

## Распространение мощного ультракороткого лазерного импульса на горизонтальной атмосферной трассе

Д.В. Алексимов<sup>1</sup>, Ю.Э. Гейнц<sup>1</sup>, А.А. Землянов<sup>1</sup>, А.М. Кабанов<sup>1</sup>,  
Г.Г. Матвиенко<sup>1</sup>, А.Н. Степанов<sup>2</sup>, Н.С. Захаров<sup>3</sup>, С.В. Холод<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>2</sup>Институт прикладной физики РАН  
603600, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

<sup>3</sup>12-й центральный научно-исследовательский институт МО РФ  
г. Сергиев Посад

Поступила в редакцию 29.07.2009 г.

Представлены результаты экспериментов по изучению эволюции пространственного профиля и частотного спектра тераваттных ультракоротких импульсов Ti:Sa-лазера, распространяющихся на атмосферной трассе в режиме самофокусировки. Установлены зависимости энергетических характеристик лазерного излучения в плоскости приема от его начальной пиковой мощности. Установлена тенденция увеличения углового размера и спектральной ширины лазерного пучка при повышении его выходной мощности. Полученные закономерности качественно и количественно интерпретированы на основе численных расчетов, проведенных в рамках модели нестационарного самовоздействия ультракороткого светового импульса в воздухе. Выполнено сравнение полученных результатов с данными более ранних лабораторных экспериментов авторов по филаментации фокусированного лазерного фемтосекундного излучения.

*Ключевые слова:* атмосфера, ультракороткий лазерный импульс, самофокусировка, филаментация, плазма, суперконтинуум; atmosphere, ultra-short laser pulse, self-focusing, filamentation, plasma, supercontinuum.

### Введение

В середине 90-х гг. XX в. было выявлено экспериментально [1, 2], что при распространении мощного фемтосекундного импульса в воздухе при пиковой мощности, превышающей критическое значение  $P_c = 3,2$  ГВт, на оси светового пучка возникает филамент. В коллективной монографии [3] систематизированы практически все исследования явления самофокусировки, проведенные до 2005 г. Филамент представляет собой энергетическое состояние светового поля в нелинейной керровско-плазменной среде с характерными значениями пиковой интенсивности, геометрии и временного масштаба, которые определяются физическими свойствами среды. Средний диаметр светового филамента (в ближнем ИК-диапазоне) в атмосферном воздухе при нормальных условиях составляет 100 мкм, пиковая интенсивность  $10^{13} - 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>.

В лабораторных экспериментах [2, 5] была зарегистрирована филаментация фемтосекундного излучения в воздухе вблизи фокуса оптической системы. Длина филамента составляла десятки сантиметров. В [2] использовался лазер с длиной волны излучения  $\lambda_0 = 800$  нм, длительностью импульса 120 фс, диаметром пучка 4 мм, фокальная длина линзы равнялась 2 м, энергия в импульсе варьировалась от 1 до 5 мДж. В [5]  $\lambda_0 = 800$  нм, энергия в импульсе изменялась до 17 мДж, длительность импульса 80 фс, диаметр пучка 4 мм, фокусное расстояние зеркал — 86 и 125 см.

В [2] использовался лазерный пучок с платообразным распределением интенсивности в начальной плоскости, а в [5] — пучок, близкий к гауссовскому распределению интенсивности.

Средняя протяженность зоны филаментации на горизонтальной атмосферной трассе для излучения с тераваттной начальной пиковой мощностью в импульсе, как правило, составляет десятки метров [4].

В [6] экспериментально продемонстрировано, что положением зоны филаментации, а в ряде случаев ее продольным размером можно управлять путем chirпирования импульса. С филаментацией лазерного пучка связана генерация суперконтинуального излучения (см., например, [7]). Экспериментально установлено, что для исходного импульса фемтосекундного излучения с центральной длиной

---

\* Дмитрий Владимирович Алексимов (areximov@iao.ru); Юрий Эльмарович Гейнц (ygeints@iao.ru); Александр Анатольевич Землянов (zaa@iao.ru); Андрей Михайлович Кабанов (kam@iao.ru); Геннадий Григорьевич Матвиенко (mgg@iao.ru); Андрей Николаевич Степанов (step@ufp.appl.sci-nnov.ru); Николай Семенович Захаров; Сергей Владимирович Холод (serguei.kholod@inbox.ru).

волны  $\lambda_0 = 800$  нм спектр суперконтинуума захватывает УФ- и ближнюю ИК-области спектра [5, 8].

