

## НЕЛИНЕЙНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ

УДК 530.182.551.510.42+535.621.33

# Глобальная самофокусировка и особенности множественной филаментации излучения субтераваттного титан-сапфирового лазера с сантиметровым диаметром выходной апертуры на 150-метровой трассе

Д.В. Аепксимов<sup>1</sup>, А.А. Землянов<sup>1</sup>, А.Н. Иглакова<sup>1</sup>, А.М. Кабанов<sup>1</sup>,  
О.И. Кучинская<sup>1,2</sup>, Г.Г. Матвиенко<sup>1,2</sup>, В.К. Ошлаков<sup>1</sup>, А.В. Петров<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 8.11.2016 г.

Представлены результаты экспериментов по исследованию формирования и распространения постфиламентационных каналов на контролируемой трассе протяженностью 150 м для коллимированных пучков различного диаметра. При множественной филаментации лазерный пучок сжимается в глобальный фокус, после прохождения которого его угловая расходимость существенно превосходит расходимость сформированных при филаментации постфиламентационных каналов. Показано, что интенсивность в постфиламентационных каналах достаточна для формирования множественной филаментации в оптических элементах на дистанциях, значительно превосходящих протяженность области филаментации.

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

### Введение

При распространении мощного фемтосекундно-го лазерного излучения в оптических средах его пучок испытывает самофокусировку и филаментацию [1]. Обобщая результаты работ по указанной проблеме [1–4], можно описать физическую картину явления в воздухе следующим образом. Самофокусировка проявляется в том, что по достижении пиковой мощностью пучка  $P_0$  критического значения  $P_{кр}$  либо весь пучок, либо его отдельные части, где локальная мощность  $P_{лок}$  также больше  $P_{кр}$ , начинают сжиматься по мере распространения излучения, приводя к увеличению интенсивности в областях нелинейных фокусов. В дальнейшем возможны несколько сценариев развития событий в зависимости от типа лазера и начальных размеров пучка. В воздухе для излучения титан-сапфирового лазера  $P_{кр} = 3,2$  ГВт на уровне моря. При миллиметровых радиусах пучков и мощности  $P_0 < 10P_{кр}$  развивается

самофокусировка, которая приводит к одиночной филаментации. Это означает, что по мере самофокусировки в момент времени  $t$ , когда текущая мощность в импульсе  $P(t)$  начинает превосходить  $P_{кр}$ , на дистанции  $z_{лок}^{Фок}(t)$  пучок начинает коллапсировать, т.е. его интенсивность достигает экстремальных значений, приводящих к многофотонной либо туннельной ионизации воздуха. Поглощение в плазме останавливает коллапс. Возникают локальный нелинейный фокус либо волноводная структура, которая может содержать несколько фокусов. По мере распространения импульса вдоль дистанции формируется целая система фокусов и световых волноводных структур, содержащих в себе нелинейные фокусы. В этих областях с течением времени происходит накопление плазмы, т.е. образуются плазменные каналы. После прохождения импульсом дистанции распространения в поперечном направлении наблюдается высвечивание плазменных каналов эмиссионным спектром. Эта светящаяся вытянутая вдоль дистанции область называется филаментом. В продольном направлении благодаря частотной модуляции импульса из-за эффекта Керра и плазменной рефракционной нелинейности формируется широко-спектральное излучение в стоксовой и антистоксовой областях — так называемый суперконтинуум. После окончания филаментации это излучение фиксируется на приемнике как локализованное белое пятно.

\* Дмитрий Владимирович Аепксимов (areximov@iao.ru); Александр Анатольевич Землянов (zaa@iao.ru); Анастасия Николаевна Иглакова (ian@iao.ru); Андрей Михайлович Кабанов (kam@iao.ru); Олеся Ивановна Кучинская (koi@iao.ru); Геннадий Григорьевич Матвиенко (magg@iao.ru); Виктор Константинович Ошлаков (ovk@iao.ru); Алексей Вадимович Петров (rav@iao.ru).

