

ОПТИКА СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД

УДК 535.325 530.182 53.093

Пространственно-временные характеристики фемтосекундного лазерного импульса при самофокусировке в двухкомпонентной среде

В.К. Ошлаков, П.А. Бабушкин, Г.Г. Матвиенко*

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

Поступила в редакцию 22.03.2021 г.

Предложена модель зависимости показателя преломления двухкомпонентной среды распространения лазерного импульса на примере смеси сухого воздуха и водяного пара. Ее параметры связаны с физическими характеристиками лазерного импульса и среды распространения. Для типичных значений объемной доли водяного пара в атмосфере приведены результаты расчетов показателя преломления и связанных с ним характеристик фемтосекундного лазерного импульса: дисперсионной длины, нелинейных коэффициентов, критической мощности, нелинейного фокуса.

Ключевые слова: фемтосекундный импульс, дисперсия, показатель преломления, нелинейный фокус, пары воды; femtosecond pulse, dispersion, refractive index, nonlinear focus, water vapor.

Введение

В задачах дистанционного зондирования проблема интерпретации результатов взаимодействия мощного фемтосекундного лазерного излучения с атмосферой остается актуальной. В процессе зондирования атмосферы энергия сверхкороткого импульса расходуется не только на поглощение и рассеяние, но и — при превышении пиковой мощностью критической величины — на самофокусировку, образование плазмы в нелинейном фокусе, генерацию суперконтинуального (СК) излучения — спектрального и пространственного перераспределения энергии импульса, другие нелинейно-оптические процессы. Использование эффекта генерации СК излучения (эффекта формирования внутриатмосферного источника излучения) позволяет проводить многочастотное зондирование в широком спектральном диапазоне, от УФ до ИК [1–5]. В связи с процессами тепло- и массопереноса, а также с турбулентностью в атмосфере реализуются условия для флуктуаций значений оптических характеристик на трассе зондирования. Исследованию взаимосвязи линейных и нелинейных пространственно-временных характеристик зондирующего импульса в зависимости от состава среды распространения посвящен ряд работ [6–10].

Цель настоящей работы — установление практической значимости учета зависимости пространственно-временных характеристик фемтосекундного

лазерного импульса в режиме самофокусировки от оптических характеристик двухкомпонентной среды, а именно от показателя преломления смеси сухого воздуха и паров воды.

Оценка показателя преломления и нелинейного коэффициента в неоднородной среде

При описании взаимодействия мощных импульсов со средой распространения важной характеристикой является критическая мощность $P_{кр}$. Если мощность фемтосекундного импульса $P_n(z)$ больше $P_{кр}$, то в сечении импульса становится значимой нелинейная добавка $n_2(\lambda)I$ к показателю преломления $n_0(\lambda)$ среды распространения, формируется нелинейный показатель преломления

$$n(\lambda) = n_0(\lambda) + n_2(\lambda)I, \quad (1)$$

(I — интенсивность импульса, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$; $n_2(\lambda)$ — нелинейный коэффициент, $\text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2$) и импульс находится в условиях самофокусировки [11–13].

Рассмотрим двухкомпонентную оптически неоднородную среду: смесь сухого воздуха и паров воды. Ограничим объем взаимодействия импульса со средой распространения $V^{\text{смесь}} = V^{\text{сухой воздух}} + V^{\text{пары воды}}$ объемом усеченного конуса, основаниями которого являются начальное и конечное, расположенное на расстоянии z от начального, сечения импульса. Компонентный состав характеризуем отнесенными объемными долями:

* Виктор Константинович Ошлаков (ovk@iao.ru); Павел Александрович Бабушкин (bra@iao.ru); Геннадий Григорьевич Матвиенко (matvienko@iao.ru).

$$p_{\text{пары воды}} = \frac{V_{\text{пары воды}}}{V_{\text{пары воды}} + V_{\text{сухой воздух}}},$$

$$p_{\text{сухой воздух}} = \frac{V_{\text{сухой воздух}}}{V_{\text{пары воды}} + V_{\text{сухой воздух}}}, \quad (2)$$

которые можно считать оценками вероятности взаимодействия импульса с компонентами смеси в заданном объеме. Следовательно, для двухкомпонентной среды $p_{\text{сухой воздух}} = 1 - p_{\text{пары воды}}$. Используя термин «сухой воздух», полагаем постоянным состав сухого воздуха (N_2 , O_2 , Ar) [6, 8]. Далее используем сокращенную форму записи «воздух» вместо «сухой воздух».

