

НЕЛИНЕЙНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ

УДК 530.182.551.510.42+535.621.33

Множественная филаментация лазерных пучков различного радиуса в воздухе на трассе длиной 150 м

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. Петро́в^{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 17.11.2015 г.

Представлены результаты экспериментов по управлению положением и длиной области филаментации фемтосекундных лазерных импульсов на атмосферной трассе длиной 150 м с использованием различной начальной пространственной фокусировки и дефокусировки пучков различного радиуса. Получено распределение филаментов вдоль области филаментации, измерены зависимости длины области филаментации от значения числовой апертуры пучка, его начального радиуса и мощности импульса. Зарегистрированы эмиссионные спектры свечения мишеней различных материалов, помещенных в область филаментации, удаленной от источника излучения.

Ключевые слова: лазерное излучение, фемтосекундный импульс, самофокусировка, филаментация, атмосфера, фокусировка, дефокусировка, спектр; laser radiation, femtosecond pulse, self-focusing, filamentation, atmosphere, focusing, defocusing, spectrum.

Проблема управления положением области множественной филаментации на протяженных атмосферных трассах является актуальной для таких задач атмосферной оптики, как дистанционная диагностика атмосферных компонентов с использованием методики многочастотного зондирования за счет генерации широкополосного белого свечения из области филаментации [1, 2], транспортировка через атмосферу высокоинтенсивных филаментационных и постфиламентационных каналов, эмиссионный спектральный анализ удаленных мишеней при генерации на них плазменных очагов [3–5]. Ранее [6, 7] мы проводили исследования филаментации гигаваттных лазерных импульсов с начальным радиусом $r_0 = 0,175$ см на 30-м трассе и тераваттных импульсов радиусом $r_0 = 1,25$ см на 100-м трассе.

В настоящей статье представлены результаты экспериментов по управлению положением области филаментации тераваттных импульсов первой гармоники Ti:Sapphire-лазера (длительность импульсов $\tau = 50$ фс, энергия в импульсе до 82 мДж, радиусы пучка $r_0 = 2,5; 1,25$ и $0,625$ см (по уровню e^{-2}),

частота следования импульсов 10 Гц на трассе длиной 150 м). Эксперименты проводились на стенде ИОА СО РАН. Схема эксперимента представлена на рис. 1.

Пространственная фокусировка или дефокусировка лазерного пучка осуществлялись с помощью телескопа 5, состоящего из фокусирующего ($f_1 = 100$ см) и дефокусирующего ($f_2 = -50$ см) зеркал, путем изменения базы (расстояния между зеркалами) телескопа. База, равная 50 см, соответствовала коллимированному пучку. Уменьшение базы дефокусировало пучок, увеличение — фокусировало. Последовательность расположения зеркал приводила к уменьшению начального радиуса пучка r_0 в 2 раза при $f_1 \rightarrow f_2$, либо к такому же его увеличению при $f_2 \rightarrow f_1$. В экспериментах проводилась регистрация начала области филаментации, ее конца и распределения филаментов внутри области филаментации с помощью подвижного экрана 13. Количество филаментов определялось по ожогам на фотобумаге. Проводилось измерение спектров свечения твердотельных мишеней 17, помещенных в область филаментации.

На рис. 2 представлены положение на трассе области филаментации и распределение в ней количества филаментов при различной начальной фокусировке и дефокусировке пучков различного начального радиуса при телескопировании пучка (рис. 2, а, в). В случае нетелескопированного коллимированного пучка (рис. 2, б) единственным

* Дмитрий Владимирович Апе́ксимов (areximov@iao.ru); Александр Анатольевич Зе́млянов (zaa@iao.ru); Анастасия Николаевна Игла́кова (iap@iao.ru); Андрей Михайлович Каба́нов (kam@iao.ru); Олеся Ивановна Ку́чинская (koi@iao.ru); Геннадий Григорьевич Матви́енко (mgg@iao.ru); Виктор Константинович Ошла́ков (ovk@iao.ru); Алексей Вадимович Петро́в (rav@iao.ru).

