

Влияние аэрозоля на свойства поля фемтосекундного лазерного излучения в условиях филаментации на протяженной воздушной трассе. Экспериментальное и теоретическое исследования

А.Д. Булыгин[✉], А.В. Петров*

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

Поступила в редакцию 28.07.2022 г.;
после доработки 25.08.2022 г.;
принята к печати 26.10.2022 г.

Экспериментально и теоретически исследуется распространение мощного фемтосекундного лазерного излучения (МФЛИ) через аэрозоль. В ходе экспериментальных исследований показано влияние аэрозоля на характеристики области филаментации излучения. На основе экспериментальных данных найдена временная зависимость степени неоднородности поля МФЛИ, обусловленная распылением аэрозольного облака. Предложена теоретическая модель, позволяющая воспроизвести экспериментальные закономерности не только качественно, но и количественно. Для моделирования распространения МФЛИ используются плоские фазовые экраны, имитирующие рассеяние излучения на частицах аэрозоля, с эффективными оптическими параметрами, соответствующими разным значениям интенсивности излучения. Модель может быть полезна для исследования распространения МФЛИ на атмосферных трассах.

Ключевые слова: фемтосекундные лазерные импульсы, филаментация, аэрозоль, фазовый экран, уравнение Гельмгольца; femtosecond laser pulse, filamentation, aerosol, phase screen, Helmholtz equation.

Введение

Исследование распространения мощного фемтосекундного лазерного излучения (МФЛИ) в воздухе при наличии аэрозоля актуально, так как непосредственно связано с задачей зондирования атмосферы [1–5]. Однако изучение взаимодействия МФЛИ с водным аэрозолем крайне нетривиально, так как при его распространении в водных средах происходят сложные физические процессы [6, 7]. Превышение критической мощности излучения приводит к изменению его спектральных, временных и пространственных характеристик и формированию филаментов.

В последние два десятилетия большой интерес во всем мире проявляется к фемтосекундной оптике аэрозоля. Это связано с уникальными свойствами капли. Сферическая поверхность капли действует как линза, которая фокусирует лазерное излучение, что обуславливает особенности проявления различных нелинейно-оптических процессов (неупругое светорассеяние, оптический пробой, многофотонное возбуждение, вынужденное комбинационное рассеяние).

Изучению этих процессов в капле посвящено множество теоретических [6, 8] и экспериментальных работ [9–12].

Так, в [13] экспериментально исследовано уменьшение энергии гигаватного фемтосекундного лазерного пучка вдоль трассы распространения при различных концентрациях аэрозоля; особенности формирования профиля поля световой волны остались за пределами внимания авторов. В публикации [14] экспериментально и теоретически изучалось рассеяние назад фемтосекундного лазерного излучения на аэрозольном облаке. На основе согласованных эксперимента и численного расчета были найдены зависимости свойств рассеянного назад излучения от интенсивности падающего излучения для случая гауссова пучка. Надо отметить, что применение напрямую такого подхода к исследованию распространения МФЛИ в атмосфере мало оправдано, потому что, во-первых, нужно знать индикатрису рассеяния вперед (которую, в принципе, также можно найти методом прямого численного моделирования), а во-вторых, профиль пучка МФЛИ, распространяющегося в турбулентной среде, достаточно быстро перестает быть однородным и на относительно низкоинтенсивном фоне содержит случайные высокоинтенсивные области, в которых взаимодействие излучения с аэрозолем реализуется совсем иначе, чем в низкоинтенсивном режиме.

* Андрей Дмитриевич Булыгин (b.a.d@iao.ru); Алексей Вадимович Петров (awp@iao.ru).

В работе [15] моделировалось распространение вперед МФЛИ через аэрозольное облако, которое представлялось лишь как поглощающий слой, однако пренебрегалось эффектами рассеяния в нем и, как следствие, формированием дополнительных спекл-структур, обусловленных нелинейным рассеянием на аэрозоле.