Для одиночной филаментации в зависимости от радиуса пучка характерно формирование так называемого глобального фокуса, т.е. самофокусировки пучка в целом. Это означает, что на некоторой дистанции происходит сосредоточение основной энергии пучка в области с поперечным размером меньше, чем начальный диаметр пучка.

В случае, когда реализуется неравенство  $P_0 \gg P_{кр}$ , возникает множественная филаментация. Из начальных пространственных неоднородностей амплитуды и фазы пучка на волновом фронте происходит формирование локальных световых структур, содержащих в себе плазменные каналы. После окончания филаментации поперечные размеры этих структур фиксируются приемником как совокупность белых пятен. Однако вдали от области филаментации каналы с белым излучением не содержат в себе плазмы. Эти области принято называть постфиламентационными каналами (ПФК) [5].

Вопрос о том, будет ли пучок фокусироваться при множественной филаментации, в экспериментальных работах не изучался. С практической точки зрения важно установить возможность существования глобального фокуса пучка при его множественной филаментации. При этом следует проанализировать зависимость координаты глобального фокуса от начальных параметров излучения: радиуса, пиковой мощности, длительности импульса. Такой анализ необходим для ответа на вопрос об управлении зоной филаментации коллимированного лазерного излучения.

Другая задача, представляющая практический интерес, связана со свойствами области пучка, содержащей упомянутые выше ПФК. Они представляют собой узкие пространственные зоны с повышен-

ной интенсивностью по сравнению с ее средним значением по сечению пучка и угловой расходимостью на порядок меньше расходимости пучка в целом. Сведения об эволюции угловых размеров и спектральном составе данных каналов важны для анализа перспективности их использования в задачах передачи энергии в атмосфере и многочастотного лазерного зондирования ее газовых и аэрозольных компонент. Интересны и чисто физические аспекты проявления закономерностей в поведении локальных световых структур с высокой интенсивностью в условиях множественной филаментации. Это способствует более глубокому пониманию явления множественной филаментации.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование глобальной самофокусировки и особенностей множественной филаментации излучения титан-сапфирового лазера в воздухе. Глобальная самофокусировка и филаментация лазерных импульсов могут быть использованы для зондирования атмосферы, создания протяженных ионизированных каналов, формирования в заданной точке трассы области повышенной интенсивности лазерного излучения [1–3].

## Результаты экспериментов

В данной работе исследования эволюции поперечного профиля пучка проводились для коллимированных пучков различного диаметра сантиметрового масштаба на трассе длиной ~150 м. Схема эксперимента представлена на рис. 1. Методика эксперимента подробно описана в [6].