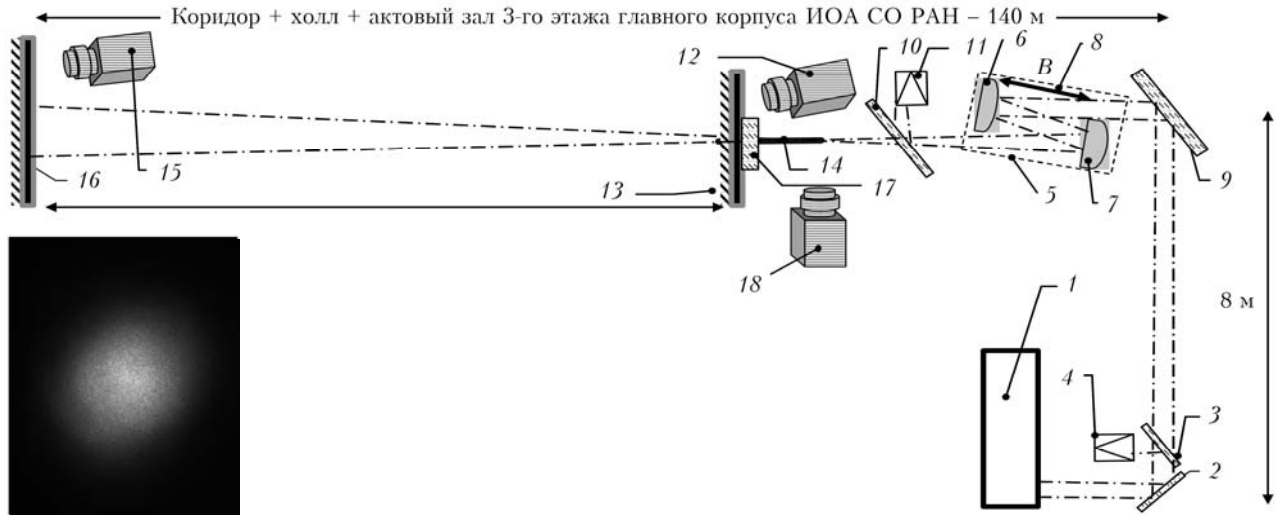


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – Ti:Sapphire-лазерный комплекс, длительность импульса $\tau = 50$ фс, энергия импульса $E \leq 82$ мДж, $P \leq 1,5$ ТВт, длина волны $\lambda = 800$ нм, частота повторения импульсов $\nu = 10$ Гц; 2, 3, 9, 10 – поворотные пластины; 4 – измеритель длительности импульса (автокоррелятор); 5 – телескоп; 6 – дефокусирующее зеркало $f_1 = -50$ см; 7 – фокусирующее зеркало $f_2 = 100$ см; 8 – переменная база телескопа (расстояние между зеркалами $B = 50$ см соответствует коллимированному пучку); 11 – измеритель энергии импульса ОPHIR-II; 12, 15 – CCD-камера ANDOR-Clara E с объективом HELIOS-44M 2/58, фотокамера Pentax K-3 (25 МП) с макрообъективом Pentax100MacroWR; 13 – подвижный экран для регистрации положения области филаментации; 14 – область филаментации; 16 – неподвижный экран в конце трассы; 17 – образцы твердотельных мишеней (Al, Cu, Fe, Na); 18 – спектрометр Maya-2000PRO. На фрагменте – поперечная структура нетелескопированного пучка с $r_0 = 1,25$ см