В натуральных экспериментах, проведенных в рамках международного проекта «Teramobile» с тераваттной лазерной системой, имеющей диаметр пучка излучения 3 см, центральную длину волны 800 нм, частоту следования импульсов 10 Гц и длительность импульса в диапазоне 100–600 фс, было зарегистрировано отражение излучения суперконтинуума от аэрозольного облака на высоте около 10 км [9]. Само широкополосное излучение было образовано при филаментации фемтосекундного лазерного импульса в нижних слоях тропосферы. Протяженность области филаментации не контролировалась. В экспериментах [10] белое свечение суперконтинуума использовалось для спектроскопических исследований ряда газов атмосферы. В теоретических работах [11–13] показана перспективность применения суперконтинуального излучения для дистанционного зондирования различных характеристик аэрозолей атмосферы.

Анализ публикаций по проблеме управления характеристиками фемтосекундного лазерного пучка в атмосфере [3] позволяет заключить, что экспериментальные и теоретические работы в области технологии формирования суперконтинуального свечения на трассе распространения, изучение его диаграммы направленности, а также спектральных свойств в зависимости от конфигурации и локализации филаментационных зон являются востребованными практикой атмосферно-оптических исследований.

В настоящей статье приведены результаты экспериментов по управлению характеристиками суперконтинуального свечения тераваттных фемтосекундных лазерных импульсов, распространяющихся на натурной трассе путем изменения положения зоны филаментации в канале пучка.

## 1. Схема и методика эксперимента

Структура и принципиальная схема тераваттной фемтосекундной лазерной установки, использовавшейся в атмосферных экспериментах, детально описаны в [15]. Задающий генератор представлял собой лазер на кристалле сапфира, допированного титаном (Ti:Sapphire) с пассивной синхронизацией мод за счет керровского механизма. В отличие от [15] была проведена модификация системы: увеличен диаметр кристалла Ti:Sa в оконечном усилителе (он составлял 15 мм), использовалась дифракционная решетка с большей стойкостью по сравнению с решетками, использованными ранее [15].

Измерение энергетики лазерного излучения на выходе фемтосекундного лазерного комплекса показало, что максимальная энергия в отдельном импульсе превосходила  $\sim 100$  мДж. Схема проведения эксперимента показана на рис. 1.

Энергия в лазерном импульсе изменялась с помощью поляризационного аттенуатора 2 и контролировалась калиброванным по пирозлектрическому датчику Molectron J25LP фотодиодом. Лазерный импульс имел временной профиль, близкий к гауссовскому. Длительность лазерного импульса  $t_0$  изменялась передвижением уголкового отражателя во временном компрессоре 3 в системе усиления частотно-модулированных импульсов. Минимальная длительность импульса соответствует оптимальной настройке (оптимальной длине) компрессора. Расстройка компрессора приводит к появлению у излучения частотного чирпа, т.е. линейной модуляции частоты заполнения внутри импульса, что соответствует уменьшению и увеличению расстояния между дифракционной решеткой и уголковым отражателем относительно оптимальной длины компрессора. Длительность спектрально ограниченного импульса  $t_0$  изменялась от 66 фс до 10 пс.