Заметим, что решение полной нестационарной задачи по распространению МФЛИ в атмосфере на дистанции, на много порядков превосходящие размеры как капли, так и самого пучка, для реалистичных ситуаций в настоящее время технические невозможно (см., например, [16–18]). В таких случаях применяются упрощенные модели взаимодействия излучения с аэрозолем [17, 18].

Как показывают наши теоретические расчеты [19], капля аэрозоля в поле МФЛИ в зависимости от интенсивности излучения ведет себя либо почти как линейный рассеиватель (так называемая стратифицированная модель распространения) [17, 20–22], либо при превышении некоторого критического значения интенсивности w_{cr} на капле реализуется рассеяние как на поглощающем экране, что обусловлено эффектами многофотонной ионизации в воде. Это согласуется с работой [14], в которой прямым численным методом исследовалось формирование плазмы в капле, при этом смена режима взаимодействия капли с излучением происходила при $w_{cr} \approx 1\text{--}2 \text{ ТВ/см}^2$.

Диапазон значений w_{cr} при смене режима взаимодействия МФЛИ с каплей узок в сравнении с масштабами перепадов интенсивности в пучке излучения при развитии кубичной неустойчивости (два и более порядков величины). Это позволяет существенно упростить теоретическое описание распространения МФЛИ в аэрозоле, а именно смоделировать прохождение капель лазерным излучением как процесс рассеяния на экранах двух типов: прозрачные экраны и серые поглощающие экраны с заданными формами индикатрисы рассеяния. Второй способ моделирования можно рассматривать как обобщение стратифицированной модели.

Экспериментальные исследования распространения МФЛИ через аэрозоль

Эксперименты по изучению распространения МФЛИ в воздухе проводились в ИОА СО РАН на стенде «Фемтосекундная атмосферная оптика», включающем тераваттный источник лазерных импульсов, работающий в частотно-импульсном режиме, и также аппаратуру для измерения пространственных, временных и спектральных характеристик среды при воздействии на нее высокоинтенсивными импульсами.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. Лазерное излучение выходило из системы и попадало на поворотное зеркало 2, потом на телескоп 8, состоящий из дефокусирующего 7 и фокусирующего зеркал 6, в результате чего размер пучка увеличивался с 2,5 до 5 см. Затем излучение выходило на воздушную трассу длиной 70 м. Положение области филаментации выбиралось примерно посередине на трассе.

Пространственная фокусировка лазерного пучка осуществлялась с помощью телескопа путем изменения расстояния между дефокусирующим и фокусирующим зеркалами. Для базы телескопа 50,2 см и энергии в импульсе 30 мДж область филаментации формировалась на расстоянии 36,3 м от источника излучения и заканчивалась на расстоянии 56 м. Число филаментов составляло 2–3 шт. Пространственная структура пучка в воздухе после области филаментации регистрировалась с помощью CCD-камеры ANDOR-Clara 12 на расстоянии 70 м от источника излучения на экране 13 (рис. 2).

Перед областью филаментации на расстоянии 31–35 м от источника излучения с помощью дым-машины FOG 400 равномерно распылялся аэрозоль (ARV Fog liquid SD5). Средний диаметр частиц для дым-машин составляет от 1 до 5 мкм. Пространственная структура лазерного пучка регистрировалась на CCD-камеру с частотой 2 кадра в секунду на протяжении 30 с.