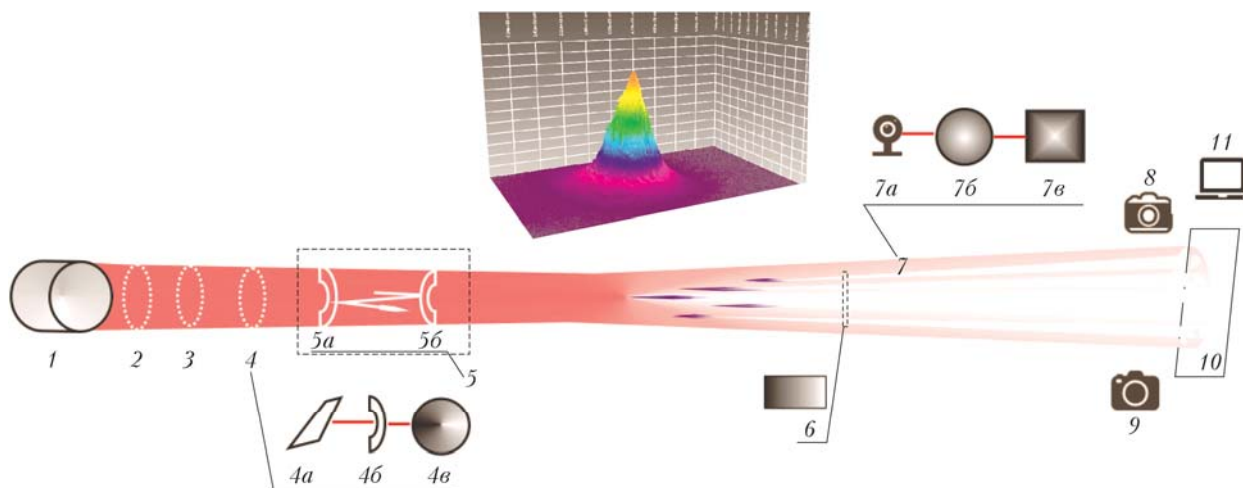


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – Ti:Sapphire-лазерный комплекс: длина волны излучения 800 нм, частота повторения импульсов 10 Гц, диаметр пучка по уровню  $e^{-2}$  2,5 см; 2 – автокоррелятор, длительность импульса 50 фс; 3 – измеритель энергии импульса OPHIR-II, энергия импульса до 30 мДж; 4 – узел измерения профиля пучка: 4а – оптический клин OptoSigma WSSQ-50C10-20-3, 4б – сферическое зеркало с радиусом кривизны 50 см, 4в – измеритель профиля плотности энергии пучка LBP2-HR-VIS с набором светофильтров HC-3, HC-4, HC-8, HC-10; 5 – узел изменения размеров пучка (телескоп, диаметры пучков на выходе с телескопа  $d_0 = 1,25; 2,5; 5$  см): 5а – сферическое зеркало с радиусом кривизны 200 см, 5б – сферическое зеркало с радиусом кривизны –100 см; 6 – образец оптического стекла K8 длиной 10 см; 7 – узел измерения спектра отдельного ПФК: 7а – диафрагма, 7б – интегрирующая сфера Newport 819C-SF-6, 7в – спектрометр Maya2000Pro; 8 – CCD-камера ANDOR-Clara E с объективом HELIOS-44M 2/58 и набором светофильтров HC-8, HC-10; 9 – фотокамера Pentax K-3 (25 МП) с макрообъективом Pentax100MacroWR; 10 – подвижный экран; 11 – компьютер для регистрации результатов измерений с (4), (7), (8), (9). На врезке схемы – исходный профиль лазерного пучка

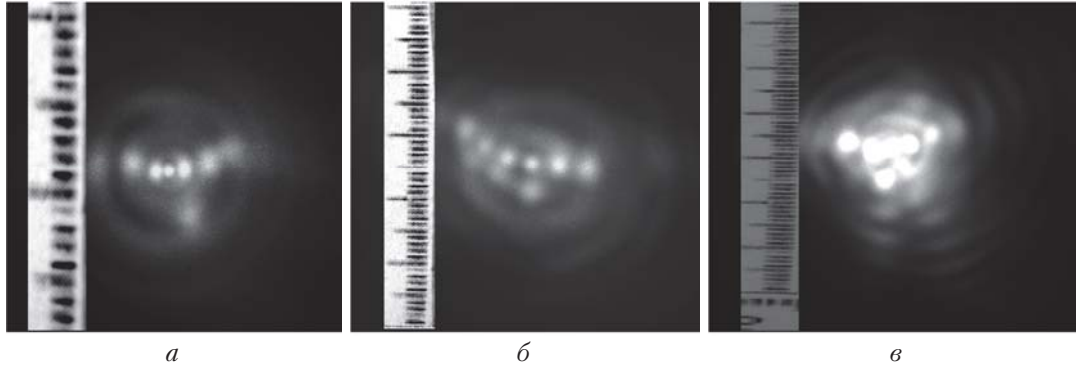


Рис. 2. Поперечная структура лазерного пучка с начальным диаметром 2,5 см на удалении 45 м от источника (3 м от конца ОМФ) (а), 105 м от источника (65 м от конца ОМФ) (б), 138 м от источника (98 м от конца ОМФ) (в)

В ходе эксперимента камера 8 фиксировала изображение пучка. Путем их обработки [7] определялись различные поперечные структуры пучка, а именно: весь пучок, отдельные ПФК, кольца, окружающие ПФК, и интегральные кольца. Поперечная структура центральной части лазерного пучка на различных дистанциях от окончания области множественной филаментации (ОМФ) для одного из начальных диаметров пучка ( $d_0 = 2,5$  см), зарегистрированных камерой 8 на экране 10, изображена на рис. 2. Видно, что центральная часть пучка содержит яркие, так

называемые «горячие», точки – постфиламентационные каналы. Они окружены системой колец, яркость которых снижается от центра к периферии, что соответствует распределению плотности энергии в бессель-гауссовом пучке. Возможно, именно такая конфигурация поперечной структуры пучка, формируемая после филаментации, является причиной низкой расходимости его центральной части, т.е. ПФК.