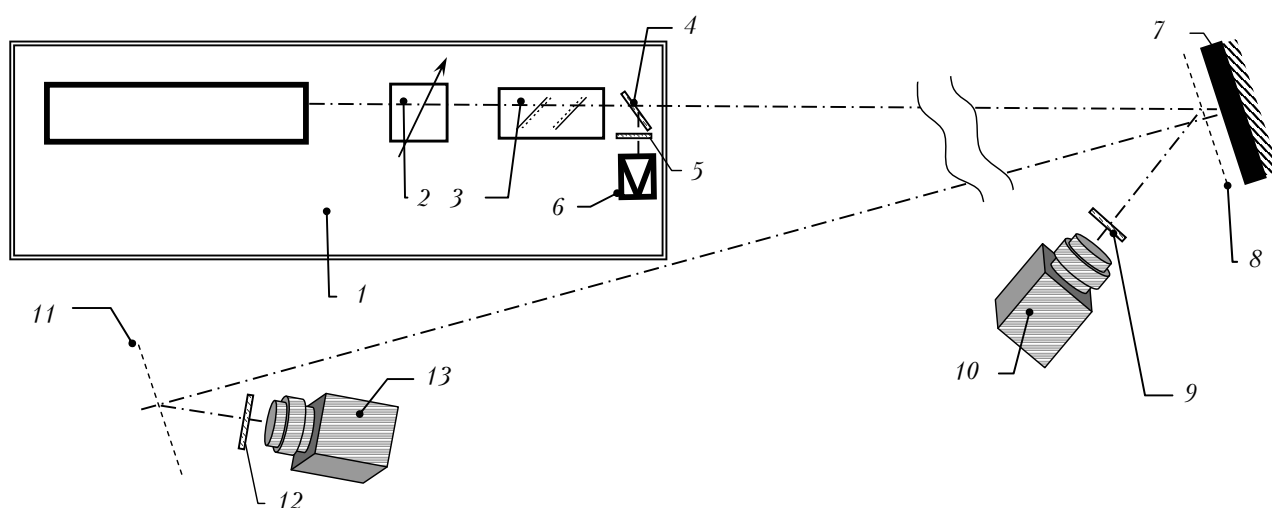


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – фемтосекундный лазерный комплекс; 2 – поляризационный аттенуатор; 3 – компрессор; 4 – полупрозрачное зеркало; 5, 9, 12 – светофильтры; 6 – фотодиод, измеряющий энергию в импульсе; 7 – глухое зеркало; 8, 11 – экраны; 10 – CCD-камера; 13 – фоторегистратор

Пространственный профиль плотности энергии пучка  $w(x, y)$  представлял собой сложное распределение с ярко выраженным абсолютным максимумом на краю (рис. 2). Масштабы зоны локализации плотности энергии пучка составляли  $2,4 \times 1,6$  см по уровню  $1/e^2$ .

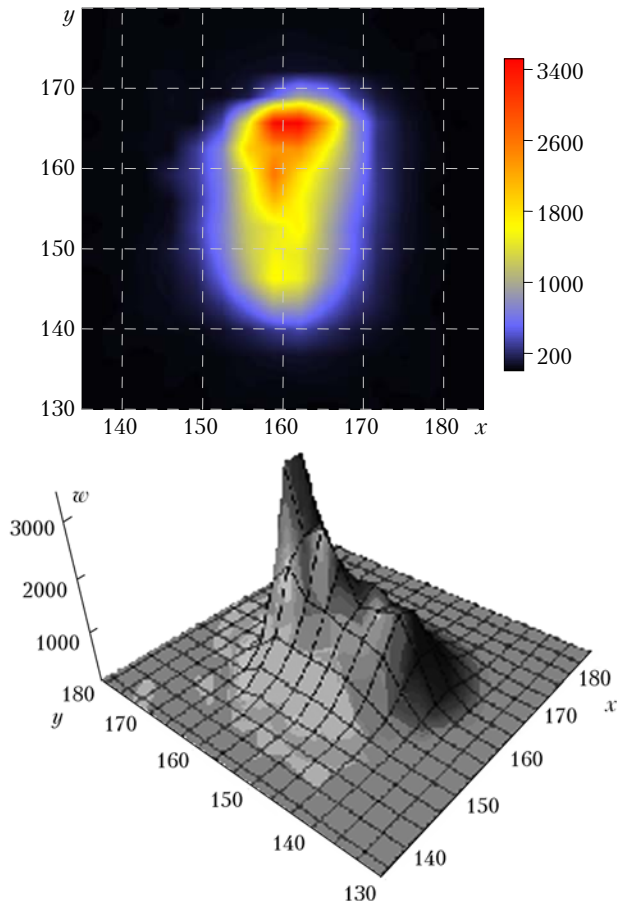


Рис. 2. Поперечное распределение плотности энергии  $w(x, y)$  (в произвольных единицах) в лазерном пучке при входе в атмосферную трассу. Масштаб деления по поперечным координатам составляет 0,7 мм

В экспериментах фиксировались пространственное распределение энергии по поперечному сечению лазерного пучка, а также спектральный состав излучения на горизонтальной атмосферной трассе длиной  $L = 85$  м. Структура пучка регистрировалась с помощью 12-битной CCD-камеры 10, а также фотоаппарата Sony DSC-H10 13 (см. рис. 1). Спектральные измерения излучения, испытывавшего самофокусировку и филаментацию на трассе, были выполнены при помощи спектрометра S150, расположенного вблизи экрана в конце трассы.

## 2. Результаты измерений пространственного распределения плотности энергии лазерного импульса

Регистрации поперечной структуры лазерного пучка на атмосферной трассе проводились с помо-

щью фотоаппарата Sony DSC-H10. Использование фотоаппарата вместо CCD-камеры позволило захватить большую площадь на освещаемом лазерным излучением экране за счет применения штатного объектива с большим полем зрения. Кроме того, спектральная чувствительность фотоаппарата по сравнению с CCD-камерой сильно сдвинута из инфракрасной области в видимый диапазон, что позволило наиболее уверенно зафиксировать появление коротковолнового крыла спектра суперконтинуального свечения.