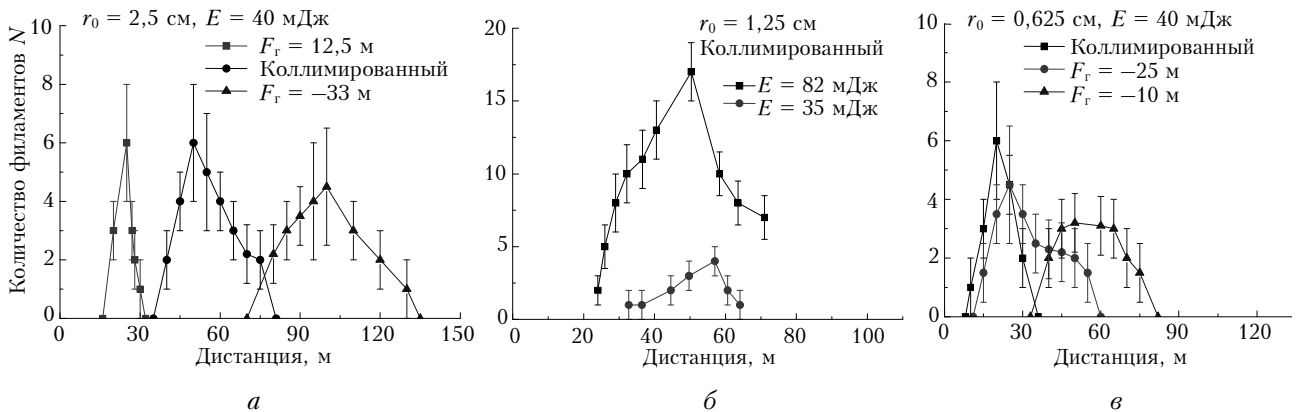


Рис. 2. Распределение филаментов вдоль области филаментации при различной фокусировке (дефокусировке) пучка радиусом: а – 2,5; б – 1,25; в – 0,625 см

способом смещения области филаментации от источника излучения является уменьшение начальной энергии (мощности) импульса. Однако, как видно из сравнения кривых, уменьшение энергии более чем в 2 раза приводит к незначительному (несколько метров) удалению начала филаментации, но сопровождается существенной потерей в количестве филаментов. С уменьшением фокусного расстояния (рис. 2, а) начало и конец области филаментации сдвигаются в сторону источника излучения. Дефокусировка приводит к смещению области филаментации от источника.

Начало филаментации соответствует совокупному фокусу двух компонент – геометрическому фокусу телескопа и нелинейному фокусу – дистан-

ции коллапса пучка при его самофокусировке. Геометрический фокус рассчитывается по формуле $F_r = (f_1 + f_2)(f_1 + f_2 - B)^{-1}$, где B – база телескопа. Нелинейный фокус находится по формуле Marburger [8]:

$$F_N = 0,734L_R [(\eta^{1/2} - 0,852)^2 - 0,0219]^{-1/2},$$

где $L_R = \pi r_0^2 / \lambda$ – длина Рэлея; λ – длина волны лазерного излучения; $\eta = P_0 / P_{cr}$ – относительная мощность импульса; P_0 – мощность импульса, $P_{cr} = 3,77\lambda^2 / 8\pi n_0 n_2$ – критическая мощность самофокусировки, n_0 – показатель преломления среды, n_2 – коэффициент в нелинейной добавке к показателю преломления (для воздуха и $\lambda = 800$ нм

$P_{cr} = 3,2$ ГВт). Тогда совокупный фокус, т.е. координату начала филаментации, можно определить по формуле

$$Z_{fil} = F_r / (1 + F_r / F_N).$$

На рис. 3 представлены зависимости положения начала и конца области филаментации от степени фокусировки и дефокусировки пучка для двух радиусов пучков. Из сравнения графиков видно, что при заданной энергии импульса диапазон изменения положения области филаментации для пучка с большим начальным радиусом (рис. 3, а) шире, чем для узкого пучка (рис. 3, б). При этом как для первого, так и для второго пучков уменьшение расстояния геометрической дефокусировки приводит к удалению области филаментации от источника лишь до определенных ее значений, превышение которых приводит к резкому сокращению длины области филаментации и затем к полному ее исчезновению.