Зависимости радиусов пучка и постфиламентационных каналов от дистанции распространения приведены на рис. 3.

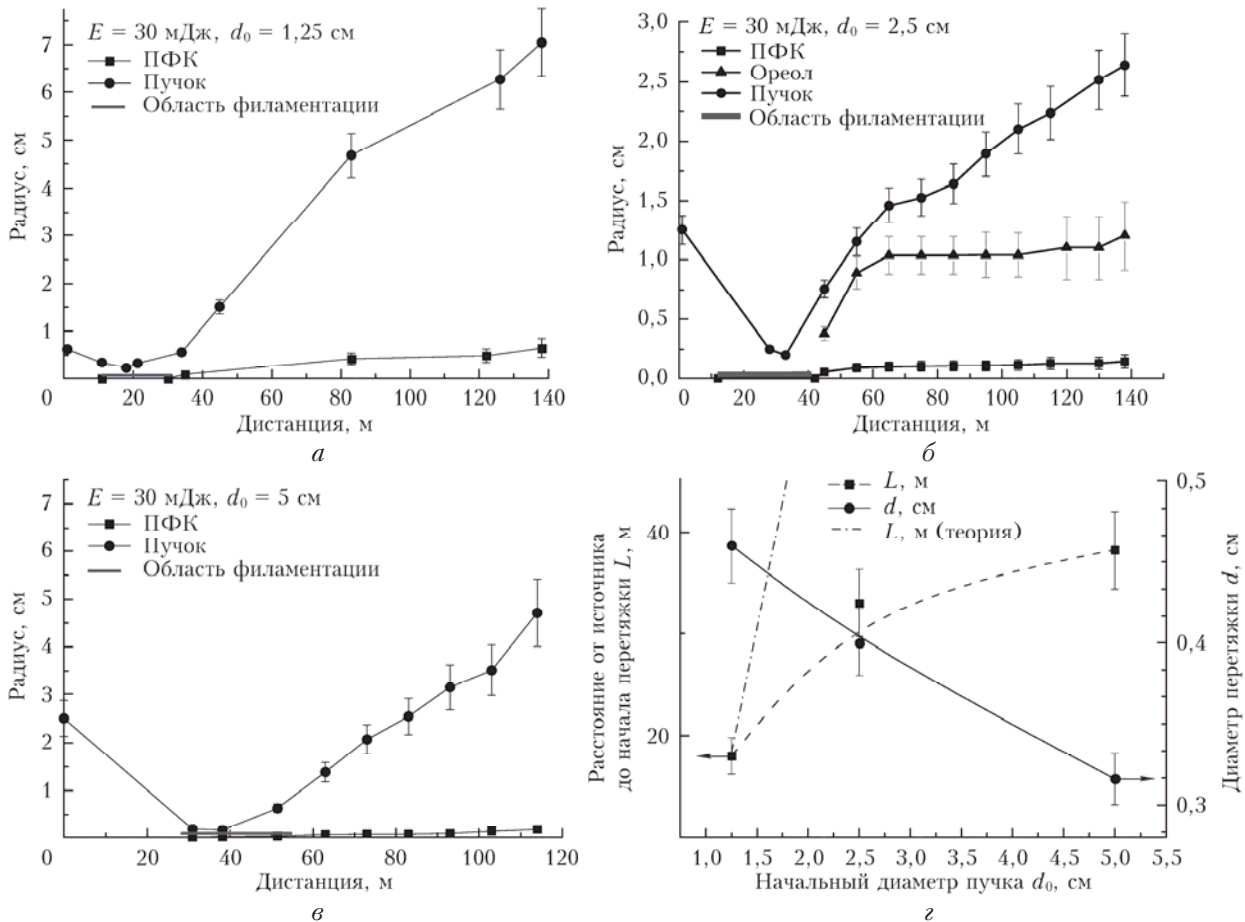


Рис. 3. Изменения радиусов пучков и постфиламентационных каналов для различных начальных диаметров пучка 1,25 (а), 2,5 (б), 5 см (в) с дистанцией распространения лазерных импульсов; диаметр перетяжки пучка и удаление начала перетяжки пучка от источника в зависимости от начального диаметра пучка (з)