Лазерный пучок в конце трассы при различной длительности импульса  $t_0$  показан на рис. 3.

Плавное варьирование длительности импульса при его фиксированной энергии эквивалентно движению по шкале пиковых мощностей, что приводит к соответствующему плавному изменению расстояния самофокусировки для мощного пучка в целом и, таким образом, к управлению нелинейной фокусировкой пучка вдоль трассы. На фотографиях видны яркая центральная область и окружающий эту область ореол, имеющий дифракционную природу. Анализ изображений указывает на то, что размер дифракционного ореола зависит от длительности лазерного импульса, или, что то же самое, от пиковой мощности.

Это означает, что плазменный канал формируется пучком непосредственно вблизи экрана и расходимость свечения излучения не успевает проявиться. С уменьшением длительности импульса размер ореола увеличивается (рис. 3, б, в).

Действительно, при уменьшении длительности импульса (увеличении пиковой мощности) начало плазменного канала отодвигается от экрана, тем самым дифракционное кольцо увеличивается в диаметре. При длительности импульса менее 2 пс наблюдается образование цветных колец на периферии ореола. Этот эффект обусловлен развитием множественной филаментации лазерного пучка, приводящей к более сильной фазовой самомодуляции.

На рис. 4 приведена зависимость усредненного диаметра ореола  $d$  от длительности лазерного импульса, измеряемого по самой дальней границе изображения, имеющего яркостный контраст 1:10, по двум взаимно перпендикулярным осям:  $d = a + b$  (см. рис. 3, з).

Видно, что при фиксированной длительности импульса размер ореола сокращается с уменьшением энергии (а значит, и мощности) в импульсе.

В области малых значений длительности импульса при варьировании начальной энергии и знака чирпирования средний размер ореола изменяется достаточно слабо ( $\sim 20$  см при  $E_0 > 51$  мДж). Это свидетельствует о достижении в отдельном импульсе высоких начальных пиковых мощностей излучения  $P_0$ , когда дистанция самофокусировки перемещается в самое начало трассы.

При заданной энергии в лазерном импульсе существует диапазон длительностей импульса (как при положительном, так и при отрицательном знаке чирпа) такой, что размер ореола будет минимальным.

