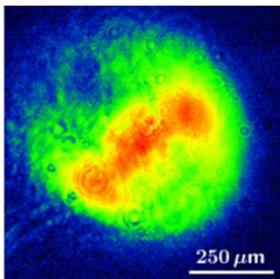
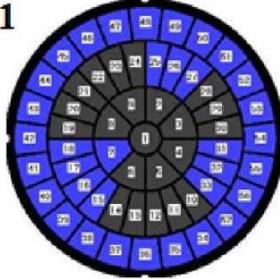
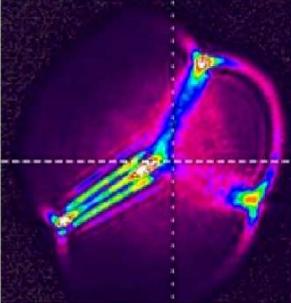
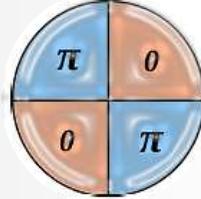
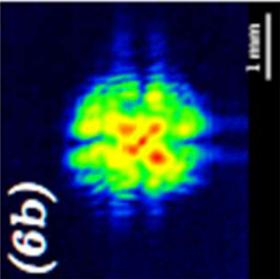
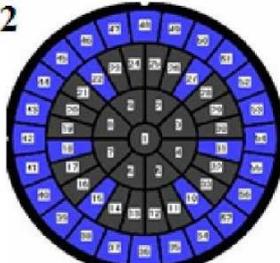
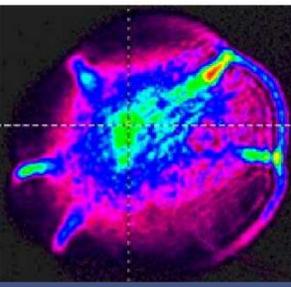
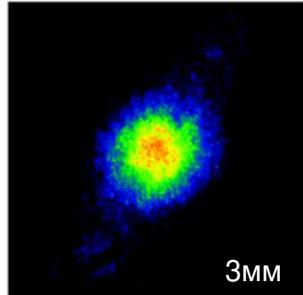
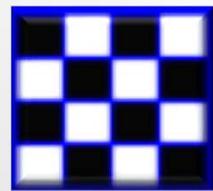
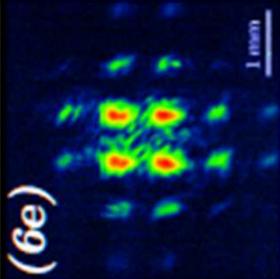
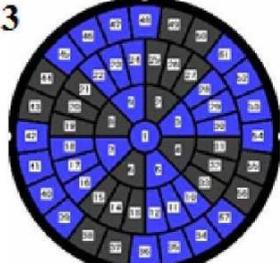
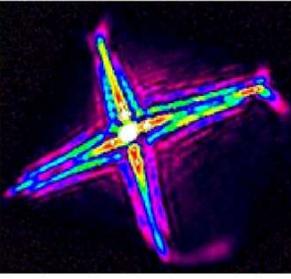
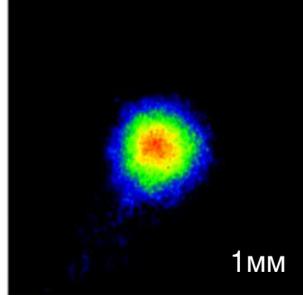


○ Модуляция амплитуды (*сетчатые маски*)



○ Комбинирование апертур (*суперпозиция*)

Структурированная Филаментация

Фазовые маски	Гибкое зеркало		Металлические сетки
<p>Нет маски</p>  <p>250 μm</p>	<p>1</p>  		
<p>π-маска</p>   <p>(6b)</p> <p>1 mm</p>	<p>2</p>  		 <p>3mm</p>
<p>Решетка Дамманна</p>   <p>(6e)</p> <p>1 mm</p>	<p>3</p>  		 <p>1mm</p>

Достоинства

Недостатки

Относительная простота применения

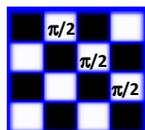
Низкая лучевая стойкость (не подходят для ТВт-импульсов)