С учетом (2) показатель преломления смеси представим в виде

$$n_0^{\text{смесь}}(p, \lambda) = p_{\text{пары воды}} \left(n_0^{\text{пары воды}}(\lambda) - n_0^{\text{воздух}}(\lambda) \right) + n_0^{\text{воздух}}(\lambda). \quad (3)$$

При таком подходе на вариации пространственно-временных и оптических характеристик атмосферы влияют вариации содержания оптически активных примесей в конкретном измерительном объеме. Нелинейный показатель преломления (1), усредненный «по объему», будет зависеть от вероятности взаимодействия с компонентами смеси [11]:

$$n^{\text{смесь}}(p, \lambda) = n_0^{\text{смесь}}(p, \lambda) + n_2^{\text{смесь}}(p, \lambda) I =$$

$$= \left[p \left(n_0^{\text{пары воды}}(\lambda) - n_0^{\text{воздух}}(\lambda) \right) + n_0^{\text{воздух}}(\lambda) \right] +$$

$$+ \left[p \left(n_2^{\text{пары воды}}(\lambda) - n_2^{\text{воздух}}(\lambda) \right) + n_2^{\text{воздух}}(\lambda) \right] I. \quad (4)$$

Здесь $p = p_{\text{пары воды}}$, $n_2^{\text{смесь}}(p, \lambda) = \left[p \left(n_2^{\text{пары воды}}(\lambda) - n_2^{\text{воздух}}(\lambda) \right) + n_2^{\text{воздух}}(\lambda) \right]$ – нелинейный коэффициент, зависящий от вероятности взаимодействия с компонентами смеси (2).

Подход (2)–(4) легко распространяется на большее, чем 2, количество составных частей в объеме смеси и аналогичен известным подходам, использующим в качестве весовых коэффициентов массовые или объемные концентрации, парциальные давления [12–14].

Для оценок $n_2^{\text{пары воды}}(\lambda)$ использовалось следующее: если известна оценка $n_2^{\text{воздух}}(\lambda)$, то можно оценить $n_2^{\text{пары воды}}(\lambda)$ с помощью соотношения линейных, нелинейных коэффициентов и нелинейных восприимчивостей этих компонентов [15]. Оценка $n_2^{\text{пары воды}}(\lambda)$ получена нами в виде

$$n_2^{\text{пары воды}}(\lambda) = n_2^{\text{воздух}}(\lambda) \frac{n_0^{\text{воздух}}(\lambda)}{\left[n_0^{\text{воздух}}(\lambda) \right]^2 - 1} \frac{\left[n_0^{\text{пары воды}}(\lambda) \right]^2 - 1}{n_0^{\text{пары воды}}(\lambda)}. \quad (5)$$

В качестве известной оценки $n_2^{\text{воздух}}(\lambda)$ использовалось феноменологическое выражение [7]. Следует отметить, что полученное в [7] значение $n_2^{\text{воздух}}(\lambda) = 4 \cdot 10^{-23} \text{ м}^2/\text{Вт}$ для $\lambda = 800 \text{ нм}$, отличается от зна-

чений, полученных в [6] ($2,4 \cdot 10^{-23}$), [8] ($2,9 \cdot 10^{-23}$), [9] ($3,0 \cdot 10^{-23} \text{ м}^2/\text{Вт}$), но совпадает с ними по порядку величины.