В течение 7 с после распыления аэрозоля, пока его концентрация была еще достаточно высокой,

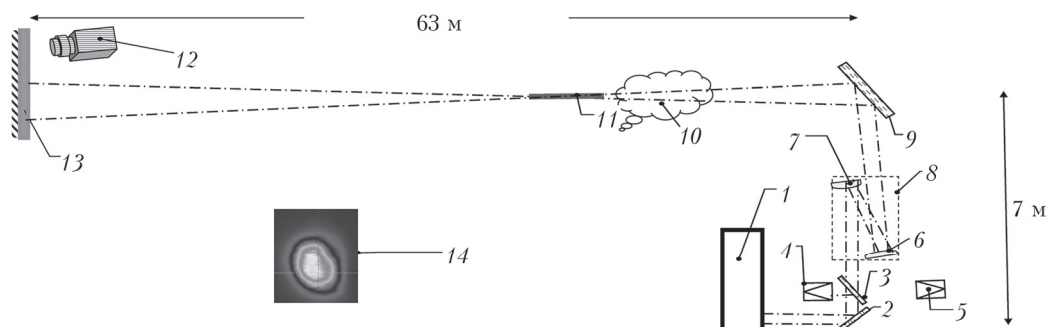


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – Ti:Sapphire-лазер (длительность импульса $\tau = 60$ фс, энергия в импульсе $E = 30$ мДж, частота следования импульсов $\nu = 10$ Гц, $\lambda = 800$ нм, $d_0 = 2,5$ см); 2, 3, 9 – поворотные зеркала; 4 – измеритель энергии импульса OPHIR-II; 5 – измеритель длительности импульса (автокоррелятор); 6 – фокусирующее зеркало ($f_2 = 100$ см); 7 – дефокусирующее зеркало ($f_1 = -50$ см); 8 – телескоп (база 50,2 см); 10 – аэрозольное облако; 11 – область филаментации; 12 – CCD-камера ANDOR-Clara E с объективом HELIOS-44M 2/58 с двумя нейтральными светофильтрами HC-8 перед ним; 13 – экран; 14 – исходный профиль лазерного пучка

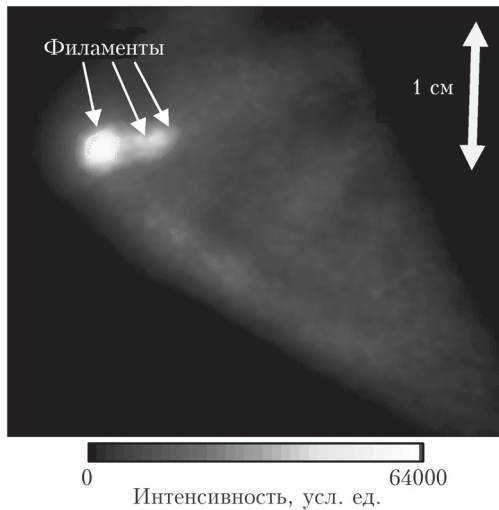


Рис. 2. Пространственная структура лазерного пучка на расстоянии 70 м от источника излучения после области филаментации в воздухе без аэрозоля

филаментация не наблюдалась. Спустя 7 с формировалась область филаментации длиной 1,7 м, с началом на расстоянии 47,3 м от источника излучения и концом на расстоянии 49 м. При этом формировался всего один филамент (яркая точка на рис. 3, б). Через 20 с после рассеивания аэрозоля пространственная структура лазерного пучка в измеряемой точке приобретала такой же вид, как на рис. 2, при этом начало и конец области филаментации формировались в том же месте, что и без аэрозоля.

Численное моделирование распространения МФЛИ

Нелинейное взаимодействие с воздушной средой может быть описано в одном из наиболее простых вариантов модели с высшими нелинейностями, рассматриваемой, например, в работе [23].

Выделим одну из пространственных координат z как координату эволюционного типа, так как вдоль нее происходит распространение излучения вперед. Получим однонаправленное уравнение Гельмгольца для комплексной огибающей светового поля

$$\partial_z^2 u = -(\partial_z^2 + \partial_y^2 + k_0 \epsilon_0) u - k_0 \delta \epsilon u. \quad (1)$$

