

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 530.182.551.510.42+535.621.33

**Пространственные характеристики области филаментации
гигаваттных лазерных импульсов при их различной
фокусировке на атмосферной трассе**

**Д.В. Апе́ксимов¹, О.А. Букин², С.С. Голик³, А.А. Землянов¹, А.Н. Иглакова¹,
А.М. Кабанов¹, О.И. Кучинская⁴, Г.Г. Матвиенко¹, В.К. Ошлаков¹,
А.В. Петров¹, Е.Б. Соколова², Е.Е. Хорошаева^{1*}**

¹*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

²*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5*

³*Дальневосточный федеральный университет
690950, г. Владивосток, ул. Суханова, 8*

⁴*Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36*

Поступила в редакцию 2.04.2014 г.

Представлены результаты экспериментов по управлению положением и длиной области филаментации фемтосекундных лазерных импульсов на атмосферной трассе длиной 30 м с использованием различной начальной пространственной фокусировки. Найдена зависимость длины области филаментации от числовой апертуры пучка. Проведено сравнение полученных данных о длине области филаментации и количестве филаментов с результатами наших более ранних экспериментов и данными других авторов.

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

Среди широкого круга задач, решаемых нелинейной фемтосекундной оптикой атмосферы [1], одной из ключевых является задача эффективного управления положением и протяженностью области множественной филаментации лазерного пучка в атмосфере. Именно эти факторы определяют трансформацию энергетических и спектральных характеристик излучения, для каких бы прикладных задач оно ни использовалось, — транспортировка через атмосферу высокой, локализованной в пространстве интенсивности, многочастотное зондирование атмосферы, формирование протяженных плазменных каналов.

Наиболее эффективным методом управления параметрами области филаментации (начало, длина, конец области, плотность филаментов) является варьирование начальной пространственной фокусировкой и диаметром пучка. В опубликованных экспериментальных работах [2–5, 7–14, 16, 18, 19–23], как правило, регистрировались отдельные параметры области филаментации на трассе либо контроль процесса филаментации осуществлялся только в конце трассы. Разработанные к настоящему времени модели множественной филаментации являются в основном качественными, т.е. не позволяют осуществлять прогноз протяженности области филаментации, количества филаментов и кучности в заданном удалении от источника, особенно для пучков с негауссовым профилем, которые, как правило, имеют тераваттную мощность.

В настоящей статье представлены результаты исследования филаментации на трассе, когда проводился контроль результата трансформации пространственных и спектральных характеристик излучения не только в конце трассы, но и на любом ее участке.

* Дмитрий Владимирович Апе́ксимов (apeximov@iao.ru); Олег Алексеевич Букин (o_bukin@mail.ru); Сергей Сергеевич Голик (golik_s@mail.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); Екатерина Борисовна Соколова (mastaps@mail.ru); Елена Евгеньевна Хорошаева (bee@iao.ru).

Эксперименты по управлению положением области филаментации проводились на трассе длиной 30 м на первой гармонике Ti:Sapphire-лазера с $\lambda = 800$ нм, импульсом длительностью 45 фс, энергией в импульсе до 5,2 мДж, радиусом $r_0 = 4,5$ мм (по уровню e^{-2}), частотой следования импульсов 1 кГц. Пространственная фокусировка лазерного пучка осуществлялась с помощью телескопа, состоящего из фокусирующей и дефокусирующей линз, изменением расстояния между линзами (рис. 1). В экспериментах регистрировались следующие параметры: начало, конец, длина области филаментации, а также спектр лазерного излучения и поперечная энергетическая структура лазерного пучка в конце трассы. Параметры области филаментации (начало, конец, количество филаментов) фиксировались по ожогу на бумаге в различных точках трассы (см. рис. 4, д).

На рис. 2 представлены зависимости начала, конца и длины области филаментации при фокусировке (рис. 2, а) и дефокусировке (рис. 2, б) лазерного пучка. Видно, что с увеличением остроты фокусировки длина филамента уменьшается, а его начало и конец смещаются в сторону источника излучения. При увеличении остроты дефокусировки длина филамента также сокращается, а начало об-