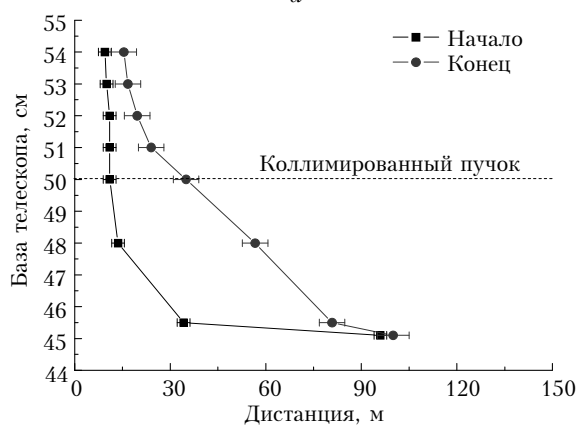
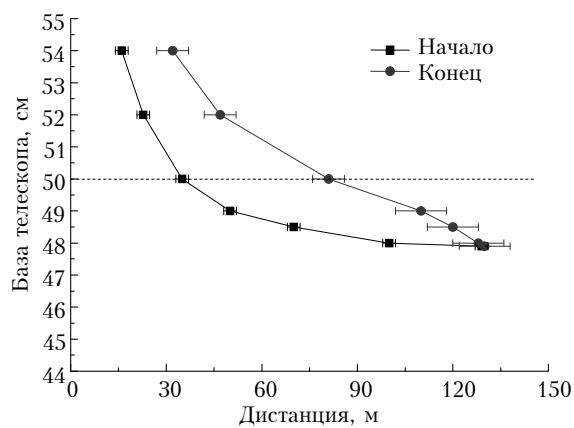


Рис. 3. Положение начала и конца области филаментации в зависимости от степени фокусировки и дефокусировки пучка (изменения базы телескопа) для лазерных пучков с радиусами 2,5 (а) и 0,625 см (б). Энергия импульса – 40 мДж

Данное обстоятельство иллюстрирует рис. 4, на котором представлена зависимость длины области филаментации от значения числовой апертуры ($NA = r_0 / F_r$) для различных энергий импульса

и начальных радиусов лазерного пучка. Видно, что уменьшение числовой апертуры приводит к увеличению протяженности на трассе области, заполненной филаментами, но лишь до определенных ее значений, обусловленных начальным радиусом пучка и энергией (мощностью) импульса.

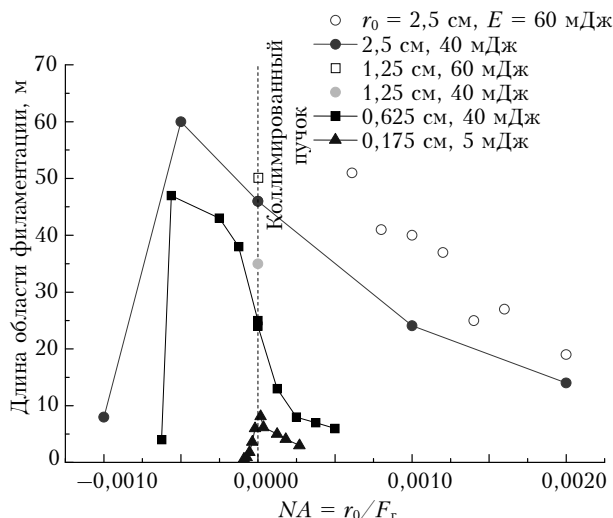


Рис. 4. Длина области филаментации в зависимости от значения числовой апертуры для различных энергий импульса и начального радиуса пучка. Треугольники – данные работы [5]

На рис. 5 представлена зависимость длины области филаментации от начального радиуса коллимированного пучка для различных энергий лазерного импульса.

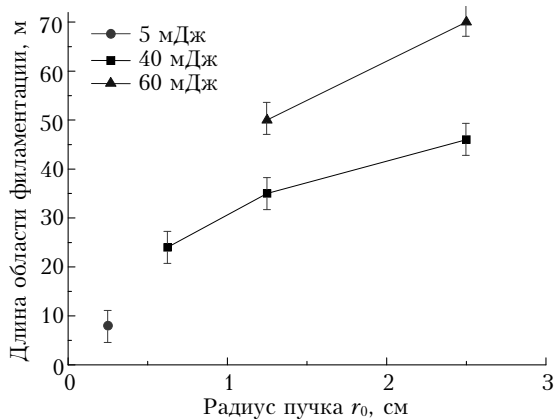


Рис. 5. Длина области филаментации в зависимости от начального радиуса коллимированного пучка при различных энергиях импульса

Были проведены эксперименты по дистанционному индуцированию плазмы на мишенях, помещенных в область филаментации пучка, и идентификации их элементного состава по эмиссионным спектрам свечения. Зарегистрированные спектры свечения образцов металлов (Al, Cu, Fe, Na) на расстоянии 50 м от источника излучения 16 для коллимированного пучка с энергией 40 мДж представлены на рис. 6.

