

Локализованные световые структуры с высокой интенсивностью при множественной филаментации фемтосекундного импульса титан-сапфирового лазера на воздушной трассе

Д.В. Апе́ксимов¹, А.А. Зе́млянов¹, А.Н. Игла́кова¹, А.М. Каба́нов¹,
О.И. Ку́чинская^{1,2}, Г.Г. Матви́енко^{1,2}, В.К. Ошла́ков¹,
А.В. Петро́в¹, Е.Б. Соколо́ва^{1*}

¹*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

²*Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36*

Поступила в редакцию 27.06.2017 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований поперечной структуры лазерного пучка после области множественной филаментации. Кольцевая структура излучения в поперечном сечении пучка формируется вокруг отдельных филаментов внутри этой области, на удалении порядка десятка метров от нее начинает формироваться общая кольцевая структура, окружающая постфиламентационные каналы (ПФК). Показано, что спектры ПФК, колец и пучка существенно отличаются. Уширение спектра колец асимметрично относительно несущей длины волны и направлено в основном в коротковолновую область спектра. Спектр ПФК обладает значительным и более симметричным уширением и охватывает диапазон длин волн 630–1000 нм.

Ключевые слова: лазерное излучение, фемтосекундный импульс, самофокусировка, филаментация, постфиламентационный световой канал, воздух; laser radiation, femtosecond pulse, self-focusing, filamentation, postfilament light channels, air.

Введение

Распространение лазерного излучения ультракороткой длительности при достижении критических значений мощности импульса $P_{кр}$ сопровождается его самофокусировкой и филаментацией [1, 2]. При этом происходят значительные изменения энергетических, пространственных, спектральных и угловых характеристик лазерного излучения. Энергия излучения локализуется в узких световых нитях, его спектральный состав существенно обогащается. Данные свойства имеют приоритетное значение для задач атмосферной оптики – лазерного зондирования атмосферы и транспортировки через атмосферу локализованной световой энергии. Для их решения необходимо формировать область фи-

ламентации на значительных расстояниях от источника, причем для атмосферной оптики наиболее привлекательной является множественная филаментация пучка.

При множественной филаментации мощных фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе возникают локализованные плазменные каналы. После завершения плазмообразования эти каналы с высокой интенсивностью трансформируются в узкие слабо расходящиеся световые пучки. Как показывают эксперименты [3], такие неионизированные световые каналы наблюдались в атмосфере на дистанциях, превышающих 1 км. Использование значительно более протяженных, чем область филаментации, световых каналов требует тщательного исследования их энергетических, спектральных и пространственных свойств, а также физических механизмов их формирования.

В [4–7] было показано, что угловая расходимость постфиламентационных каналов (ПФК) при филаментации коллимированных пучков составляет всего десятки микро радиан, при этом спектр излучения ПФК перекрывает область 400–1100 нм. Для первоначально жестко фокусированных пучков угловая расходимость ПФК больше, чем для коллими-

* Дмитрий Владимирович Апе́ксимов (apeximov@iao.ru); Александр Анатольевич Зе́млянов (zaa@iao.ru); Анастасия Николаевна Игла́кова (ian@iao.ru); Андрей Михайлович Каба́нов (kam@iao.ru); Олеся Ивановна Ку́чинская (olesyatsu14@mail.ru); Геннадий Григорьевич Матви́енко (mgg@iao.ru); Виктор Константинович Ошла́ков (ovk@iao.ru); Алексей Вадимович Петро́в (awp@iao.ru); Екатерина Борисовна Соколо́ва (mastapes@mail.ru).

рованных пучков и составляет сотни микрорадиан, причем с увеличением начальной мощности импульса расходимость сначала убывает, а затем при $P \sim 100P_{кр}$ (для воздуха и используемой длины волны ($\lambda = 800$ нм) лазерного источника $P_{кр} = 3,2$ ГВт) входит в режим насыщения, соответствующий значению ~ 500 мкрад. Измеренные в [4, 7] значения средней интенсивности в ПФК составляют $10^{11} - 10^{12}$ Вт/см².