ласти филаментации смещается в сторону от источника. При этом максимальная длина области филаментации достигается в случаях максимально мягкой фокусировки и дефокусировки пучка и составляет 6–8 м как в первом, так и во втором случаях. Пожалуй, единственным инструментом, позволяющим проводить прогноз начала филаментации, является известная формула Marburger [6] для нелинейного фокуса $F_N = 0,734L_R[(\eta^{1/2} - 0,852)^2 - 0,0219]^{-1/2}$, где $L_R = \pi r_0^2/\lambda$ – длина Рэлея; $\eta = P_0/P_{cr}$ – безразмерная мощность импульса; P_0 – мощность импульса, $P_{cr} = 3,77\lambda^2/8\pi n_0 n_2$ – критическая мощность самофокусировки (для воздуха и $\lambda = 800$ нм $P_{cr} = 3,2$ ГВт, n_0 , n_2 – линейный и нелинейный показатели преломления воздуха). Если пучки имеют еще и начальную геометрическую (положительную или отрицательную) фокусировку F_T , то для дистанции от источника до начала области филаментации можно записать

$$Z_{fil} = F_T / (1 + F_T / F_N). \quad (1)$$

Длина геометрической фокусировки (фокусное расстояние телескопа) рассчитывалась как $F_T = (f_1 + f_2)(f_1 + f_2 - b)^{-1}$, где b – база телескопа (расстояние между линзами).

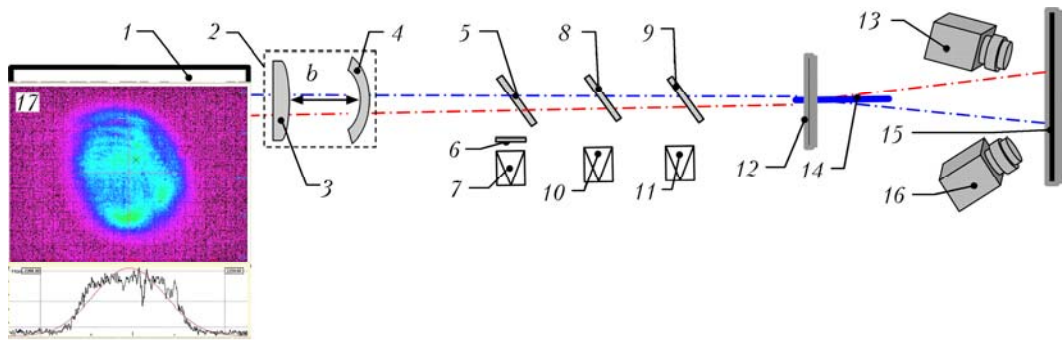


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – лазерная система (Spitfire Pro 40F, Spectra Physics); 2 – телескоп с линзами $f_1 = 500$ мм (3) и $f_2 = -250$ мм (4); 5, 8, 9 – поворотные пластины; 6 – ослабитель; 7 – автокоррелятор (PSCOUT PL-SP-LF, Spectra Physics); 10 – измеритель энергии (Spectra Physics 407A); 11 – измеритель профиля пучка (Newport LBP-HR); 12 – подвижный экран; 13 – CCD-камера (видеоскан-285/П-USB); 14 – область филаментации; 15 – экран; 16 – спектрометр HR4000 (Ocean Optics); 17 – профиль лазерного пучка в начале трассы