Из полученных результатов следует, что угловая расходимость ПФК для пучка с начальным диаметром 1,25 см (рис. 3, а) составляет 42 мкрад, для пучка с начальным диаметром 2,5 см (рис. 3, б) — 5 мкрад и для пучка с начальным диаметром 5 см (рис. 3, в) — 22 мкрад. Расходимость всего пучка ( $d_0 = 1,25; 2,5; 5$  см) после прохождения глобально фокуса (не включая коническую эмиссию из области филаментации — систему цветных колец) составляет 0,6; 0,2; 0,65 мрад соответственно. Аномально низкая расходимость ПФК для пучка с начальным диаметром 2,5 см, возможно, обеспечивается тем, что именно для данного пучка, не претерпевшего искажений при уменьшении или увеличении его диаметра в два раза телескопом 5 (см. рис. 1), кольцевая структура, окружающая пакет филаментов, наиболее ярко выражена.

На рис. 3, з представлены зависимости расстояния от источника излучения до перетяжки всего пучка — глобального нелинейного фокуса (ГНФ), и диаметра перетяжки ( $d$ ) от начального диаметра пучка. Возрастающий ход зависимости расстояния до ГНФ от начального диаметра пучка качественно не противоречит представлениям об отклике дистанции нелинейной фокусировки на увеличение апертуры

пучка при сохранении его начальной пиковой мощности  $P_0$ . Однако количественно ход этой зависимости существенно отличается от прогнозируемой квадратичной зависимости от радиуса пучка. Оценка дистанции до ГНФ по формуле, записанной в [1] для стационарной самофокусировки и одиночной филаментации, удовлетворительно согласуется с измеренным значением только для минимального диаметра пучка, равного 1,25 мм (см. рис. 3, з). С увеличением начальной апертуры расхождение между расчетным и измеренным значениями существенно возрастает.

С использованием узла измерения спектра 7 (см. рис. 1) зарегистрирован спектр отдельного ПФК (рис. 4). Из рисунка следует, что спектральная ширина излучения, сосредоточенная в ПФК, простирается до 1100 нм. Данное обстоятельство позволяет использовать даже отдельные ПФК для многократного лазерного зондирования атмосферы.

Интенсивность в ПФК на удалении в сотни метров от ОМФ можно оценить исходя из эксперимента, результат которого представлен на рис. 5. В область ПФК был помещен образец оптического стекла, в котором в местах воздействия ПФК зафиксирована множественная филаментация, имеющая структуру полого конуса. Данная структура ОМФ