В работах [6–11] для сфокусированных [6–9] и коллимированных [10, 11] пучков обнаружена окружающая ПФК кольцевая структура излучения на несущей длине волны. Причем в [11] зафиксированы концентрические кольца, окружающие не отдельные ПФК, а весь пакет ПФК при множественной филаментации пучка. Формирование данной кольцевой структуры в [6] связывают с дифракцией излучения импульса на плазменных каналах, образованных при филаментации. В [9] природу появления колец объясняют неоднородностями фазы и интенсивности в поперечном сечении пучка, возникающими под влиянием керровской нелинейности. В [11] предложена модель, в которой кольцевая структура вокруг ПФК является результатом интерференции волны, дефокусированной плазмой, и волны периферии пучка.

Таким образом, проведенные исследования постфиламентационных каналов [4–11] показали, что их характерные свойства — широкий спектральный состав и высокая интенсивность, сохраняющаяся на больших дистанциях за счет малой пространственной расходимости. При этом вопросы

формирования концентрической кольцевой структуры, окружающей отдельные филаменты и пакет филаментов при множественной филаментации пучка, а также спектрального состава различных компонент, составляющих постфиламентационную структуру лазерного пучка, остаются не решенными до конца.

Настоящая работа представляет результаты экспериментальных исследований эволюции пространственной и спектральной структур пучка при его филаментации. Схема эксперимента показана на рис. 1. Регистрация мелкомасштабной структуры пучка проводилась камерой 9 на экране 13 с экспозицией 100 мс, что позволяло наблюдать результат освещения экрана одним импульсом. Подвижный оптический стол перемещался вдоль трассы распространения излучения, что обеспечивало регистрацию эволюции пучка при его самофокусировке и филаментации. Дистанция до начала области филаментации, при начальной энергии излучения 30 мДж, составляла ~ 30 м от источника, до конца трассы, т.е. 110 м от источника. Измерения исходного профиля пучка (рис. 1, а) проводились в начале трассы после поворотного зеркала 5; спектры ПФК и колец измерялись спектрометром 16. С помощью диафрагмы 12, размещенной перед экраном 13, на котором регистрировалось изображение структуры пучка (см., например, рис. 1, б), выделялась только исследуемая компонента (ПФК, кольца, пучок), затем экран 13 убирался и излучение направлялось в интегрирующую сферу 14. Время накопления в спектрометре 16 составляло 100 мс.