3-30mJ, 50fs @800nm

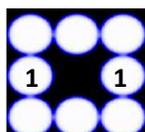
Манипулирование через Структурирование

Больше фрагментов → больше одиночных филаментов

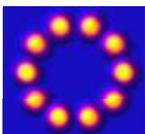
Методики:



○ Модуляция фазы (*SLM, гибкое зеркало*)



○ Модуляция амплитуды (*сетчатые маски*)



○ Комбинированные пучки (*суперпозиция*)



○ Турбулентный слой (*фазовый экран*)

Локализованный турбулентный слой

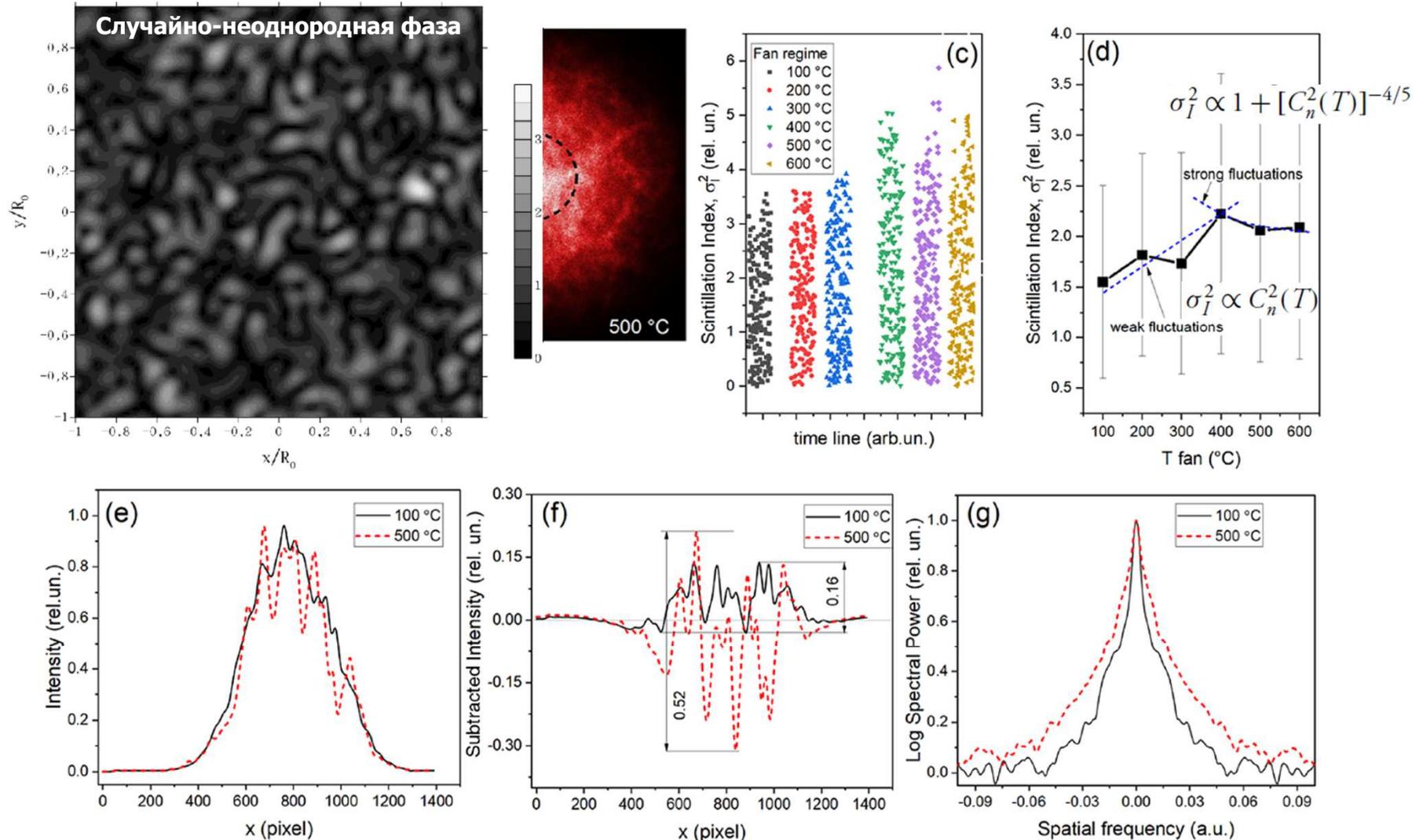
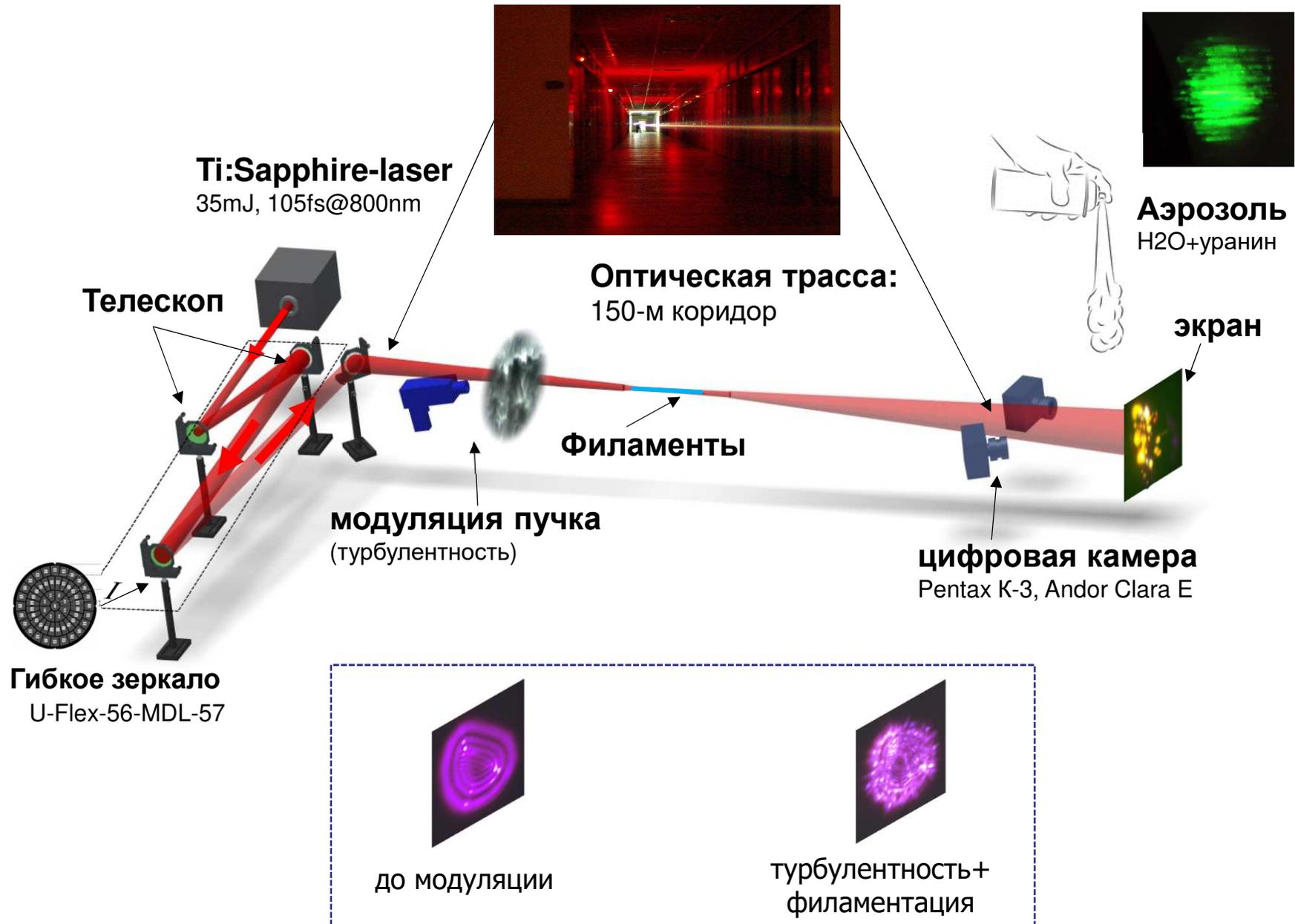
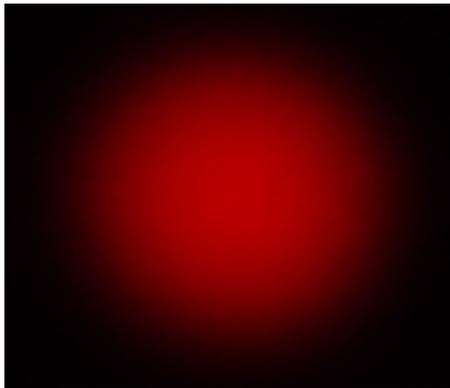