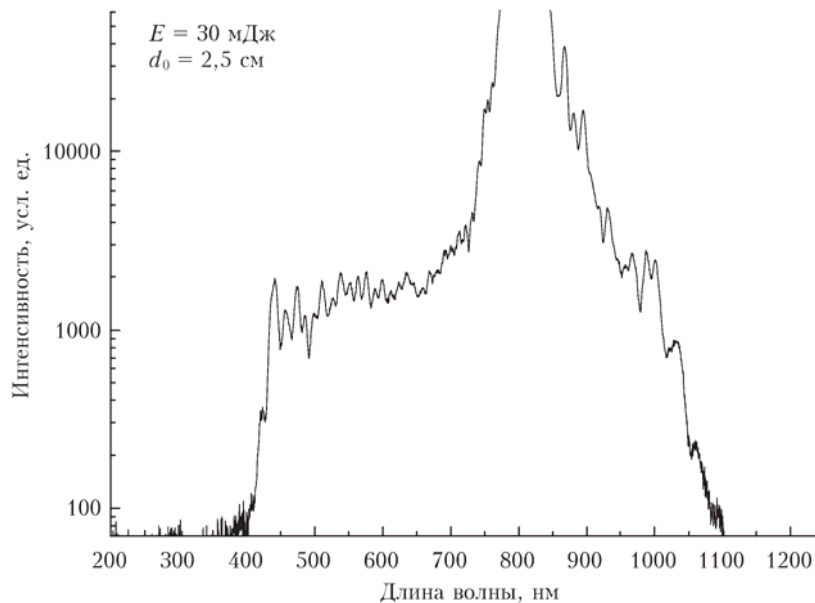


Рис. 4. Спектр одиночного постфиламентационного канала на расстоянии 100 м от области множественной филаментации



Рис. 5. Множественная филаментация в стекле К8 при воздействии постфиламентационными каналами на удалении 90 м от окончания области филаментации

наблюдалась нами ранее в [8] только при достижении средней интенсивностью в импульсе с гауссовым распределением значений  $10^{11} - 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований особенностей распространения постфиламентационных каналов на контролируемой трассе протяженностью 150 м для коллимированных пучков различного диаметра показали следующее. Расходимость постфиламентационных каналов составляет десятки микрорадиан. При множественной филаментации весь пучок самофокусируется, имея минимальный поперечный размер на дистанции, соответствующей максимальному количеству филаментов в ОМФ. Угловая расходимость пучка после глобального фокуса на порядок превосходит расходимость постфиламентационных световых каналов. Кольцевая структура, окружающая область филаментации, обеспечивает аномально низкую расходимость пакета ПФК. На дистанциях от окончания области филаментации, значительно превосходящих протяженность области филаментации, постфиламентационные каналы имеют гауссово распределение плотности энергии в поперечном сечении и содержат максимальную для безионизационного распространения интенсивность, достаточную для формирования множественной филаментации в плотных оптических средах. Высокая интенсивность слаборасходящихся постфиламентационных каналов делает возможным их использование для передачи лазерной энергии на большие расстояния. Широкий спектр ПФК позволяет осуществлять многочастотное дистанционное зондирование атмосферы.

## Заключение

В экспериментах впервые установлен эффект глобальной самофокусировки пучков фемтосекундного излучения титан-сапфирового лазера при множественной филаментации в воздухе. После достижения глобального фокуса лазерный пучок начинает расходиться. Эта картина качественно напоминает поведение лазерного пучка в линейной среде после его фокусировки. Ранее в работах [9, 10] было показано, что после самофокусировки первоначально фокусированного лазерного пучка он расходится и угловая расходимость превышает ее значение в линейном случае.

Следовательно, после самофокусировки лазерных коллимированных и фокусированных пучков угол расходимости пучка всегда превышает его начальную дифракционную расходимость. Следует отметить, что это свойство не является отличительным только для пучков сантиметрового размера. Расчеты, выполненные для миллиметровых и субмиллиметровых пучков, также подтверждают заключение о нелинейной постфокальной расходимости. Однако это относится только к качественной зависимости возникновения глобальной угловой расходимости после достижения лазерным пучком нелинейного фокуса. Все другие выводы для закономерностей множественной филаментации, полученные из чис-

ленных расчетов пучков миллиметрового радиуса, не обеспечивают количественного, а в ряде случаев и качественного прогноза распространения. В первую очередь это связано с тем, что в поведении световых структур, возникающих внутри пучка при множественной филаментации, отсутствует подобие для различных значений первоначального радиуса пучка.

В частности численные эксперименты, выполненные для миллиметровых лазерных пучков, не указывают на формирование кольцевых световых структур, расходимость которых значительно меньше, чем расходимость всего пучка после глобального фокуса. Такие структуры содержат в себе плазменные и постфиламентационные каналы. Экспериментальный результат, полученный в настоящей работе, показал возможность формирования в пучке с начальным диаметром 2,5 см структур, обеспечивающих продолжительное существование протяженных постфиламентационных каналов. Также было показано, что структура макрокольца формируется не для всех пучков. Очевидно, что благоприятные условия могут быть искусственно созданы путем подбора оптимальных пространственных амплитудных и фазовых распределений светового поля на выходе из лазерной системы.