Здесь u — комплексная огибающая светового поля в приближении медленно меняющейся амплитуды; k_0 — волновое число на несущей длине волны; ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость воздуха. Неоднородность диэлектрической проницаемости среды $\delta \epsilon$ обусловлена нелинейным самовоздействием излучения и наличием аэрозоля:

$$\delta \epsilon = \delta \epsilon_{NL} + \delta \epsilon_{aer},$$

где

$$\delta \epsilon_{NL} = \delta \epsilon_k |u|^2 + \delta \epsilon_{sat} |u|^{m-1},$$

$\delta \epsilon_k, \delta \epsilon_{sat}$ — коэффициенты при нелинейных добавках кубичного слагаемого и слагаемого, учитывающего высшие нелинейности порядка m , соответственно. Заметим, что, используя высшие нелинейности, можно моделировать плазменную дефокусировку, возникающую в среде, либо эффект насыщения керровской (кубичной) нелинейности. Нелинейные слагаемые позволяют моделировать филаментацию МФЛИ при распространении в воздухе.

Рассмотрим вклад $\delta \epsilon_{aer}$, учитываемый с помощью модели эффективных фазовых аэрозольных экранов. Как указывалось выше, мы моделируем рассеивающие частицы экранами двух типов: прозрачными и серыми поглощающими. Выбор типа экранов будет определяться w_{cr} , после которой начинает существенно проявляться нелинейное поглощение. Для воды выберем $w_{cr} \approx 10^{12}$ Вт/см². Если $w < w_{cr}$, то используем экраны для капли как рефракционной частицы с индикатрисой рассеяния из [17].

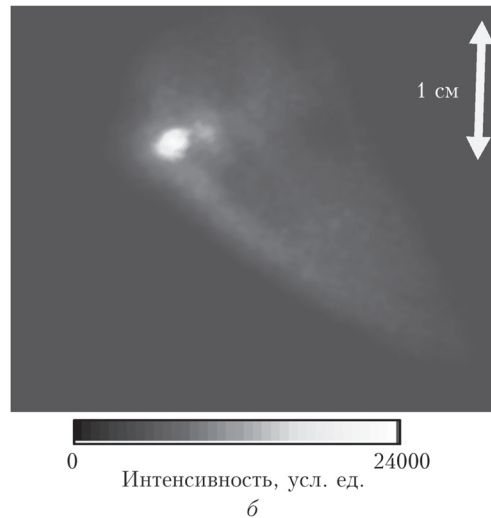
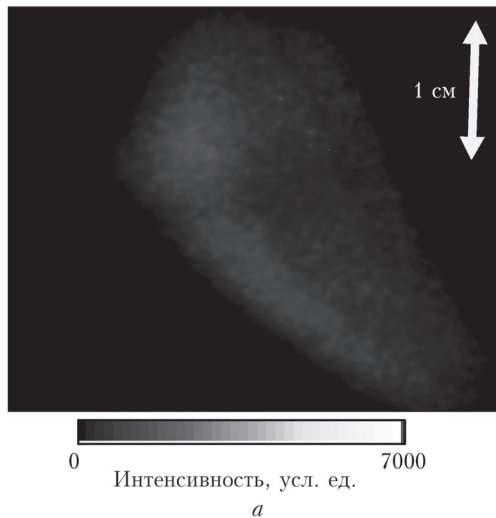


Рис. 3. Пространственная структура лазерного пучка после прохождения аэрозольного облака на расстоянии 70 м от источника излучения в разные моменты времени после распыления аэрозоля: а — 0 с; б — 7 с

Когда $w > w_{cr}$, используются серые экраны, свойства рассеяния на которых хорошо известны [24]. Пример генерации фазовых неоднородностей, моделирующих нелинейное рассеяние МФЛИ в слое аэрозоля, приведен на рис. 4.