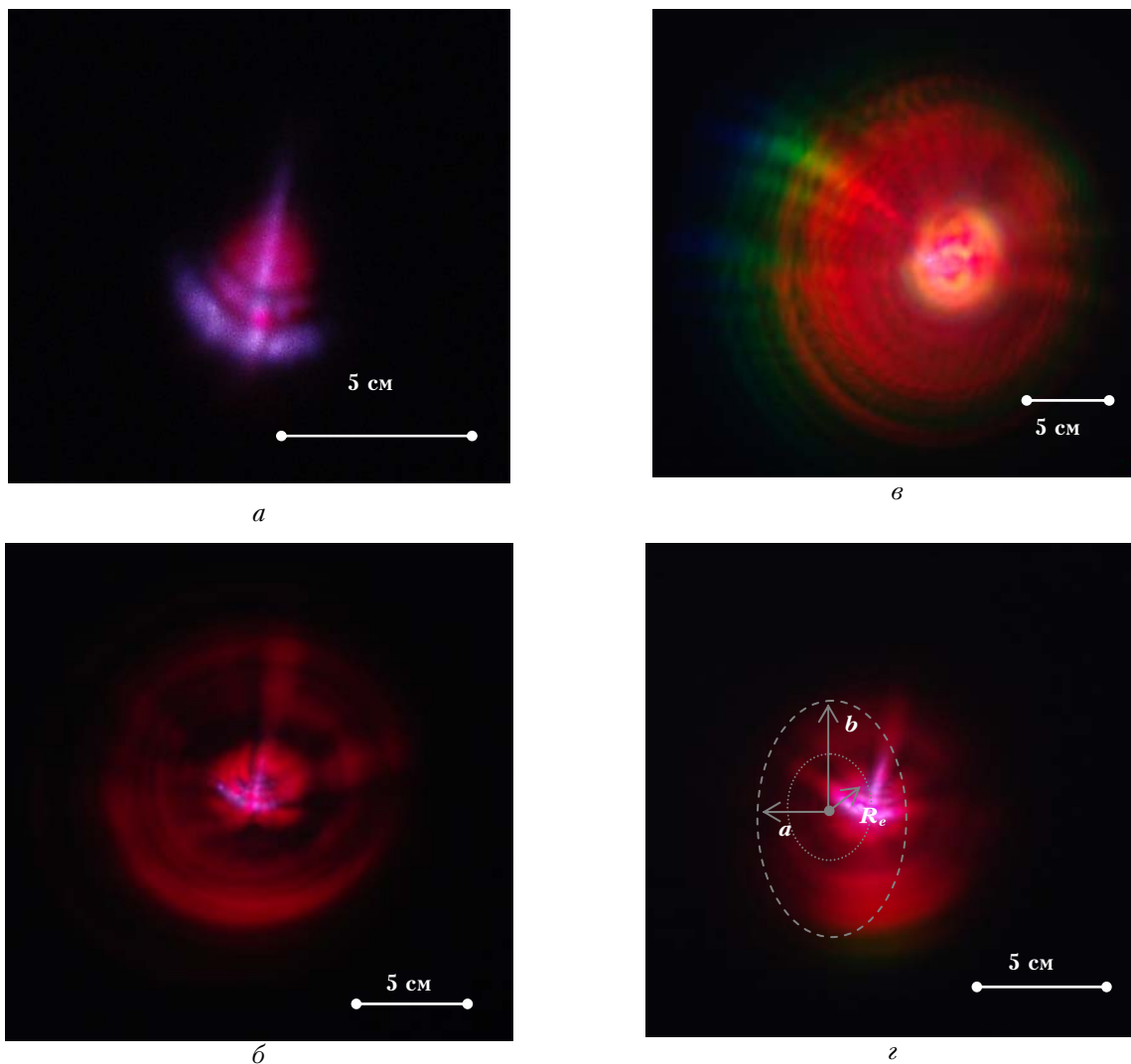


Рис. 3. Поперечное сечение лазерного пучка в конце атмосферной трассы длиной 85 м при начальной энергии лазерного излучения 85 мДж и длительности импульса 8 (а), 4,9 (б), 1,8 (в) и 4,4 пс (г); а–в – режим генерации с «положительным» чирпом, г – с «отрицательным» чирпом

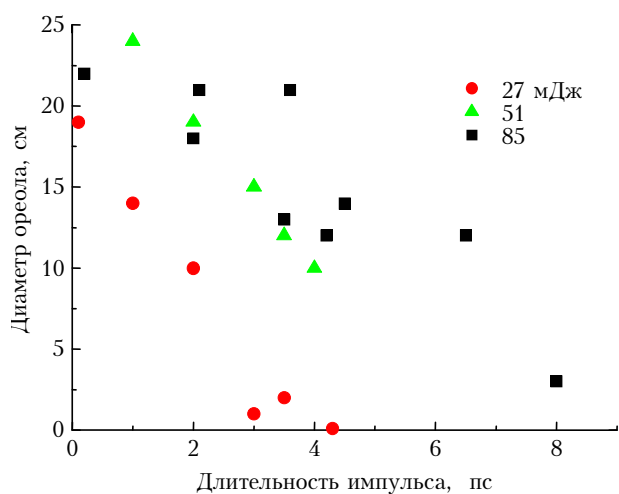


Рис. 4. Зависимость среднего размера ореола от длительности лазерного импульса при прохождении атмосферной трассы длиной 85 м при различной энергии в импульсе

Так, например, при  $E_0 = 27$  мДж размер ореола спадает практически до нуля при длительности импульса  $t_0 \approx 3$  пс. Уменьшение размера ореола означает, что филамент образуется в том месте, где расположен экран и проводятся измерения. Таким образом, полученные результаты подтверждают, что введением фазовой модуляции излучения можно управлять пространственным положением области образования филаментов, и указывают на возможность получения количественной информации об эволюции параметров лазерного пучка в целом при таком управлении.

### 3. Экспериментальные данные о спектрах суперконтинуального излучения

Самофокусировка мощного ультракороткого импульса в атмосфере приводит к эффекту частотной самомодуляции, что является причиной генерации

суперконтинуума. При таком эффекте изменяются полуширина спектрального распределения световой энергии в импульсе и его форма, которая имеет ярко выраженное «синее» крыло. Данный факт связан с сильной ионизацией среды и с возникновением в канале лазерного пучка плазмы.

Нами выполнены серии измерений для различных величин chirpa при двух выбранных значениях энергии в лазерном импульсе. Энергия в импульсе флуктуировала от выстрела к выстрелу в пределах 30% от среднего значения  $E_0$ , равного 30 мДж для первой и 50 мДж для второй серии измерений. Вид частотного спектра излучения также менялся от импульса к импульсу в достаточно широком диапазоне. Для дальнейшего анализа были выбраны результаты, полученные в пусках с максимальным уширением спектра. Примеры таких регистрируемых в эксперименте спектральных контуров лазерного импульса, испытавшего филаментацию, показаны на рис. 5.