Оценку значения $P_{\text{кр}}(\lambda)$ [16–18] в двухкомпонентной среде представим в виде

$$P_{\text{кр}}^{\text{смесь}}(p, \lambda) = \frac{3,77\lambda^2}{8\pi \left[n_0^{\text{смесь}}(p, \lambda) \right] \left[n_2^{\text{смесь}}(p, \lambda) \right]}. \quad (6)$$

Оценку длины нелинейного фокуса (формула Марбюрера [19]) для двухкомпонентной смеси представим в виде

$$L_{\text{нф}}^{\text{смесь}}(p, \lambda) = \frac{L_{\text{дифр}}^{\text{смесь}}(p, \lambda)}{2,725 \sqrt{\left[\sqrt{\left(\frac{P_{\text{н}}(0)}{P_{\text{кр}}^{\text{смесь}}(p, \lambda)} \right) - 0,852} \right]^2 - 0,022}}, \quad (7)$$

где $L_{\text{дифр}}^{\text{смесь}}(p, \lambda) = k r_0^2 = \frac{2\pi r_0^2}{\lambda} = n^{\text{смесь}}(p, \lambda) \frac{2\pi r_0^2}{\lambda_0}$ – дифракционная длина, k – волновой вектор, λ_0 – длина волны в вакууме, r_0 – радиус начального сечения пучка; $P_{\text{н}}(0)$ – начальная мощность импульса ($z = 0$).

Длина дисперсионного расплывания волнового пакета для двухкомпонентной среды запишется в виде

$$L_{\text{дисп}}^{\text{смесь}}(p, \lambda) = \frac{\tau_0^2}{2 \left| k_2^{\text{смесь}}(p, \lambda) \right|}, \quad (8)$$

где τ_0 – начальная длительность импульса; характеристика дисперсии групповой скорости в первом приближении теории дисперсии $k_2^{\text{смесь}}(p, \lambda) = \left(\frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2} \right)_{\omega_0} = \frac{\lambda^3}{2\pi c^2} \left(\frac{\partial^2 n^{\text{смесь}}(p, \lambda)}{\partial \lambda^2} \right)_{\lambda}$ [18], c – скорость света, ω – частота колебаний.

Для спектрально-ограниченного импульса (импульса без фазовой модуляции) длительность изменяется с расстоянием в соответствии с соотношением

$$\tau(p, z) = \tau(0) \sqrt{1 + \left(\frac{z}{L_{\text{дисп}}^{\text{смесь}}(p, \lambda)} \right)^2}. \quad (9)$$

На расстоянии $z = L_{\text{дисп}}^{\text{смесь}}(p, \lambda)$ длительность спектрально-ограниченного импульса увеличивается в $\sqrt{2}$ раз [16–18].

Результаты и обсуждение

Известно, что содержание водяных паров в атмосфере колеблется по объему от 0,5 до 4% и зависит в основном от широты. Эти значения определяют естественные границы изменения объемной доли паров воды (2) p в оценках «атмосферных» оптических и пространственно-временных характеристик коротко-импульсного лазерного излучения.

Зависимости $n(\lambda)$ для компонент смеси вычислялись по формуле Коши (температура – 0° , давление – 760 мм рт. ст.) [20]. Отметим, что оценки значения показателей преломления сухого воздуха и паров воды для $\lambda = 589,3$ нм отличаются в пятом знаке: 1,000292 и 1,000252 соответственно.

На рис. 1 приведены зависимости линейного показателя преломления от длины волны для сухого воздуха и смеси с объемными долями паров 0,005 и 0,04, вычисленные по (3).