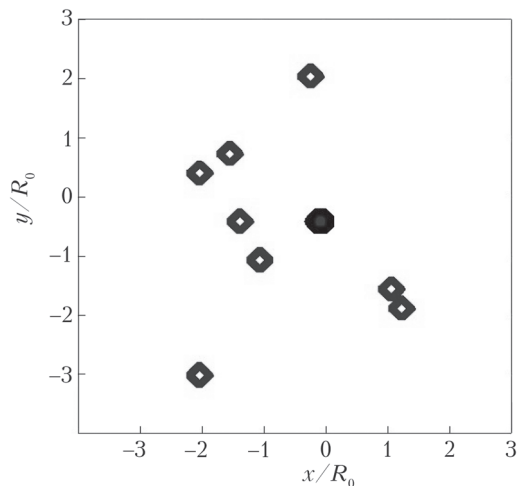


Рис. 4. Экран в области фокуса пучка излучения: черный рассеиватель формируется в области $w > 10^{12}$ Вт/см²; пустые символы соответствуют частицам аэрозоля, рассеивающим в допороговом режиме

Численные расчет осуществлялся на основе метода расщепления по физическим факторам. Рассматривался пучок с гауссовым начальным профилем интенсивности и параболической фокусировкой на дистанцию 40 м. Характеристики лазерного излучения были следующие: диаметр пучка $2R_0 = 2,5$ см; $\lambda = 0,8$ мкм; $E = 40$ мДж. Облако монодисперсного аэрозоля с частицами размером 5 мкм локализовалось на трассе распространения в пределах от 30 до 50 м от источника излучения.

На рис. 5 приведено полученное в численном эксперименте распределение интенсивности пучка, прошедшего зону филаментации.

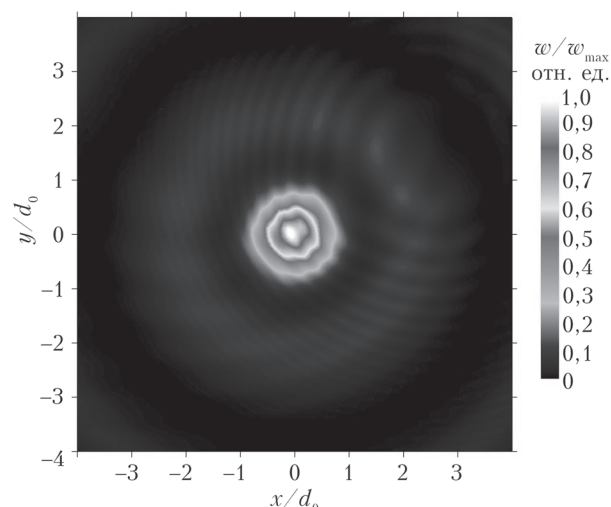


Рис. 5. Нормированное на максимальное значение поле плотности энергии излучения на расстоянии 70 м от его источника

Из рис. 5 видно, что распространение МФЛИ через слой аэрозоля сопровождается трансформацией его углового спектра, в том числе рефокусировкой, что доказывает крупномасштабная кольцевая структура. Учет нелинейного рассеяния на частицах аэрозоля обуславливает формирование высокочастотной части углового спектра и существенно влияет на формировании поля плотности энергии излучения при прохождении аэрозольного слоя. Таким образом, предложенная в работе физическая модель может быть использована для исследования распространения МФЛИ на атмосферных трассах.

В уравнение распространения излучения неявно входит концентрация аэрозоля. Так как при проведении экспериментов параметры аэрозольного облака известны лишь примерно, воспользуемся простым решением уравнения диффузии, описывающим динамику поля концентрации аэрозоля в форме расплывающегося во времени гауссова профиля с различными значениями коэффициента конвективной диффузии (порядка 10^{-3} м²/с [25]). Этот параметр, как и начальная концентрация аэрозоля, является подгоночным.