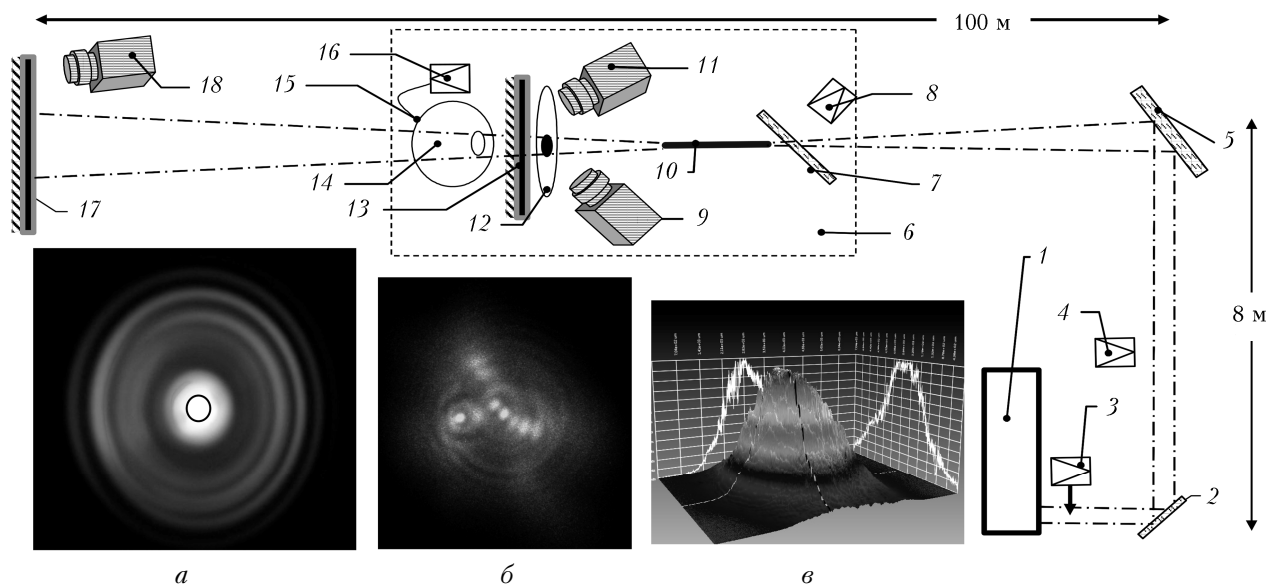


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — Ti:Sapphire-лазерный комплекс, $t = 50$ фс, энергия импульса $E = 30$ мДж, частота следования импульсов 10 Гц, начальный диаметр пучка $d_0 = 2,5$ см; 2, 5 — поворотные зеркала; 3 — измеритель энергии импульса OPHIR-II; 4 — автокоррелятор; 6 — передвижной оптический стол Thorlabs; 7 — оптический клин OptoSigma WSSQ-50C10-20-3; 8 — измеритель профиля пучка LBP2-HR-VIS; 9 — CCD-камера ANDOR-Clara E; 10 — область филаментации; 11 — фотокамера SONY DSC-F828; 12 — диафрагма; 13 — экран; 14 — интегрирующая сфера Newport 819C-SF-6; 15 — световод; 16 — спектрометр Maya2000Pro; 17 — неподвижный экран в конце трассы; 18 — фотокамера Pentax K-3 (25 МП) с макрообъективом Pentax100MacroWR. Полихромные кольца конической эмиссии, регистрируемые на экране 17 (а) (светлый круг в черной окружности — область, в которой регистрируется изображение (б)); профиль пучка на экране 13 (б); начальный профиль лазерного пучка (измеритель 8) (в)

Пример трансформации регистрируемых изображений поперечной структуры распределения плотности энергии лазерного пучка на расстоянии 110 м от источника для различных энергий лазерного импульса приведен на рис. 2. Протяженность области множественной филаментации (ОМФ), определяемая по ожогам на светочувствительной бумаге, составляла 15–20 м. На снимках видно, что центральная часть пучка содержит яркие точки — постфиламентационные каналы, окруженные системой менее ярких концентрических колец, интенсивность которых убывает от центра к периферии пучка. Следует отметить, что наличие и концентричность данных колец не зависят от количества и конфигурации филаментов в поперечном сечении ОМФ и ПФК.

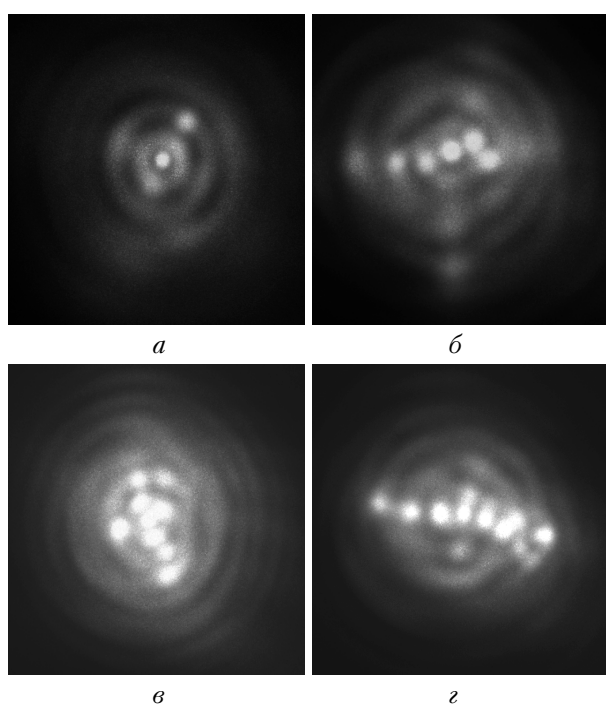


Рис. 2. Поперечная структура лазерного пучка на расстоянии 110 м от источника для лазерного импульса с $E = 20$ (а); 23 (б); 27 (в); 30 мДж (з)