Fig. 2. Turbulence screen optical characterization. (a), (b) Transverse profile of a probe He–Ne laser passing the turbulence layer at two fan temperature regimes T . (c) Scintillation index time series and (d) mean values versus fan temperature. (e), (f) Intensity 1D distributions at the beam center [shown by dashed circle in (b)], (e) before and (f) after initial Gaussian profile subtraction. (g) Beam power spectrum.

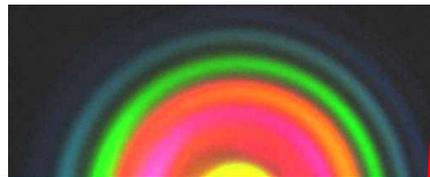
Филаментации



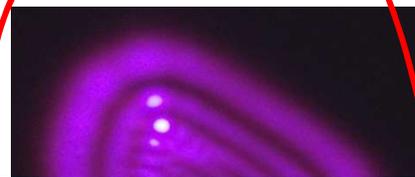
Гауссовский пучок
(линейный режим)



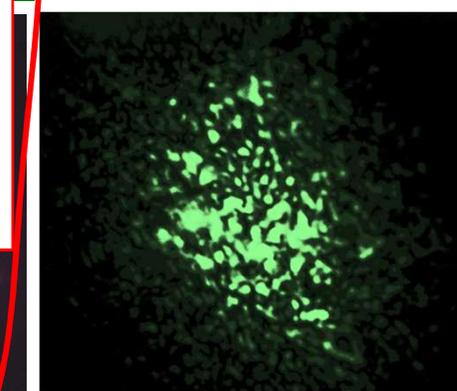
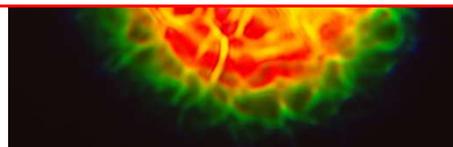
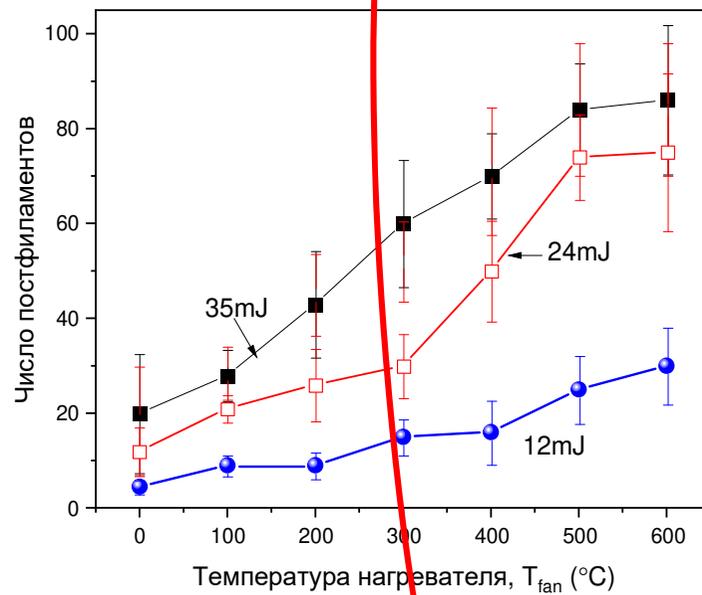
Гауссовский пучок
(филамент)