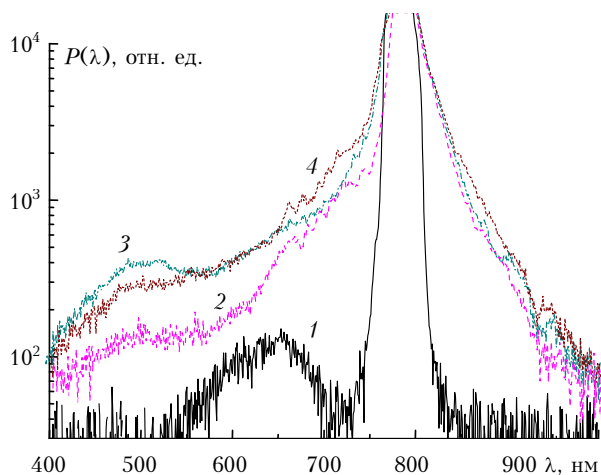


Рис. 5. Спектральные контуры лазерного импульса (экспериментальные данные) после прохождения атмосферной трассы длиной 85 м при различной начальной мощности в импульсе:  $P_0 = 5$  (1), 13 (2), 45 (3) и 76 ГВт (4)

Представленные спектры несут на себе все признаки фазовой самомодуляции ультракороткого излучения, происходящей в присутствии сильной плазменной нелинейности.

#### 4. Теоретическая интерпретация атмосферных экспериментов

Для обеспечения интерпретации экспериментальных данных по прохождению мощного фемтосекундного лазерного излучения через атмосферу на горизонтальной трассе проведены численные расчеты энергетических характеристик световых полей по методике, описанной в [14]. Другой задачей теоретических исследований являлось установление достоверности физической модели взаимодействия фемтосекундного лазерного излучения с воздушной средой, предложенной при интерпретации результатов лабораторных экспериментов [14]. Данная модель базировалась на нелинейном

уравнении Шредингера, где произведен учет основных факторов нестационарного самовоздействия: дифракция, дисперсия, нестационарная керровская нелинейность, многофотонная и туннельная ионизация воздуха [15, 17–22], потери энергии в плазме, эффект насыщения керровской нелинейности. Подтверждение справедливости такой модели является важным фактором, указывающим на достоверность проводимых ранее исследований распространения мощных лазерных пучков фемтосекундной длительности на протяженных атмосферных трассах.

Расчет проводили в безразмерных параметрах. Диапазон их изменения соответствовал физическим условиям задачи. В численных экспериментах использовали распределение интенсивности в начальной плоскости в полном соответствии с экспериментальными данными. Исследовали режим множественной филаментации импульса. Энергетические параметры импульса соответствовали условиям эксперимента. Анализировали экспериментальные реализации, каждая из которых соответствует конкретной метеорологической ситуации на трассе, для определения наиболее вероятного типа распределения плотности энергии в конце трассы.

Это экспериментально измеренное поперечное распределение плотности энергии в конце трассы сравнивали с соответствующим распределением, полученным из численных расчетов. При этом устанавливали соответствие видимых размеров (определяемых по декадному падению контраста экспериментально зарегистрированного изображения) области локализации световой энергии лазерного пучка в конце оптической трассы распределению энергии излучения в поперечном сечении пучка, полученного в результате численного моделирования. Такое соответствие говорит о том, что использованная физическая модель взаимодействия мощного фемтосекундного импульса с воздухом, апробированная на лабораторных экспериментальных данных, удовлетворительно описывает среднестатистические данные натурных экспериментов в части энергетической структуры пучка. В частности, для параметров лазерного импульса с энергией 85 мДж, длительностью 1,2 пс (отрицательный chirp) из численного эксперимента установлено, что эффективная длина плазменного канала составляла около 40 м.

Также для условий экспериментов были проведены расчеты эффективного радиуса фемтосекундного излучения, прошедшего слой атмосферы, равный 85 м, в зависимости от пиковой мощности в импульсе на входе в среду. Как показали расчеты, с увеличением относительной мощности наблюдается рост относительного эффективного радиуса, свидетельствующий о смещении координаты глобального нелинейного фокуса пучка в сторону источника при увеличении его мощности. Данный результат качественно соответствует измерениям дифракционного ореола, проведенным в натурных условиях.

Размер ореола коррелирует с эффективным радиусом пучка: малый размер ореола соответствует относительно малым значениям пиковой мощности, большой — большим.