На рис. 3, а представлена огибающая плотности энергии отдельного ПФК, которая хорошо аппроксимируется гауссовым распределением. Данный факт согласуется с результатами, полученными нами в [12], когда в пучок, содержащий ПФК, помещался параллелепипед из стекла К8 и область филаментации формировалась внутри стекла в виде полого конуса, при этом средняя интенсивность импульса составляла 10^{11} – 10^{12} Вт/см², как было показано в [10]. Поперечный профиль плотности энергии ПФК совместно с кольцами (рис. 3, б) соответствует распределению плотности энергии в бesselь-гауссовом пучке. Данное обстоятельство, возможно, является причиной anomalно низкой ($\sim 10^{-5}$ рад [10]) расходимости ПФК (центральная часть полученного распределения). Яркость колец при удалении от оси ПФК уменьшается примерно

вдвое, что хорошо согласуется с соотношением яркости интерференционных максимумов различного порядка при дифракции света на тонком препятствии [13].

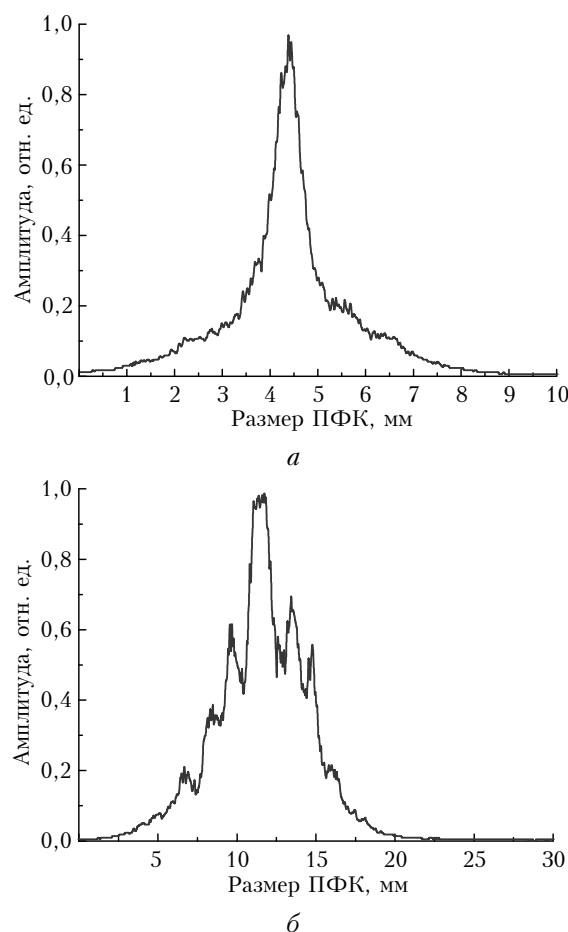


Рис. 3. Огибающая плотности энергии отдельного ПФК (а) и ПФК, окруженного системой колец (б), восстановленная фотометрированием изображения рис. 2, а с использованием программно-вычислительного комплекса для анализа поперечных профилей лазерных пучков [14]

Далее рассмотрим результаты по возникновению и эволюции кольцевой структуры на несущей длине волны. Снимки зарегистрированной на различных расстояниях от источника структуры пучка на экране 13 представлены на рис. 4. В начале области филаментации регистрируются только яркие точки, соответствующие каналам с повышенной плотностью энергии, окружающим филаменты (рис. 4, а). Во второй половине области филаментации вокруг них появляются кольца, которые к концу области окружают каждый филамент (рис. 4, б, в). После области филаментации (рис. 4, з) эти кольца трансформируются в общую кольцевую структуру. Наблюдаемая картина соответствует интерференции волн от различных близко расположенных источников, которыми в данном случае являются отдельные филаменты. Следует также отметить, что поперечный размер регистрируемых ярких точек внутри области филаментации (\sim мм) сравним с диа-

метром ПФК, т.е. в десятки раз превышает диаметр филамента. Это означает, что высокоинтенсивный постфиламентационный канал формируется в пучке не после прекращения области филаментации, а в самом ее начале и окружает каждый филамент.