Условия согласования эксперимента и теоретического описания могут быть достигнуты, если ввести, например, интегральную характеристику

$$S^{(2)} = \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} w^2 dx dy}{\iint_{-\infty}^{\infty} w dx dy}, \quad (2)$$

где w — поле плотности энергии светового излучения, нормированное на свое среднее значение, которое в нашей простой стационарной модели отождествляется с величиной

$$w = \frac{|u|^2}{|u|_{\text{average}}^2}.$$

Такое отождествление позволяет установить соответствие между результатами эксперимента (процедура вычисления $S^{(2)}$ (2) из экспериментальных данных основана на оцифровке изображений, сделанных камерой, с последующим суммированием массива данных с нужными весами) и теоретической моделью. Величина $S^{(2)}$ имеет простой физический смысл: она характеризует степень неоднородности поля w . Очевидно, что в случае полей с сильными выбросами, которые реализуются при филаментации, эта величина будет больше, чем в случае однородного поля. Аналогичным образом можно исследовать и более высокие моменты поля [26], но на данном этапе столь детальное исследование полей нам представляется излишним.

На рис. 6 показаны результаты теоретических расчетов и экспериментальных измерений величины $S^{(2)}$.

Хорошее соответствие между теорией и экспериментом во многом обеспечивается благодаря достаточно большому числу свободных параметров —

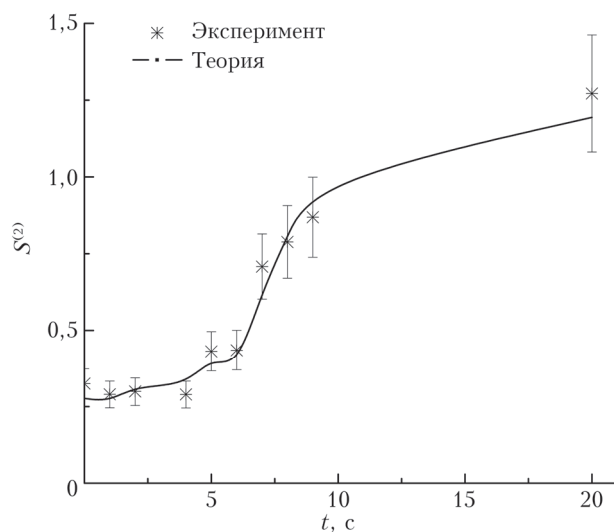


Рис. 6. Зависимость параметра неоднородности $S^{(2)}$ от времени

как диффундирующего аэрозоля, так и рассеивателей, — входящих в уравнение распространения. Такое соответствие доказывает, что предложенный подход к описанию распространения МФЛИ через аэрозоль правильный и может использоваться для моделирования распространения излучения на атмосферных трассах.

Заключение

Приведены результаты экспериментов по распространению фемтосекундного излучения в аэрозоле, в том числе в условиях формирования области филаментации. Показано влияние аэрозоля на параметры этой области (положение, длину, число филаментов). Обнаружено, что с течением времени в силу уменьшения концентрации аэрозольных частиц в воздухе перед областью филаментации происходит ее приближение к началу трассы и увеличение длины до размеров, наблюдаемых без аэрозоля, увеличивается число филаментов.

Измерено поле плотности энергии излучения на приемнике. Предложена интегральная характеристика, отражающая закономерности формирования этого поля на приемнике в зависимости от времени. На основе предложенной физической модели она была воспроизведена в численном эксперименте не только качественно, но и количественно. Предложенная модель распространения МФЛИ через аэрозоль может быть полезна для исследований на атмосферных трассах.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержки РНФ (проект № 21-12-00109) в части экспериментального исследования влияния аэрозоля на характеристики области филаментации на 100 м трассе, а также построение модели для параметра неоднородности и в рамках государственного задания ИОА СО РАН в части численного моделирования МФЛИ через аэрозоль.