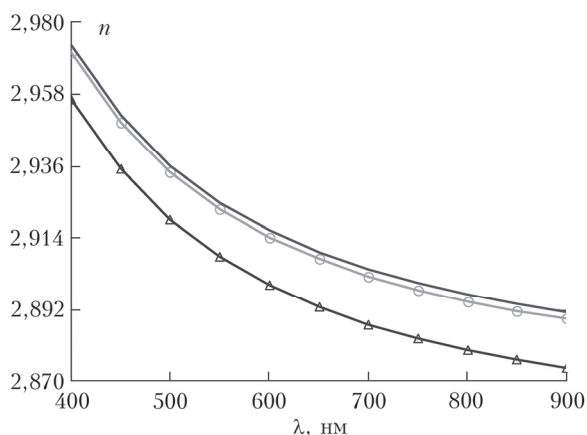


Рис. 1. Показатель преломления: сухого воздуха (сплошная кривая), смеси с объемной долей паров воды 0,005 (кривая с кружками) и 0,04 (кривая с треугольниками), в зависимости от длины волны

Ниже представлены результаты расчетов характеристик фемтосекундного импульса (6), (7) с учетом зависимостей показателя преломления от состава среды распространения (3), (4).

На рис. 2 представлены зависимости критической мощности импульса от длины волны и от объемной доли примеси в двухкомпонентной среде, вычисленные по (4), (6).

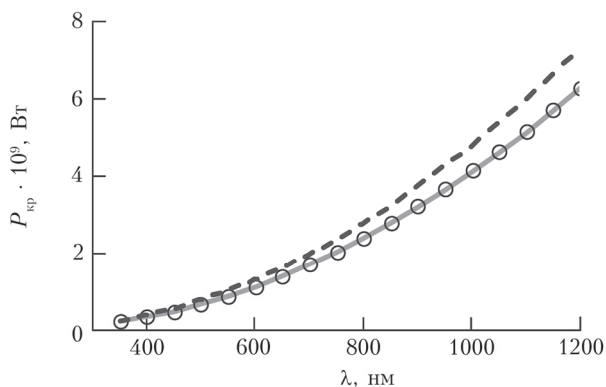


Рис. 2. Значения критической мощности для сухого воздуха ($p = 0$, сплошная линия), паров воды ($p = 1$, пунктир), смеси «воздух–пары воды» (кружки) ($p = 0,04$)

На рис. 3 показаны результаты вычисления нелинейного фокуса в двухкомпонентной среде в зависимости от вероятности наличия паров воды в объеме зондирования.

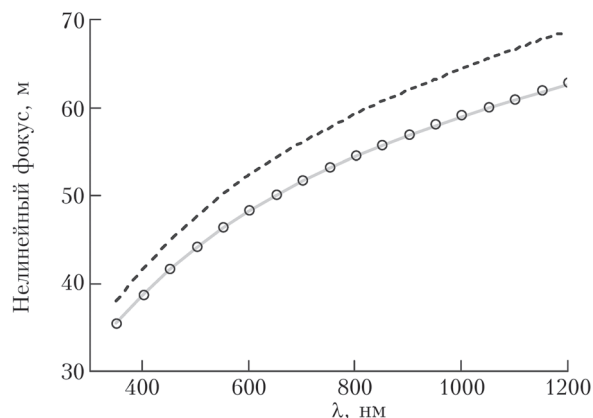


Рис. 3. Значения нелинейного фокуса для сухого воздуха ($p = 0$, сплошная линия), паров воды ($p = 1$, пунктирная кривая), смеси «воздух–пары воды» (кружки) с $p = 0,04$. В качестве исходного значения в (7) использовалось $P_{н(0)} = 200$ ГВт (длительность импульса – 50 фс, энергия импульса – 10 мДж)

На рис. 4 приведен график зависимости длины нелинейного фокуса (7) и дисперсионной длины (8) от длины волны для смеси сухого воздуха с парами воды.