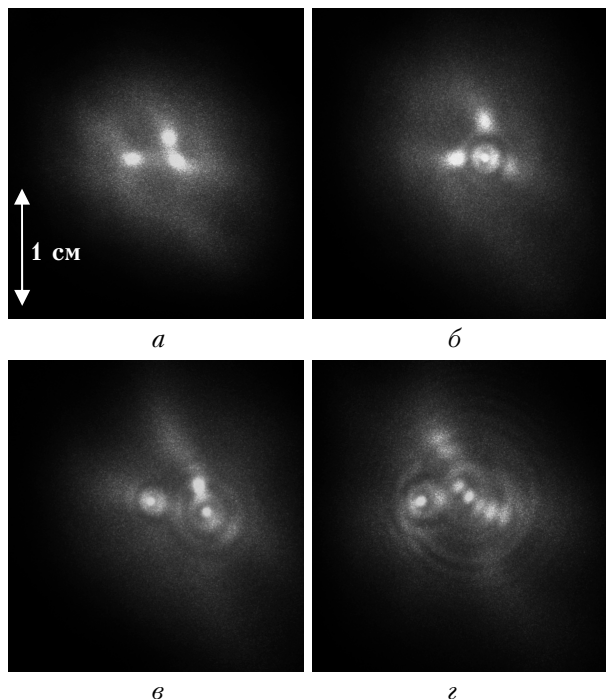


Рис. 4. Поперечная структура лазерного пучка на удалении 30 (а); 40 (б); 48 (в); 57 м (г) от источника. Начало ОМФ – 30 м, конец ОМФ – 45 м от источника

Для уточнения физической причины формирования колец обратимся к результатам спектральных измерений различных компонент поперечной структуры пучка после его филаментации. На рис. 5 приведены измеренные спектры исходного импульса, ПФК, кольца вокруг пакета ПФК и спектра пучка в целом (за исключением колец конической эмиссии) на расстоянии 14 м от ОМФ. Видно, что спектры существенно отличаются. Спектр ПФК уширен в длинноволновую и коротковолновую области относительно несущей длины волны, охватывает диапазон 630–1000 нм и содержит квазипериодические пики. Такое поведение спектра указывает на его формирование за счет самонаведенной модуляции фазы волны излучения в керровской среде. Спектр колец, окружающих отдельные ПФК и пакет ПФК, уширен несимметрично, он содержит только коротковолновую компоненту. Подобный характер уширения спектра (так называемый blue-shift (голубое смещение)) указывает либо на влияние плазменной нелинейности [15], либо на то, что кольцевая структура формируется только «хвостом» импульса, так как за счет зависимости групповой скорости от интенсивности задний фронт становится более крутым [16]. Спектр пучка как целого (вне колец и ПФК) несущественно отличается от спектра исходного пучка.

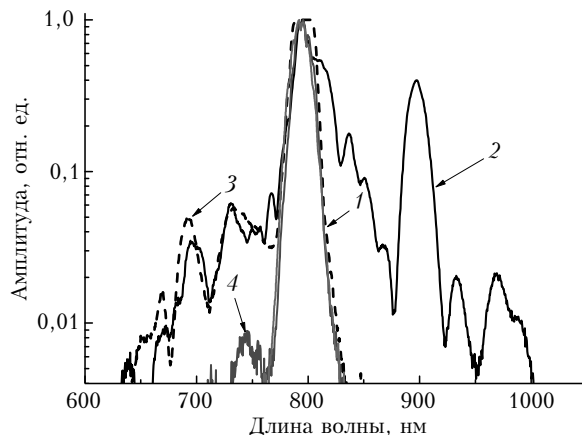


Рис. 5. Спектральные характеристики элементов лазерного пучка на расстоянии 14 м от ОМФ, с энергией импульса 30 мДж: 1 – спектр исходного импульса; 2 – спектр ПФК; 3 – спектр кольца; 4 – спектр пучка вне ПФК и колец