Структурированный пучок

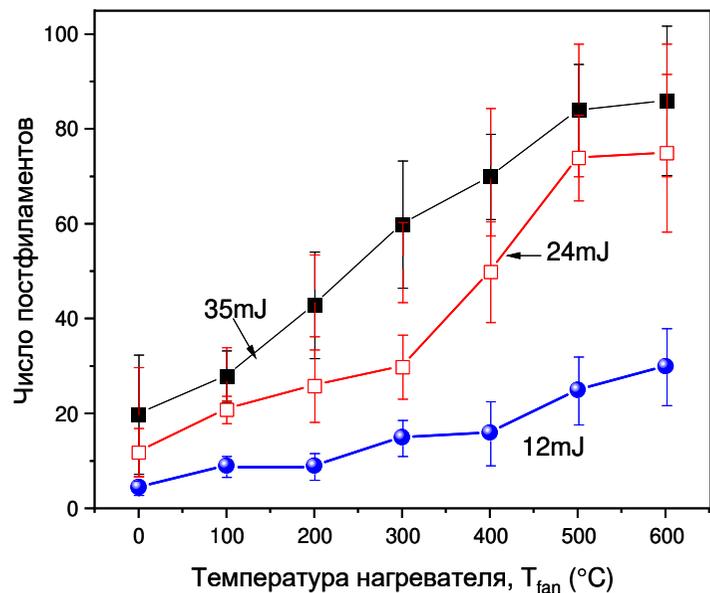


Свечение аэрозоля

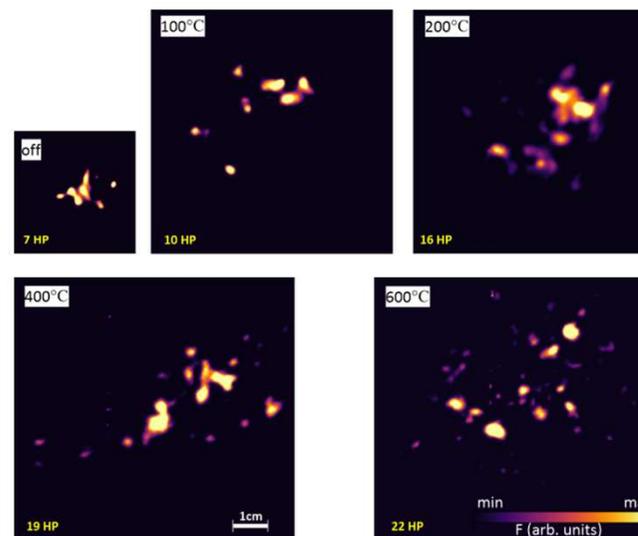


Постфиламенты
(«горячие точки»)

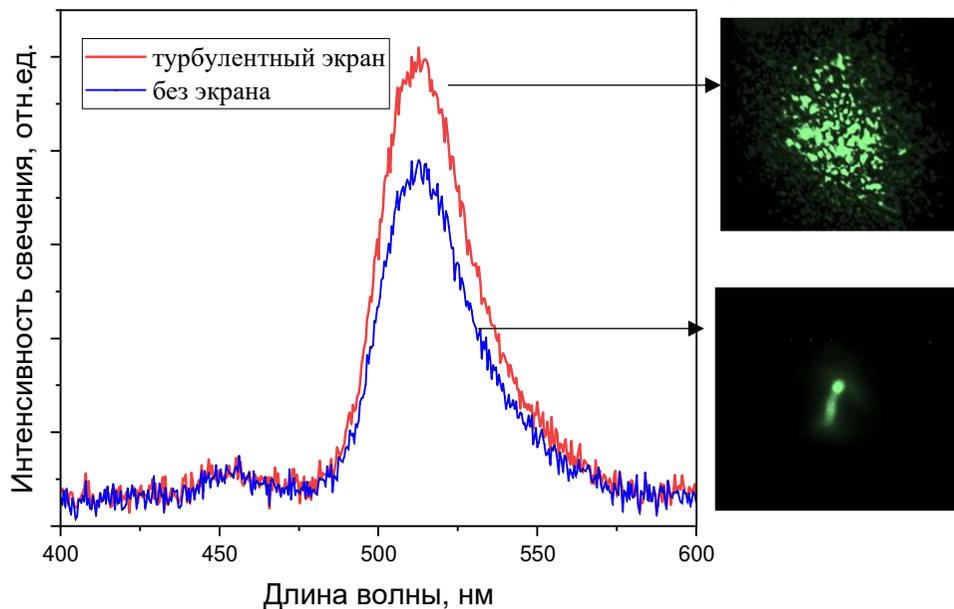
Число «горячих точек»