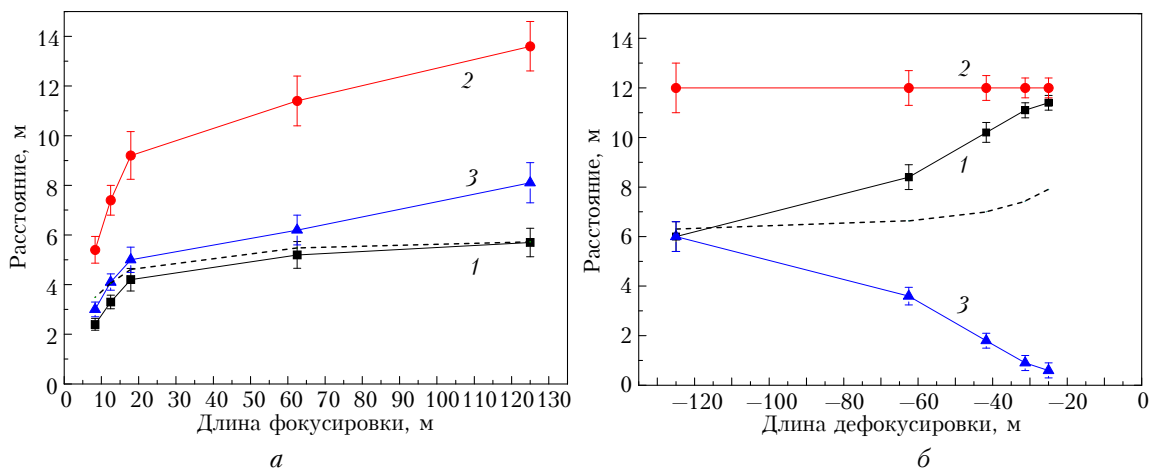


Рис. 2. Зависимости начала Z_{fil} (1), конца Z_e (2) и длины L_{fil} (3) области филаментации от длины фокусировки (а) и дефокусировки (б) лазерного пучка. Штриховые линии – расчет начала филаментации по формуле (1)

Сопоставление экспериментальных данных с расчетными значениями для дистанции начала образования филамента указывает на их хорошее согласие только для случая фокусированного пучка. Для дефокусированного пучка различие между расчетными и экспериментальными данными возрастает с увеличением остроты дефокусировки, что, возможно, связано с отличием профиля лазерного пучка от гауссова распределения (см. рис. 1). На рис. 3 представлены спектры лазерного импульса, измеренные в конце трассы при различной дефокусировке пучка. Видно, что в сравнении со спектром исходного импульса, измеренного в начале трассы, спектр после филаментации уширен за счет фазовой модуляции излучения при филаментации.

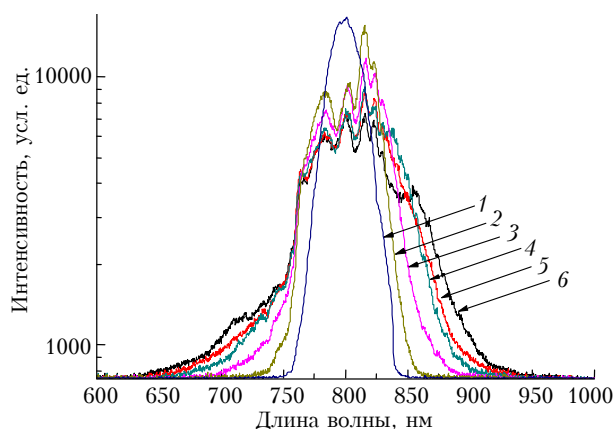


Рис. 3. Спектры лазерного импульса после филаментации: 1 – спектр исходного импульса; 2 – $f = -18$ м; 3 – $f = -25$ м; 4 – $f = -42$ м; 5 – $f = -125$ м; 6 – коллимированный пучок

Сравнение спектров 1–6 указывает, что уменьшение остроты дефокусировки приводит к уширению спектра. Согласно данным рис. 2, б, уменьшение дефокусировки приводит к увеличению длины области филаментации. Сопоставление этих двух факторов позволяет предположить, что увеличение длины филамента приводит к увеличению ширины спектра. На рис. 4 показана энергетическая структура пучка на экране в конце трассы после филаментации импульса с энергией 5,2 мДж при различной начальной расходимости пучка. Видно, что

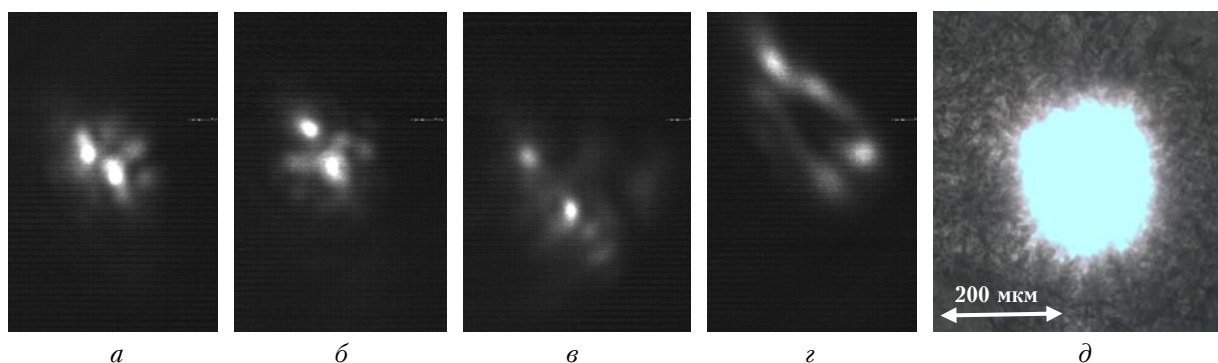


Рис. 4. Фотографии структуры лазерного пучка на экране в конце трассы для фокусированного 125 м (а), дефокусированного 125 м (б), фокусированного 17 м (в) и дефокусированного 17 м (г), снимок ожога на бумаге от филаментов на трассе на расстоянии 5 м от источника (д)