Измерения спектров суперконтинуального излучения показали увеличение ширины спектра излучения при удалении точки нелинейного фокуса от приемника к источнику излучения. Ранее нами было установлено, что в лабораторных экспериментах ширина спектра излучения определяется эффективной длиной филаментированного участка лазерного пучка. На рис. 6 представлены экспериментальные данные по эффективной ширине спектра лазерного импульса, полученные в атмосферном эксперименте, и аналогичная зависимость для случая фокусированного распространения лазерного фемтосекундного пучка в лабораторных условиях [15].

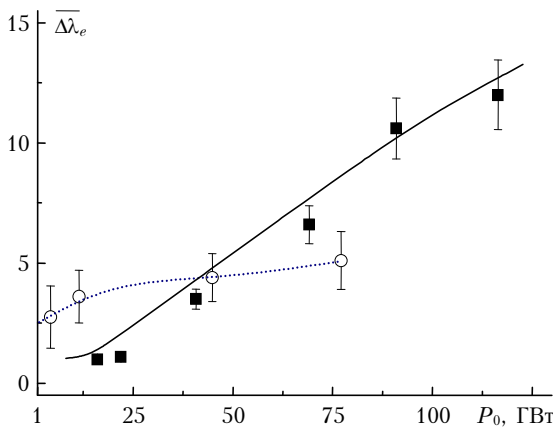


Рис. 6. Нормированная на начальную эффективная ширина спектрального контура лазерного импульса после прохождения атмосферной ( $\circ$ ) и лабораторной ( $\blacksquare$ ) трасс длиной 85 и 5 м соответственно в зависимости от начальной мощности в импульсе. Сплошная линия – расчет, пунктирная – сплайн-аппроксимация

Эффективная ширина спектра нормирована на начальное значение (согласно измерениям  $\Delta\lambda_e \approx 20$  нм). Экспериментальные значения  $\Delta\lambda_e$  получены путем оцифровки и обработки зарегистрированных спектров импульса по формуле

$$\Delta\lambda_e(z) = \left[ \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda P(\lambda)}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda P(\lambda)} \right]^{-1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda P(\lambda) (\lambda - \lambda_{gr})^2 \Bigg]^{1/2}.$$

Здесь  $\lambda_{gr}$  – центр тяжести распределения спектральной мощности;  $\lambda_1, \lambda_2$  – нижняя и верхняя границы длин волн в экспериментальных спектрах соответственно.

Сравнение теории и эксперимента указывает на качественное совпадение поведения представленной зависимости.

### Заключение

Полученные результаты подтверждают выводы о том, что путем chirpирования ультракороткого лазерного излучения можно управлять пространственным положением области филаментации пучка с субжоулевой энергией, а также спектральными характеристиками лазерного излучения, прошедшего атмосферную трассу в режиме самофокусировки.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 09-05-00738-а), ФЦП (г/к № ПЗ76 30.07.2009, г/к № 02.740.11.0083).