Список литературы

1. Голик С.С., Лисица В.В., Майор А.Ю., Толстоногова Ю.С., Бабий М.Ю., Нагорный И.Г. Разработка методов лидарного зондирования атмосферы фемтосекундными импульсами, // Междунар. науч.-исслед. журн. 2018. Т. 75, № 9. С. 12–16.
2. Jing L. Application of laser remote sensing technology and super continuous spectrum laser // E3S Web Conf., 2020. V. 165, N 03002. P. 1–5. DOI: 10.1051/e3sconf/202016503002.
3. Alyami H.M., Becerra V.M., Hadjiloucas S. New opportunities for secure communication networks using shaped femtosecond laser pulses inducing filamentation processes in the atmosphere // J. Phys. Conf. Ser. 2013. V. 472. 012009 P. 1–6. DOI: 10.1088/1742-6596/472/1/012009.
4. Li J., Zhang H., Doerr D., Alexander D.R. Optical communications with femtosecond lasers // Proc. SPIE. 2006. V. 6399. P. 639908-1–639908-4. DOI: 10.1117/12.690618.
5. Alexander D., Rohlf M.L. Optical communications by frequency content of femtosecond laser pulses // Faculty Publications from the Department of Electrical and Computer Engineering. 2003. URL: <https://digitalcommons.unl.edu/electricalengineeringfacpub/518> (last access: 28.06.2022).
6. Землянов А.А., Гейнц Ю.Э. Пороги оптического пробоя прозрачной микрочастицы в нано-, пико- и фемтосекундном диапазонах длительностей лазерных импульсов // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17, № 4. С. 306–311.
7. Курилов М.В., Урюпин Д.С., Мажоров А.В., Горгуц С.Р., Волков Р.В., Косарев О.Г., Савельев А.Б. Исследование трансформации спектра фемтосекундного лазерного излучения при его филаментации в газовой среде // Опт. и спектроскоп. Т. 107. С. 459–465. DOI: 10.1134/S0030400X09090203.
8. Kasparian J., Rodriguez M., Mejean G., Yu J., Salmon E., Wille H., Bourayou R., Frey S., Andre Y.-B., Mysyrowicz A., Sauerbrey R., Wolf J.-P., Woste L. White-light filaments for atmospheric analysis // Science. 2003. V. 301, N 61. P. 61–64.
9. Апекумов Д.В., Букин О.А., Быкова Е.Е., Гейнц Ю.Э., Голик С.С., Землянов А.А., Землянов А.А., Ильин А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Ошляков В.К., Соколова Е.Б. Взаимодействие гигаваттных лазерных импульсов с жидкими средами. Часть 1. Взрывное вскипание крупных изолированных водных капель // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 7. С. 536–542; Apeksimov D.V., Bukin O.A., Bykova E.E., Geints Yu.E., Golik S.S., Zemlyanov A.A., Zemlyanov A.A., Ilyin A.A., Kabanov A.M., Matvienko G.G., Oshlakov V.K., Sokolova E.B. Interaction between gigawatt laser pulses and liquid media: Part 1. Explosive boiling of large individual water droplets // Atmos. Ocean. Opt. 2010. V. 23, N 6. P. 448–454.
10. Lindinger A., Hagen J., Socaci L.D., Bernhardt T.M., Woste L., Duft D., Leisner T. Time-resolved explosion dynamics of H₂O droplets induced by femtosecond laser pulses // Appl. Opt. 2004. V. 43, N 27. P. 5263–5269.
11. Courvoisier F., Boutou V., Favre C., Hill S.C., Wolf J.-P. Plasma formation dynamics within a water microdroplet on femtosecond time scales // Opt. Lett. 2003. V. 28, N 3. P. 206–208.
12. Favre C., Boutou V., Hill S.C., Zimmer W., Krenz M., Lambrecht H., Yu J., Chang R.K., Woeste L., Wolf J.-P. White-light nanosource with directional emission // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 89, N 3. 4 p.