Измерения спектров ПФК и колец, проведенные через диафрагму одинакового диаметра, показали, что плотность энергии в ближнем к ПФК кольце примерно вдвое меньше, чем в самом ПФК. Данный результат хорошо согласуется со значениями, представленными на рис. 3, б. Площадь ПФК в точке измерений составляла ~0,1 площади кольца, т.е. энергия излучения в ближнем кольце приблизительно в 5 раз больше, чем в канале. При этом с удалением от ОМФ плотность энергии в кольцах существенно уменьшается. В ПФК за счет их малой пространственной расходимости плотность энергии сохраняется на больших дистанциях.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований пространственной и спектральной трансформации излучения после области филаментации на контролируемой трассе для коллимированных (самофокусированных) пучков показали, что спектры ПФК, колец и пучка отличаются. Спектр ПФК обладает значительным и симметричным спектральным уширением и охватывает диапазон 630–1000 нм. Уширение спектра колец асимметрично и направлено в основном в коротковолновую область спектра. Данные уширения не изменяются при удалении от области множественной филаментации. Кольцевые структуры в поперечном сечении пучка формируются вокруг отдельных филаментов внутри области множественной филаментации, на удалении же в десятки метров от нее они трансформируются в общую кольцевую структуру, окружающую постфиламентационные каналы.

Работа выполнена при поддержке РНФ (соглашение № 16-17-10128).

1. *Self-focusing: Past and present. Fundamentals and prospects* // Topics in Applied Physics / Eds. R.W. Boyd et al. Berlin: Springer, 2009. V. 114. P. 3–19.
2. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г. Нелинейная фемтосекундная оптика атмосферы / под общей ред. А.А. Землянова. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2010. 212 с.