наибольшая кучность ярких точек, которые являются отпечатками высокоинтенсивных постфиламентационных каналов, наблюдается для минимально расходящегося или сходящегося пучков (рис. 4, а, б). В случае более острой фокусировки (рис. 4, в) или дефокусировки (рис. 4, г) «горячие точки» расходятся в поперечном сечении пучка.

Размер яркого пятна на экране в конце трассы составляет примерно 2 мм (см. рис. 4, а–г). Размер ожога на бумаге (см. рис. 4, д) в конце области филаментации ~ 200 мкм. Зная расстояние от конца области филаментации до экрана (20 м), можно оценить расходимость постфиламентационного светового канала $\sim 10^{-4}$ рад. При этом дифракционная расходимость пучка, распространяющегося после филамента, составляет $\sim 5 \cdot 10^{-3}$ рад. Таким образом, расходимость высокоинтенсивных световых каналов, формируемых при филаментации, примерно в 50 раз ниже дифракционной. Следует отметить, что на каждых 20 м трассы (как в данном случае) интенсивность в этих узконаправленных световых каналах теряет около двух порядков величины.

Рассмотрим результаты измерений протяженности области филаментации для различных начальных фокусировок излучения и мощностей импульса. На рис. 5 приведена зависимость длины области филаментации от параметра числовой апертуры $NA = r_0/f$. Видно, что увеличение числовой апертуры приводит к уменьшению длины области филаментации, увеличение относительной мощности и уменьшение числовой апертуры – к увеличению протяженности на трассе области, заполненной филаментами. Следует отметить, что экспериментальные данные по длине области филаментации были получены с использованием различных экспериментальных методик (акустические измерения [17], измерения концентрации электронов [13], съемка CCD-камерой [11, 14, 15], регистрация ожога на фотобумаге [8]), при этом все данные хорошо коррелируют между собой.

Одним из важных параметров области филаментации является количество филаментов. Как видно из рис. 4, количество филаментов на трассе не превышало двух. Для того чтобы определить вид зависимости количества филаментов от мощности, обратимся к нашим результатам [2–5], полученным

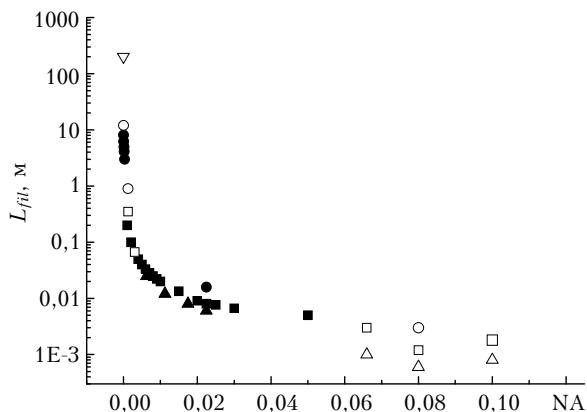


Рис. 5. Зависимость длины области филаментации от числовой апертуры лазерного пучка для различных мощностей лазерного импульса: 9 – 10, \times – 30, \circ , \bullet – 110, 4 – 300 ГВт. Темные кружки – результаты настоящей работы, темные квадраты и треугольники – данные наших предыдущих работ [11, 15, 17], светлые точки – данные работ [7–10, 12–14, 16, 18]

при исследовании множественной филаментации гигаваттных импульсов на атмосферной трассе длиной 85 м. В этих экспериментах проводилась регистрация «отпечатков» пучка на экране в конце трассы. Полученная зависимость числа филаментов от относительной мощности импульса представлена на рис. 6.