1. Braum A., Korn G., Liu X., Du D., Squier J., Mourou G. Self-channeling of high-peak-power femtosecond laser pulses in air // Opt. Lett. 1995. V. 20. Iss. 1. P. 73–75.
2. Nibbering E.T.J., Curley P.F., Grillon G., Prade B.S., Franco M.A., Salin F., Mysyrowicz A. Conical emission from self-guided femtosecond pulses in air // Opt. Lett. 1996. V. 21. Iss. 1. P. 62–64.
3. Self-focusing: Past and Present. R.W. Boyd, S.G. Lukishova, Y.R. Shen, Eds. Springer-IQEC, 2009. 605 p.
4. Luo Q., Hosseini S.A., Liu W., Gravel J.-F., Kosareva O.G., Panov N.A., Aközbek N., Kandidov V.P., Roy G., Chin S.L. Effect of beam diameter on the propagation of intense femtosecond laser pulses // Appl. Phys. B. 2005. V. 80. N 1. P. 35–38.
5. Бочкарев Н.Н., Землянов А.А., Землянов Ал.А., Кабанов А.М., Карташов Д.В., Курсанов А.В., Матвиенко Г.Г., Степанов А.Н. Экспериментальное исследование взаимодействия фемтосекундных лазерных импульсов с аэрозолем // Оптика атмосфер. и океана. 2004. Т. 17. № 12. С. 971–975.
6. Mechain G., Amico C.D., Andre Y.-B., Tzortzakis S., Franco M., Prade B., Mysyrowicz A., Couairon A., Salmon E., Sauerbrey R. Range of plasma filaments created in air by a multi-terawatt femtosecond laser // Opt. Commun. 2005. V. 247. N 1–3. P. 171–180.
7. Couairon A., Mysyrowicz A. Femtosecond filamentation in transparent media // Phys. Reports. 2007. V. 441. N 2–4. P. 47–189.
8. Courvoisier F., Boutou V., Kasparian J., Salmon E., Mejean G., Yu J., Wolf J.-P. Ultraintense light filaments transmitted through clouds // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 83. N 2. P. 213–215.
9. Rodriguez M., Bourayou R., Mejean G., Kasparian J., Yu J., Salmon E., Scholz A., Stecklum B., Eisloffel J., Laux U., Hatzes A.P., Sauerbrey R., Wöste L., Wolf J.-P. Kilometer-range nonlinear propagation of femtosecond laser pulses // Phys. Rev. E. 2004. V. 69. Iss. 3. P. 036607 (7 p.).
10. Rairoux P., Schillinger H., Niedermeier S., Rodriguez M., Ronneberger F., Sauerbrey R., Stein B., Waite D., Wedekind C., Wille H., Wöste L. Remote sensing of the atmosphere using ultrashort laser pulses // Appl. Phys. B. 2000. V. 71. N 4. P. 573–580.
11. Землянов А.А., Гейнц Ю.Э. Спектральные, энергетические и угловые характеристики суперконтинуума, формируемого фемтосекундным лазерным излучением в воздухе // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20. № 1. С. 40–47.
12. Матвиенко Г.Г., Веретенников В.В., Креков Г.М., Крекова М.М. Дистанционное зондирование атмосферных аэрозолей с использованием фемтосекундного лидара белого света. I. Численное моделирование // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 16. № 12. С. 1107–1114.
13. Землянов А.А., Гейнц Ю.Э., Алексимов Д.В. Рассеяние излучения суперконтинуума на сферических частицах при филаментации лазерного фемтосекундного импульса в воздушной среде // Оптика атмосфер. и океана. 2006. Т. 19. № 7. С. 588–592.
14. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Степанов А.Н. Самовоздействие острофокусированного фемтосекундного лазерного излучения в воздухе в режиме филаментации. Лабораторные и численные эксперименты // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22. № 2. С. 119–125.

15. Багаев С.Н., Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Пестряков Е.В., Степанов А.Н., Трунов В.И. Лабораторные и численные эксперименты по прохождению мощного лазерного фемтосекундного излучения через воздушную и капельную среды // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20. № 5. С. 413–419.
16. Kasparian J., Sauerbrey R., Chin S.L. The critical laser intensity of self-guided light filaments in air // Appl. Phys. B. 2000. V. 71. N 6. P. 877–879.
17. Brabec T., Krausz F. Nonlinear optical pulse propagation in the single-cycle regime // Phys. Rev. Lett. 1997. V. 78. Iss. 17. P. 3282–3285.
18. Переломов А.М., Попов В.С., Терентьев М.В. Ионизация атомов в переменном электрическом поле // Ж. эксперим. и теор. физ. 1966. Т. 50. Вып. 5. С. 1393–1397.
19. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А. Режим нестационарного самовоздействия острофокусированного мощного фемтосекундного лазерного импульса в воздухе // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21. № 9. С. 793–802.
20. Blow K.J., Wood D. Theoretical description of transient stimulated Raman scattering in optical fibers // IEEE J. Quantum Electron. 1989. V. 25. Iss. 12. P. 2665–2673.
21. Землянов А.А., Гейнц Ю.Э. Эволюция эффективных характеристик лазерного излучения фемтосекундной длительности при самовоздействии в газовой среде // Оптика и спектроскопия. 2008. Т. 104. № 5. С. 853–865.
22. Землянов А.А., Гейнц Ю.Э. Интегральные параметры мощного фемтосекундного лазерного излучения при филаментации в воздухе // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18. № 7. С. 574–579.

*D.V. Apeksimov, Yu.E. Geints, A.A. Zemlyanov, A.M. Kabanov, G.G. Matvienko, A.N. Stepanov, N.S. Zakharov, S.V. Kholod.* **Propagation of the high power ultrashort lasers pulse on atmospheric path.**

The results of experiments on the study of the evolution of the spatial profile and frequency spectrum of sub-terawatt ultra-short Ti:Sapphire pulses, propagating along atmospheric path in self-focusing regime, are presented. The dependences of laser radiation energy characteristics in the receiving plane on its initial peak power are determined. It is found that angular size and spectral width of the laser pulse tend to increase during its output power increasing. The regularities obtained are qualitatively and quantitatively interpreted based on numerical simulations performed in the framework of the model of nonstationary self-action of ultra-short light pulse in the air. The results obtained are compared with the data of previous authors' laboratory experiments on the focused femtosecond laser radiation filamentation.