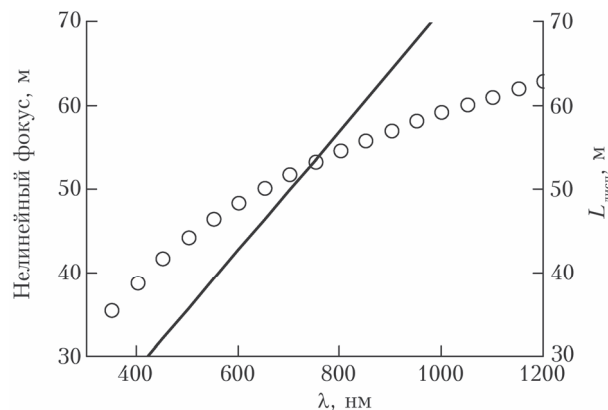


Рис. 4. Зависимости от длины волны нелинейного фокуса (кружки) и дисперсионной длины (сплошная линия) для смеси с $p = 0,04$ для импульса с длительностью 50 фс, энергией 10 мДж и начальным радиусом сечения 1,25 см

Для длительности импульса 50 фс и $\lambda = 800$ нм дисперсионная длина при объемной доле паров воды 4% в соответствии с (3), (4) и [21] равно приблизительно 57 м. Это значение сопоставимо со значением $L_{нф} \approx 55$ м для импульса с начальной энергией 10 мДж, начальным радиусом сечения 1,25 см и теми же значениями длины волны и длительности.

При распространении в атмосфере потери мощности на «предфиламентационном» участке (до нелинейного фокуса) происходят за счет рассеяния и поглощения. Линейный показатель ослабления (рассеяния) для $\lambda = 800$ нм при дальности видимости в атмосфере более 5 км принимает значение $\alpha \approx 2,4 \cdot 10^{-5}$ [22]. Мощность импульса на расстоянии дисперсионной длины $P_{н}(L_{дисп})$ за счет ослабле-

ния (рассеяния) уменьшится до $\sim 0,998 P_n(0)$. С учетом дисперсионного расплывания мощность импульса на расстоянии $L_{\text{дисп}}$ уменьшится до $\frac{0,998 P_n(0)}{\sqrt{2}} \approx$

$\approx 0,7 P_n(0)$. Если после выхода из зоны филаментации, потери в которой могут дополнительно составить 7–10% энергии импульса [23], мощность с учетом ослабления и дисперсионного расплывания все еще выше критической, самофокусировка продолжится с измененными значениями пространственно-временными характеристиками импульса, формируя следующий нелинейный фокус.

Из (7) следует, что для указанной длины волны длина нелинейного фокуса не превосходит дифракционную длину. На практике сечение выходного пучка мощных фемтосекундных систем ($\lambda = 800$ нм) имеет значение порядка нескольких сантиметров и дифракционная длина принимает значение в диапазоне до 2000 м. Экспериментальные результаты и теоретические исследования [24–26] показывают, что в зависимости от флуктуаций показателя преломления среды распространения, неоднородностей в распределении энергии и т.п. нелинейные фокусы могут формироваться не только на оси, но и в поперечном сечении импульса. Необходимо учесть, что формирование нелинейных фокусов может происходить как за счет изменения сечения импульса, длины волны, энергии и длительности на выходе лазерной системы, так и за счет использования нелинейных оптических элементов (чирпирование), создания фазовых аберраций в сечении импульса деформируемым зеркалом.

Заключение

Из представленных на рис. 1–4 зависимостей следует, что в пределах изменения объемной доли содержания паров воды 0,5–4% в нормальных атмосферных условиях:

- вариации объемной доли паров воды не оказывают существенного влияния на значение показателя преломления среды распространения;
- оценки критической мощности фемтосекундных импульсов для сухого воздуха и смеси «сухой воздух–пары воды» практически совпадают;
- оценки нелинейного фокуса фемтосекундных импульсов в сухом воздухе и в смеси с парами воды практически совпадают;
- оценки нелинейного фокуса и дисперсионной длины в реальной атмосфере могут быть близки для определенных значений начальной мощности импульса.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИОА СО РАН и при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-32-90188).

1. *Teramobile* [Электронный ресурс] URL: <http://teramobile.org/publis.html> (дата обращения: 25.03.2018).