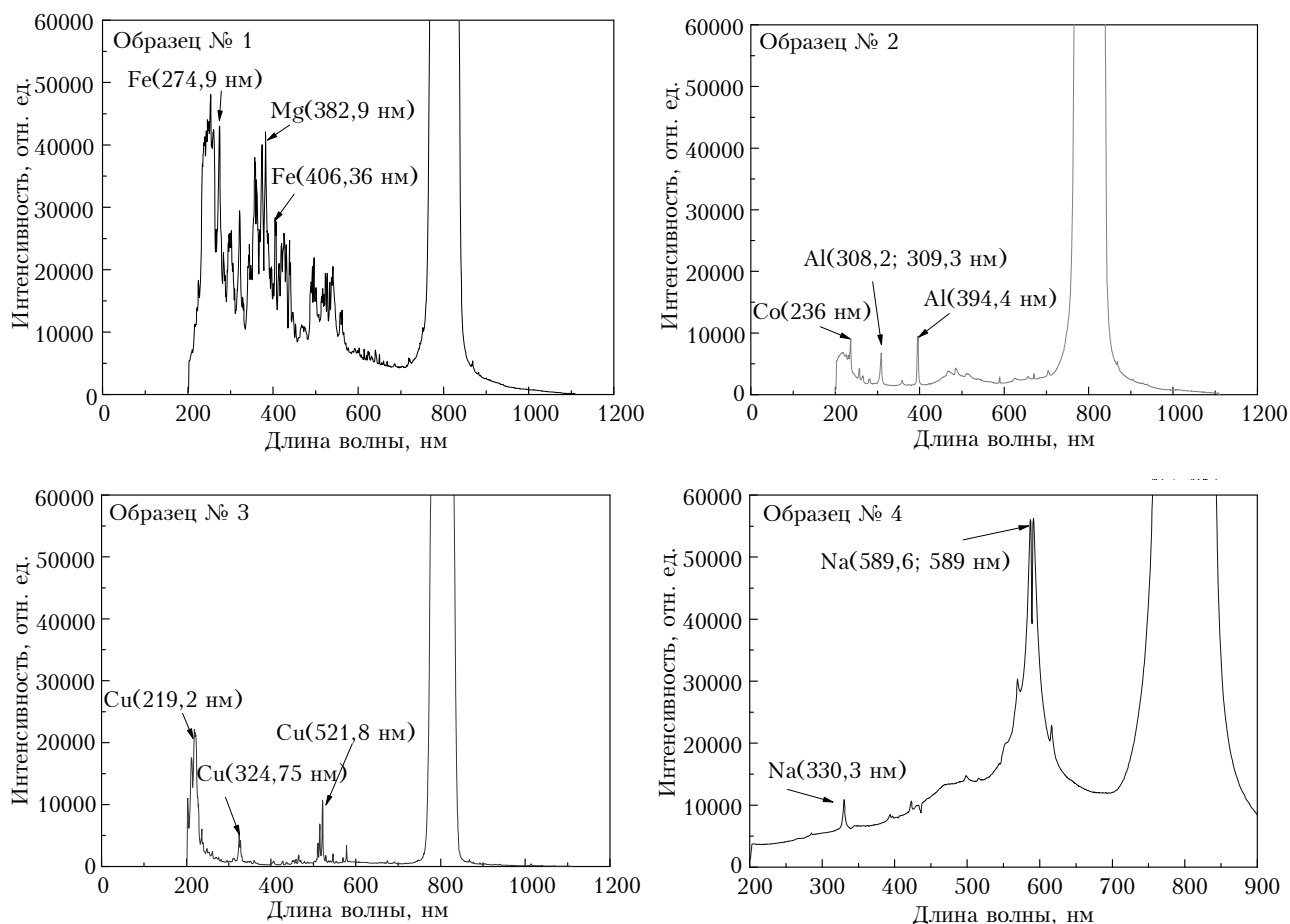


Рис. 6. Спектры свечения различных образцов металлов (1 – железо, 2 – алюминий, 3 – медь, 4 – поваренная соль) в области филаментации на расстоянии 50 м от источника излучения 16 для коллимированного пучка