Проведенные эксперименты показали, что в случае реализации условий в пучке, обеспечивающих аномально низкую угловую расходимость ПФК, в последних достигаются высокие средние интенсивности излучения, сравнимые по величине с интенсивностями в конденсированных оптических средах при филаментации.

Работа выполнена при финансовой помощи РНФ (соглашение № 15-17-10001).

1. *Boyd R.W., Lukishova S.G., Shen Y.R.* Self-focusing: Past and Present. New York: Springer-IQEC, 2009. 605 p.
2. *Чекалин С.В., Кандидов В.П.* От самофокусировки световых пучков – к филаментации лазерных импульсов // Успехи физ. наук. 2013. Т. 183, № 2. С. 133–152.
3. *Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г.* Нелинейная фемтосекундная оптика атмосферы / Под ред. А.А. Землянова. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2010. 212 с.
4. *Землянов А.А., Булыгин А.Д., Гейнц Ю.Э., Минина О.В.* Динамика световых структур при филаментации фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 5. С. 359–368; *Zemlyanov A.A., Bulygin A.D., Geints Yu.E., Minina O.V.* Dynamics of light-structures during filamentation of femtosecond laser pulses in air // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 5. P. 395–403.
5. *Hui Gao, Weiwei Liu, See Leang Chin.* Post-filamentation multiple light channel formation in air // Laser Phys. 2014. V. 24. P. 055301. DOI: 10.1088/1054-660X/24/5/055301.
6. *Апексимов Д.В., Землянов А.А., Иглакова А.Н., Кабанов А.М., Кучинская О.И., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Петров А.В.* Филаментация тераваттных лазерных импульсов на стометровой атмосферной трассе // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 3. С. 274–277; *Apeksimov D.V., Zemlyanov A.A., Iglakova A.N., Kabanov A.M., Kuchinskaya O.I., Matvienko G.G., Oshlakov V.K., Petrov A.V.* Filamentation of terawatt laser

- pulses along hundred-meter atmospheric paths // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 3. P. 372–374.
7. Гейнц Ю.Э., Апе́ксимов Д.В., Афо́насенко А.В. Программно-вычислительный комплекс для анализа поперечных профилей лазерных пучков (профиле́метр) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014616871 от 07.07.2014. Правообладатель: ИОА СО РАН (RU).
  8. Апе́ксимов Д.В., Го́лик С.С., Зе́млянов А.А., Игла́кова А.Н., Каба́нов А.М., Ку́чинская О.И., Матви́енко Г.Г., Ошла́ков В.К., Петро́в А.В., Соколо́ва Е.Б. Множественная филаментация коллимированного лазерного излучения в воде и стекле // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 11. С. 972–978; *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.
  9. Гейнц Ю.Э., Зе́млянов А.А., Каба́нов А.М., Матви́енко Г.Г., Степа́нов А.Н. Самовоздействие острофокусированного фемтосекундного лазерного излучения в воздухе в режиме филаментации. Лабораторные и численные эксперименты // *Оптика атмосф. 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. С. 150–157.
  10. Апе́ксимов Д.В., Зе́млянов А.А., Каба́нов А.М., Степа́нов А.Н. Постфиламентационные световые каналы в воздухе // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 4. С. 291–295.

*D.V. Apeksimov, A.A. Zemlyanov, A.N. Iglakova, A.M. Kabanov, O.I. Kuchinskaya, G.G. Matvienko, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov.* **Global self-focusing and features of multiple filamentation of radiation of a subterawatt titanium-sapphire laser with centimeter output aperture along 150-m path.**

The formation and propagation of postfilamentation channels along a controllable path 150 m long are studied experimentally for collimated beams of different diameters. During multiple filamentation, a laser beam is compressed in global focus, after the passage of which its angular divergence is much greater than the divergence of postfilamentation channels generated during the filamentation. It is shown that postfilamentation channels have the intensity sufficient for the formation of multiple filamentation in optical elements after the end of the filamentation region at distances much longer than the filamentation length.