3. *Mehain G., Couairon A., Andre Y.-B., D'Amico C., Franco M., Prade B., Tzortzakis S., Mysyrowicz A., Sauerbrey R.* Long-range self-channeling of infrared laser pulses in air: a new propagation regime without ionization // *Appl. Phys. B.* 2004. V. 79. P. 379–382.
4. *Hui Gao, Weiwei Liu, See Leang Chin.* Post-filamentation multiple light channel formation in air // *Laser Phys.* 2014. V. 24. 055301 (7 p.). DOI: 10.1088/1054-660X/24/5/055301.
5. *Daigle J.-F., Kosareva O., Panov N., Wang T.-J., Hosseini S., Yuan S., Roy G., Chin S.L.* Formation and evolution of intense, post-filamentation, ionization-free low divergence beams // *Opt. Commun.* 2011. V. 284. P. 3601–3606.
6. *Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Степанов А.Н.* Самовоздействие остроконусированного фемтосекундного лазерного излучения в воздухе в режиме одиночной и множественной филаментации. Лабораторные и численные эксперименты // *Оптика атмосфер. и океана.* 2009. Т. 22, № 2. С. 119–125; *Geints Yu.E., Zemlyanov A.A., Kabanov A.M., Matvienko G.G., Stepanov A.N.* Self-action of tightly focused femtosecond laser radiation in air in a filamentation regime: Laboratory and numerical experiments // *Atmos. Ocean. Opt.* 2009. V. 22, N 2. P. 150–157.
7. *Апексимов Д.В., Землянов А.А., Кабанов А.М., Степанов А.Н.* Постфиламентационные световые каналы в воздухе // *Оптика атмосфер. и океана.* 2017. Т. 30, № 4. С. 291–295; *Apeksimov D.V., Zemlyanov A.A., Kabanov A.M., Stepanov A.N.* Post-filamentation light channels in air // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 5. P. 451–455.
8. *Иванов Н.Г., Лосев В.Ф.* Влияние керровской нелинейности на филаментацию фемтосекундного импульса излучения в воздухе // *Оптика атмосфер. и океана.* 2017. Т. 30, № 3. С. 198–203; *Ivanov N.G., Losev V.F.* Kerr nonlinearity effect on femtosecond pulse radiation filamentation in air // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 4. P. 331–336.
9. *Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Ионин А.А., Мокроусова Д.В., Селезнев Л.В., Сунчугашева Е.С.* Исследования характеристик интенсивных световых каналов на постфиламентационной стадии эволюции ультракороткого лазерного излучения // *Оптика атмосфер. и океана.* 2016. Т. 29, № 12. С. 1023–1028; *Geints Yu.E., Zemlyanov A.A., Ionin A.A., Mokrousova D.V., Seleznev L.V., Sunchugasheva E.S.* Parameters of intense light channels during the postfilamentation stage of ultrashort laser radiation evolution // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 3. P. 217–221.
10. *Apeksimov D.V., Zemlyanov A.A., Iglakova A.N., Kabanov A.M., Kuchinskaya O.I., Matvienko G.G., Oshlakov V.K., Petrov A.V.* Postfilamentation channels of terawatt pulses Ti:sapphire-laser in distribution on 150-meter track // *Proc. SPIE.* 2016. V. 10035. CID: 1003 2M. [10035–251].
11. *Chin S.L., Petit S., Liu W., Iwasaki A., Nadeu M.-C., Kandidov V.P., Kosareva O.G., Andrianov K.Yu.* Interference of transverse rings in multifilamentation of powerful femtosecond laser pulses in air // *Opt. Commun.* 2002. V. 210. P. 329.
12. *Апексимов Д.В., Голик С.С., Землянов А.А., Иглакова А.Н., Кабанов А.М., Кучинская О.И., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Петров А.В., Соколова Е.Б.* Множественная филаментация коллимированного лазерного излучения в воде и стекле // *Оптика атмосфер. и океана.* 2015. Т. 28, № 11. С. 972–977; *Apeksimov D.V., Golik S.S., Zemlyanov A.A., Iglakova A.N., Kabanov A.M., Kuchinskaya O.I., Matvienko G.G., Oshlakov V.K., Petrov A.V., Sokolova E.B.* Multiple filamentation of collimated laser radiation in water and glass // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 2. P. 135–140.
13. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. Изд. 2-е / пер. с англ. М.: Наука, 1973. 713 с.
14. *Гейнц Ю.Э., Апексимов Д.В., Афонасенко А.В.* Программно-вычислительный комплекс для анализа поперечных профилей лазерных пучков (профилометр) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014616871 от 07.07.2014. Правообладатель: ИОА СО РАН (RU).
15. *Akozbeq N., Scalora M., Bowden C., Chin S.L.* White-light continuum generation and filamentation during the propagation of ultra-short laser pulses in air // *Opt. Commun.* 2001. V. 191. P. 353–362.
16. *Ахманов С.А., Сухоруков А.П., Хохлов Р.В.* Самофокусировка и дифракция света в нелинейной среде // *Успехи физ. наук.* 1967. Т. 93. С. 19–70.

D.V. Apeksimov, A.A. Zemlyanov, A.N. Iglakova, A.M. Kabanov, O.I. Kuchinskaya, G.G. Matvienko, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov, E.B. Sokolova. **Localized light structures with high intensity at multiple filamentation of femtosecond pulses of a Ti:Sapphire laser along an air path.**

The results of experimental studies of the formation of a transverse structure of a laser beam after multiple filamentation are presented. Ring structures of radiation are formed around individual filaments in the transverse beam cross section inside the region of multiple filamentation, and at a dozen meters from it a common ring structure begins to form surrounding postfilamentation light channels (PFC). It is shown that the spectra of the PFC, rings, and beam are significantly different. The ring spectrum broadens asymmetrically relative to the carrier wave length and is mainly concentrated in the short wavelength region. The PFC spectrum broadens more and more symmetrically and covers the range 600–1100 nm.