Эксперименты по филаментации лазерных пучков в воздухе показали, что вариация радиуса пучка и его начальная фокусировка позволяют эффективно управлять положением области множественной филаментации на трассах масштаба сотен метров. При этом дефокусировка пучка как способ удаления области филаментации от источника имеет предельные уровни, зависящие от радиуса пучка и его мощности, превышение которых приводит к прекращению филаментации. Управляемая филаментация лазерного пучка позволяет формировать на заданном расстоянии от источника значения интенсивностей оптического поля, достаточные для индуцирования плазмы на мишенях для проведения анализа их элементного состава.

Работа выполнена при финансовой помощи Российского научного фонда (соглашение 15-17-10001). Измерения спектров свечения твердотельных мишеней поддержаны грантом РФФИ №14-28-02023 офи-м.

1. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г. Нелинейная фемтосекундная оптика атмосферы / Под общей ред. д.ф.-м.н., профессора А.А. Землянова. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2010. 212 с.

2. Букин О.А., Бабий М.Ю., Голик С.С., Ильин А.А., Кабанов А.М., Колесников А.В., Кульчин Ю.Н., Лисица В.В., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Шмирко К.А. Лидарное зондирование атмосферы с использованием гигаваттных лазерных импульсов фемтосекундной длительности // Квант. электрон. 2014. Т. 44, № 6. С. 563–570.

3. Mitrofanov A.V., Voronin A.A., Sidorov-Biryukov D.A., Andriukaitis G., Flury T., Pugulyš A., Fedotov A.B., Mikhailova J.M., Panchenko V.Ya., Baltuka A., Zheltikov A.M. Post-filament self-trapping of ultrashort laser pulses // Opt. Lett. 2014. V. 39, iss. 16. P. 4659–4662.

4. Durand M., Houard A., Prade B., Mysyrowicz A., Durécu A., Moreau B., Fleury D., Vasseur O., Borchert H., Diener K., Schmitt R., Théberge F., Châteauneuf M., Daigle J.-F., Dubois J. Kilometer range filamentation // Opt. Express. V. 21, N 22. P. 26836–26845.

5. Иглакова А.Н., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Прокорьев В.Е., Тимофеев В.И. Молекулярный и микроэлементный дистанционный анализ листьев зеленых растений // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 11. С. 969–973.

6. Апексимов Д.В., Букин О.А., Быкова Е.Е., Голик С.С., Землянов А.А., Кабанов А.М., Кучинская О.И., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Петров А.В., Соколова Е.Б. Пространственные характеристики области филаментации гигаваттных лазерных импульсов при

их различной фокусировке на атмосферной трассе // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 12. С. 1042–1046.

7. *Алексимов Д.В., Землянов А.А., Иглакова А.Н., Кabanov А.М., Кучинская О.И., Матвиенко Г.Г., Ошляков 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 4. P. 372–375.

8. *Marburger J.H.* Self-focusing: Theory // Prog. Quant. Electr. 1975. V. 4, pt. 1. P. 35–110.

D.V. Apeksimov, A.A. Zemlyanov, A.N. Iglakova, A.M. Kabanov, O.I. Kuchinskaya, G.G. Matvienko, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov. **Multiple filamentation of laser beams with different diameters in the air at a 100-meter path.**

Results of experiments on controlling the position and length of the filamentation zone of femtosecond laser pulses at atmospheric paths 150 m long using different initial spatial focusing and defocusing are presented. The distribution of filaments along the filamentation zone is found, the dependences of the length of the filamentation zone on the numerical aperture of the beam, its initial radius, and pulse power are measured. Emission spectra of the illumination of targets of various materials, placed in the region of the filament far from the radiation source, are recorded.