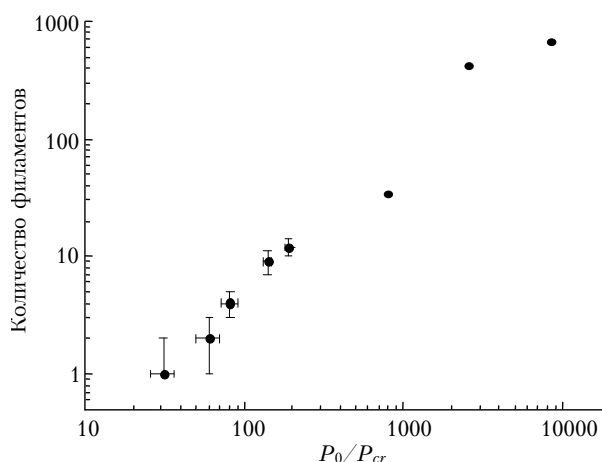


Рис. 6. Зависимость количества филаментов от относительной мощности коллимированного лазерного пучка. Пять точек слева – данные настоящей работы, три точки справа – [21–23]

Видно, что существует участок (по шкале относительной мощности) резкого роста числа филаментов при увеличении относительной мощности импульса. Интересно, что такой же вид зависимости наблюдался нами при филаментации в воде [24]. На рис. 6 также приведены данные [21–23] по распространению тераваттных импульсов в атмосфере. Видно, что результаты различных экспериментов не противоречат друг другу.

Таким образом, полученные нами результаты и данные других исследователей позволили вы-

явить количественные эмпирические зависимости длины области филаментации, ее расположения на трассе от степени фокусировки излучения и мощности лазерного импульса, количества филаментов от мощности излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционного проекта Президиума СО РАН № 67, гранта РФФИ № 12-05-33068 мол_а_вед. Исследования спектральной трансформации фемтосекундных импульсов при филаментации в условиях высокой влажности атмосферы выполнены при поддержке гранта РНФ № 14-19-00589.

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 Института оптики атмосферы СО РАН, 2010. 212 с.
2. Алексимов Д.В., Гейнц Ю.Э., Захаров Н.С., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Степанов А.Н., Холод С.В. Распространение мощного ультракороткого лазерного импульса на горизонтальной атмосферной трассе // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22, № 11. С. 1035–1041.
3. Алексимов Д.В., Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Степанов А.Н. Эффективные характеристики тераваттного фемтосекундного лазерного излучения на горизонтальной атмосферной трассе // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 11. С. 1006–1013.
4. Алексимов Д.В., Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Степанов А.Н. Филаментация негауссовских лазерных пучков с различной геометрической расходимостью на атмосферной трассе // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 11. С. 929–935.
5. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Степанов А.Н. Экспериментальные исследования филаментации мощного ультракороткого лазерного излучения с начальной геометрической расходимостью в воздухе // Квант. электрон. 2013. Т. 43, № 4. С. 350–356.
6. Marburger J.H. Self-focusing: Theory // Prog. Quant. Electron. 1975. V. 4, part 1. P. 35–110.
7. Чекалин С.В., Кандидов В.П. От самофокусировки световых пучков к филаментации лазерных импульсов // Успехи физ. наук. 2013. Т. 183, № 2. С. 133–152.
8. La Fontaine B., Vidal F., Jiang Z., Chien C.Y., Comtois D., Desparois A., Johnston T.W., Kieffer J.-C., Pepin H., Mercure H.P. Filamentation of ultrashort pulse laser beams resulting from their propagation over long distances in air // Phys. Plasmas. 1999. V. 6, N 1615. P. 1615–1621.
9. Zhonggang J.I., Jiabin Zh., Zhanxin W., Xiaochun G., Wenye W., Jiansheng L., Ruxin L. Low Resistance and Long Lifetime Plasma Channel Generated by Filamentation of Femtosecond Laser Pulses in Air // Plasma Sci. Technol. 2010. V. 12, N 3. P. 295–299.
10. Sreeja S., Kumar V.R., Leela Ch., Radhakrishnan P., Tewari S.P., Rao S.V., Kiran P.P. Filamentation characteristics of focused fs pulses in atmosphere // Proc. SPIE. 2012. V. 8434.84340U-1.
11. Алексимов Д.В., Букин О.А., Быкова Е.Е., Гейнц Ю.Э., Голик С.С., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г. Длина филаментации мощного остро сфокусированного фемтосекундного лазерного излучения в воздухе. Влияние размера светового пучка // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 3. С. 247–252.