2. Wille H., Rodriguez M., Kasparian J., Mordelain D., Yu J., Mysyrowicz A., Sauerbrey R., Wolf J.P., Wöste L. Teramobile: a mobile femtosecond-terawatt laser and detection system // *Eur. Phys. J.-Appl. Phys.* 2002. V. 20, N 3. P. 183–190.
3. Wöste L., Wedekind C., Wille H., Rairoux P., Stein B., Nikolov S., Werner Ch., Niedermeier S., Schillinger H., Sauerbrey R. Femtosecond atmospheric lamp // *Laser und Optoelektronik.* 1997. V. 29, N 5. P. 51–53.
4. Анексимов Д.В., Багаев С.Н., Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Куртичников А.В., Кустнев Ю.В., Креков Г.М., Крекова М.М., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Панина Е.К., Петров В.В., Пестряков Е.В., Пономарев Ю.Н., Суханов А.Я., Тихомиров Б.А., Трунов В.И., Уголтас С.Р., Фролов С.А., Худорожков Д.Г. Фемтосекундная атмосферная оптика / под ред. С.Н. Багаева, Г.Г. Матвиенко. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2010. 238 с.
5. Букин О.А., Бабий М.Ю., Голик С.С., Ильин А.А., Кабанов А.М., Колесников А.В., Кульчин Ю.Н., Луцица 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. 563–569.
6. Nibbering E.T.J., Grillon G., Franco M.A., Prade B.S., Mysyrowicz A. Determination of the inertial contribution to the nonlinear refractive index of air N₂, and O₂ by use of unfocused high-intensity femtosecond laser pulses // *J. Opt. Soc. Am. B.* 1997. V. 14. P. 650–660.
7. Федоров В.Ш., Кандидов В.П. Нелинейно-оптическая модель воздушной среды в задаче о филаментации фемтосекундных лазерных импульсов различной длины волны // *Опт. и спектроскоп.* 2008. Т. 105, № 2. С. 306–313.
8. Lorient V., Hertz E., Faucher O., Lavore B. Measurement of high order Kerr refractive index of major air components // *Opt. Express.* 2009. V. 17, N 16. P. 13429–13434.
9. Букин О.А., Быкова Е.Е., Гейнц Ю.Э., Голик С.С., Землянов А.А., Ильин А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Соколова Е.Б. Филаментация острогофокусированного ультракороткого лазерного излучения на 800 и 400 нм. Измерения нелинейного коэффициента преломления воздуха // *Оптика атмосф. и океана.* 2011. Т. 24, № 5. С. 351–358; Букин О.А., Быкова Е.Е., Geints Yu.E., Golik S.S., Zemlyanov A.A., Plyin A.A., Kabanov A.M., Matvienko G.G., Oshlakov V.K., Sokolova E.B. Filamentation of a sharply focused ultrashort laser pulse at wavelengths of 800 and 400 nm: measurements of the nonlinear index of air refraction // *Atmos. Ocean. Opt.* 2011. V. 24, N 5. P. 417–424.
10. Шленов С.А., Федоров В.Ю., Кандидов В.П. Филаментация фазово-модулированного фемтосекундного лазерного импульса на километровых трассах в турбулентной атмосфере // *Оптика атмосф. и океана.* 2007. Т. 20, № 4. С. 308–317.
11. Babushkin P.A., Burnashov A.V., Iglakova A.N., Matvienko G.G., Oshlakov V.K. Dispersion spreading of a femtosecond laser pulse in a mixture dry air – water vapor // *Proc. SPIE.* V. 11560. 2020. DOI: 10.1117/12.2575541.
12. Мануйлович Е.С., Астапенко В.А., Головинский П.А. Распространение ультракоротких лазерных импульсов в сухом и влажном воздухе // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 2. С. 105–112; Manuilovich E.S., Astapenko V.A., Golovinskii P.A. Propagation