13. Courvoisier F., Boutou V., Kasparian J., Salmon E., Méjean G., Yu J., Wolf J.-P. Ultraintense light filaments transmitted through clouds // *Appl. Phys. Lett.* 2003. V. 83, N 2. P. 213–215.
14. Efimenko E.S., Malkov Yu.A., Murzanev A.A., Stepanov A.N. Scattering of intense femtosecond laser radiation at water aerosol in backward direction // *Appl. Phys. B.* 2015. V. 121, N 4. P. 483–488.
15. Zemlyanov A.A., Geints Yu.E. Filamentation length of ultrashort laser pulse in the presence of aerosol layer // *Opt. Commun.* 2005. V. 258, N 1–3. P. 161–166.
16. Skupin S., Bergé L., Peschel U., Lederer F.L. Interaction of femtosecond light filaments with obscurants in aerosols // *Phys. Rev. Lett.* 2004. V. 93, N 2. P. 023901(1–4).
17. Silaeva E.P., Shlenov S.A., Kandidov V.P. Multifilamentation of high-power femtosecond laser pulse in turbulent atmosphere with aerosol // *Appl. Phys. B.* 2010. V. 101. P. 393–401.
18. Федотов И.В., Федотов А.Б., Жохов П.А., Ланин А.А., Савин А.Д., Желтиков А.М. Параметрическое преобразование и активное формирование спектра излучения суперконтинуума в поле интенсивных фемтосекундных лазерных импульсов // *Письма в ЖЭТФ.* 2008. Т. 88, № 3. С. 185–188.
19. Petrov A.V., Babushkin P.A., Bulygin A.D. Kuchinskaya O.I., Minina O.V., Formation of the scattering phase function in the interaction of ultrashort laser pulses with a drop in a nonlinear mode // 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE) 2020. P. 989–992.
20. Милицин В.О., Кузьминский Л.С., Кандидов В.П. Стратифицированная модель распространения мощного фемтосекундного лазерного излучения в атмосферном аэрозоле // *Оптика атмосфер. и океана.* 2005. Т. 18, № 10. С. 880–886.
21. Кандидов В.П., Милицин В.О. Формирование множества филаментов в мощном фемтосекундном лазерном импульсе в условиях дождя // *Оптика атмосфер. и океана.* 2006. Т. 19, № 9. С. 765–772.
22. Силаева Е.П., Кандидов В.П. Перенос филамента мощного фемтосекундного импульса в слое аэрозоля // *Оптика атмосфер. и океана.* 2009. Т. 22, № 2. С. 132–140; Silaeva E.P., Kandidov V.P. Propagation of a filament created by a strong femtosecond pulse through a layer of aerosol // *Atmos. Ocean. Opt.* 2009. V. 22, N 1. P. 26–34.
23. Булыгин А.Д., Землянов А.А. Вариационная формулировка уравнения Шредингера с нестационарной нелинейностью и его интегралы движения // *Дифференциальные уравнения.* 2018. Т. 54, № 10. С. 1420–1424.
24. Солимено С., Крозиньяни Б., ди Порто П. Дифракция и волноводное распространение оптического излучения: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 664 с.
25. Кудряшова О.Б., Коровина Н.В., Антонникова А.А., Ворожцов Б.И. Влияние физико-химических свойств распыляемого вещества на эволюцию мелкодисперсного аэрозоля // *Ползунов. вестн.* 2013. № 3. С. 114–117.
26. Antal T., Droz M., Gyurgyi G., Racz Z. 1/f noise and extreme value statistics // *Phys. Rev. Lett.* 2001. V. 87, N 21. P. 240601. DOI: 10.17877/DE290R-11566.

A.D. Bulygin, A.V. Petrov. Investigation of nonlinear propagation of powerful femtosecond laser radiation through aerosol.

The paper considers the propagation of high-power femtosecond laser radiation through aerosol. The propagation of high-power femtosecond laser radiation is simulated with flat phase screens that simulate the passage of radiation through an aerosol layer, which has effective optical parameters corresponding to different intensities during nonlinear interaction. In the course of experimental studies, the effect of aerosol on the position and length of the filamentation domain and the number of filaments was shown. With a decrease in the concentration of aerosol particles in the air in front of the filamentation domain, the filamentation domain approaches and its length increases to the same size as without aerosol, and the number of filaments also increases.