12. Hosseini S., Kosareva O.G., Panov N.A., Kandidov V.P., Azarm A., Daigle J.-F., Savel'ev A.B., Wang T.-J., Chin S.L. Femtosecond laser filamentation in different air pressures simulating vertical propagation up to 10 km // *Laser Phys. Lett.* 2012. V. 9, N 12. P. 868–874.
13. Ионин А.А., Кудряшов С.И., Макаров С.В., Селезнев Л.В., Симицын Д.В. Множественная филаментация мощных фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе // *Письма в ЖЭТФ.* 2009. Т. 90, вып. 6. С. 467–472.
14. Ionin A.A., Troshnikov N.G., Kosareva O.G., Larichev A.V., Mokrousova D.V., Panov N.A., Seleznev L.V., Sinityn D.V., Sunchugasheva E.S. Filamentation of femtosecond laser pulses governed by variable wavefront distortions via a deformable mirror // *J. Opt. Soc. Amer. B.* 2013. V. 30, iss. 8. P. 2257–2262.
15. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Степанов А.Н. Формирование филамента фемтосекундного лазерного импульса в воздухе после фокуса оптической системы // *Оптика атмосфер. и океана.* 2012. Т. 25, № 9. С. 745–752.
16. Дергачев А.А., Ионин А.А., Кандидов В.П., Селезнев Л.В., Симицын Д.В., Сунчугашева Е.С., Шлёнов С.А. Филаментация фемтосекундных ИК- и УФ-импульсов при фокусировке в воздухе // *Квант. электрон.* 2013. Т. 43, № 1. С. 29–36.
17. Бочкарев Н.Н., Кабанов А.М., Степанов А.Н. Пространственная локализация области филаментации вдоль траектории распространения сфокусированного фемтосекундного лазерного излучения в воздухе // *Оптика атмосфер. и океана.* 2007. Т. 20, № 10. С. 863–867.
18. Henin S., Petit Y., Kasparian J., Wolf J.-P., Jochmann A., Kraft S.D., Bock S., Schramm U., Sauerbrey R., Nakaeima W.M., Stelmaszczyk K., Rohwetter P., Wöste L., Soulez C.-L., Mauger S., Bergé L., Skupin S. Saturation of the filament density of ultrashort intense laser pulses in air // *Appl. Phys. B.* 2010. N 100. P. 77–84. DOI: 10.1007/s00340-010-3941-x.
19. Béjot P., Bonacina L., Extermann J., Moret M., Wolf J.-P., Ackermann R., Lascoux N., Salamé R., Salmon E., Kasparian J., Bergé L., Champeaux S., Guet C., Blanchot N., Bonville O., Boscheron A., Canal P., Castaldi M., Hartmann O., Lepage C., Marmande L., Mazataud E., Mennerat G., Patisso L., Prevot V., Raffestin D., Riboldi J. 32 TW atmospheric white-light laser // *Appl. Phys. Lett.* 2007. V. 90, N 15. P. 151106-1–151106-4.
20. Couairon A., Myzyrowicz A. Femtosecond filamentation in transparent media // *Phys. Reports.* 2007. V. 441, N 2–4. P. 47–189.
21. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Степанов А.Н. Экспериментальные исследования филаментации мощного ультракороткого лазерного излучения с начальной геометрической расходимостью в воздухе // *Квант. электрон.* 2013. Т. 43, № 4. С. 350–356.
22. Апексимов Д.В., Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Степанов А.Н. Филаментация негауссовских лазерных пучков с различной геометрической расходимостью на атмосферной трассе // *Оптика атмосфер. и океана.* 2012. Т. 25, № 11. С. 929–935.
23. Daigle J.-F., Kosareva O.G., Panov N.A., 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, N 14. P. 3601–3606.
24. 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 В.А., Соколова Е.Б. Множественная филаментация коллимированных пучков Ti:Sapphire-лазера в воде // *Оптика атмосфер. и океана.* 2014. Т. 27, № 11. С. 957–960.

D.V. Apeksimov, O.A. Bukin, S.S. Golik, A.A. Zemlyanov, A.N. Iglakova, A.M. Kabanov, O.I. Kuchinskaya, G.G. Matvienko, V.K. Oshlakov, A.V. Petrov, E.B. Sokolova, E.E. Khoroshaeva. Spatial characteristics of the filamentation region of gigawatt laser pulses at their various focusing along an atmospheric path.

Results of experiments on controlling the position and length of the filamentation region of femtosecond laser pulses along an atmospheric path 30 m long using different initial spatial focusing are presented. A dependence of the filamentation region length on the values of numerical aperture of beam is derived. The obtained data on the filamentation region length and the amount of filaments are compared with the results of earlier experiments and data of other authors.