- of ultrashort laser pulses in dry and humid air // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 3. P. 209–215.
13. *Owens J.C.* Optical refractive index of air: Dependence on pressure, temperature and composition // *Appl. Opt.* 1967. V. 6, N 1. P. 51–59.
 14. *Рудаков Г.А.* Химия и технология камфары. М.: Лесная пром-сть, 1976. 208 с.
 15. *Ахманов С.А., Никитин С.Ю.* Физическая оптика. М.: Изд-во МГУ, 1998. 656 с.
 16. *Шен И.Р.* Принципы нелинейной оптики / Под ред. С.А. Ахманова. М.: Наука, 1989. 550 с.
 17. *Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П.* Теория волн. 1979. 384 с.
 18. *Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин А.С.* Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 312 с.
 19. *Marburger J.H.* Self-focusing: Theory // *Prog. Quant. Electr.* 1975. V. 4. P. 35–110.
 20. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1973. 723 с.
 21. *Burnashov A.V., Babushkin P.A., Oshlakov V.K., Iglakova A.N.* Experimental study of the characteristics of the propagation of femtosecond radiation: results of the dispersion spreading // *Intern. Conf. Atom. Mol. Pulsed Lasers XIII*. 2018. DOI: 10.1117/12.2305321.
 22. *Орлов В.М., Самохвалов И.В., Креков Г.М., Мионов В.Л., Балин Ю.С., Банах В.А., Белов М.Л., Копытин Ю.Д., Лукин В.П.* Сигналы и помехи в лазерной локации. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.
 23. *Babushkin P.A., Burnashov A.V., Iglakova A.N., Kovaleva S.F., Medvedenko I.A.* Some results of the propagation of the high-power terawatt femtosecond laser radiation in different media // *Internat. Conf. Atom. Mol. Pulsed Lasers XII* // *Internat. Soc. Opt. Photon.* 2015. V. 9810. P. 98100K. DOI: 10.1117/12.2224928.
 24. *Apeksimov D.V., Geints Yu.E., Zemlyanov A.A., Kabanov A.M., Oshlakov V.K., Petrov A.V., Matvienko G.G.* Controlling TW-laser pulse long-range filamentation in air by a deformable mirror // *Appl. Opt.* 2018. V. 57, N 34. P. 9760–9769.
 25. *Апексимов Д.В., Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Иглакова А.Н., Кабанов А.М., Кучинская О.И., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Петров А.В.* Влияние фазовых аберраций на положение и протяженность области филаментации // *Оптика атмосфер. и океана*. 2018. Т. 31, № 12. С. 941–947; *Apeksimov D.V., Geints Yu.E., Zemlyanov A.A., Iglakova A.N., Kabanov A.M., Kuchinskaya O.I., Matvienko G.G., Oshlakov V.K., Petrov A.V.* The effect of phase aberrations on the position and length of the filamentation domain // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 2. P. 109–116. DOI: 10.15372/AOO20181201.
 26. *Апексимов Д.В., Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К.* Управление характеристиками множественной филаментации фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе // *Оптика атмосфер. и океана*. 2019. Т. 32, № 9. С. 717–725; *Apeksimov D.V., Geints Yu.E., Zemlyanov A.A., Kabanov A.M., Matvienko G.G., Oshlakov V.K.* Control of multiple filamentation of femtosecond laser pulses in air // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 1. P. 42–50. DOI: 10.15372/AOO20190905.

V.K. Oshlakov, P.A. Babushkin, G.G. Matvienko. Spatiotemporal characteristics of a laser pulse when focusing in a two-component medium.

A model of the dependence of the refractive index of a two-component medium of laser pulse propagation is suggested using the example of a mixture of dry air and water vapor. The model parameters are related to the physical characteristics of the laser pulse and propagation medium. The air refractive index and the related femtosecond laser pulse parameters (dispersion length, nonlinear coefficients, critical power, and nonlinear focus) are calculated for typical values of the volume fraction of water vapor in the atmosphere.