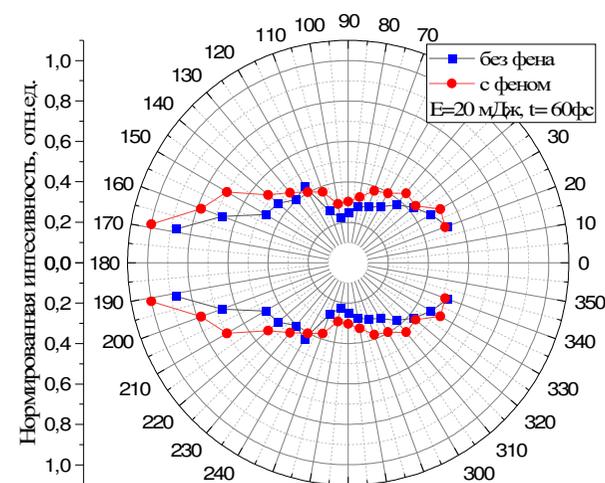
Обработка профилей пучка



Интенсивность свечения частиц



Направленность свечения частиц



Публикации

1. D.V. Apeksimov, A.D. Bulygin, Y.E. Geints, A.M. Kabanov, E.E. Khoroshaeva, A.V. Petrov, V.K. Oshlakov Statistical parameters of femtosecond laser pulse post-filament propagation on 65m air path with localized optical turbulence // Journal of the Optical Society of America (**JOSA**) B. V.39, No.12, 3237-3246 (**2022**) DOI: 10.1364/JOSAB.473298
Q2
2. Apeksimov, Dmitry V.; Geints, Yury E.; Oshlakov, Victor K.; Petrov, Aleksey V. Experimental demonstration of dyed water aerosol fluorescence stimulated by femtosecond laser // **Applied Optics** V. 62(24), 6401-6406 (**2023**).
Q2
3. A. Bulygin and Y. Geints, "Toward high-speed effective numerical simulation of multiple filamentation of high-power femtosecond laser radiation in a transparent medium," Journal of the Optical Society of America (**JOSA**) B 40, 2339-2348 (**2023**).
Q2
4. Апексимов Д.В., Бабушкин П.А., Землянов А.А., Кабанов А.М., Кочетов Д.И., Ошлаков В.К., Петров А.В., Хорошаева Е.Е. Влияние турбулентности на формирование интенсивных световых каналов при распространении интенсивных фемтосекундных лазерных импульсов на 100 метровой воздушной трассе // **Оптика атмосферы и океана. 2023. Т.36. №10.**



Сибирское отделение Российской академии наук

**СПАСИБО
за ВНИМАНИЕ**



ИНСТИТУТ
ОПТИКИ АТМОСФЕРЫ
им. В.Е. ЗУЕВА СО РАН

ТЕЗИСЫ

• **Турбулентность** воздуха кардинально изменяет условия **филаментации** лазерного импульса и, в ряде случаев, вызывает его усиленную **фрагментацию** и остановку поперечного коллапса лазерного пучка.

новизна

• Сформированный в начале трассы локализованный **турбулентный слой** приводит к многократному **увеличению** количества «**горячих точек**» (постфиламентов) в сечении пучка.

• Структурированный (**мульти-кольцевой**) лазерный **пучок** дает **наибольшее число** «горячих точек» с усилением турбулентности воздушной струи.

значимость

• **Турбулентное структурирование** мощного лазерного пучка приводит к существенному (~ в 1.7 раза) **увеличению интенсивности** нелинейной **флуоресценции** подкрашенных капель воды, помещенных в лазерные постфиламенты.