

Российская академия наук  
Сибирское отделение

# ОПТИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА

Том 27, № 10 октябрь, 2014

Научный журнал

Основан в январе 1988 года академиком В.Е. Зуевым

Выходит 12 раз в год

## Главный редактор

доктор физ.-мат. наук Г.Г. Матвиенко

## Заместители главного редактора

доктор физ.-мат. наук Б.Д. Белан,

доктор физ.-мат. наук Ю.Н. Пономарев

## Ответственный секретарь

доктор физ.-мат. наук В.А. Погодаев

## Редакционная коллегия

*Багаев С.Н.*, академик РАН, Институт лазерной физики (ИЛФ) СО РАН, г. Новосибирск, Россия;  
*Банах В.А.*, д.ф.-м.н., Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева (ИОА) СО РАН, г. Томск, Россия;  
*Белов В.В.*, д.ф.-м.н., ИОА СО РАН, г. Томск, Россия;  
*Букин О.А.*, д.ф.-м.н., Дальневосточная морская академия им. адмирала Г.И. Невельского, г. Владивосток, Россия;  
*Голицын Г.С.*, академик РАН, Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова (ИФА) РАН, г. Москва, Россия;  
*Еланский Н.Ф.*, чл.-кор. РАН, ИФА РАН, г. Москва, Россия;  
*Землянов А.А.*, д.ф.-м.н., ИОА СО РАН, г. Томск, Россия;  
*Кандидов В.П.*, д.ф.-м.н., Международный лазерный центр МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия;  
*Кулмала М. (Kulmala M.)*, проф., руководитель Отдела атмосферных наук кафедры физики, Университет г. Хельсинки, Финляндия;  
*Лукин В.П.*, д.ф.-м.н., ИОА СО РАН, г. Томск, Россия;  
*Михайлов Г.А.*, чл.-кор. РАН, Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия;  
*Павлов В.Е.*, д.ф.-м.н., Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул, Россия;  
*Панченко М.В.*, д.ф.-м.н., ИОА СО РАН, г. Томск, Россия;  
*Ражев А.М.*, д.ф.-м.н., ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия;  
*Тарасенко В.Ф.*, д.ф.-м.н., Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия;  
*Шабанов В.Ф.*, академик РАН, Красноярский научный центр СО РАН, г. Красноярск, Россия;  
*Шайн К. (Shine K.P.)*, член Английской академии наук, королевский профессор метеорологических и климатических наук, Департамент метеорологии, Университет г. Рединга, Великобритания;  
*Циас Ф. (Ciais P.)*, проф., научный сотрудник Лаборатории климатических наук и окружающей среды совместного научно-исследовательского подразделения Комиссариата атомной энергии и Национального центра научных исследований (НЦНИ) Франции, г. Жиф-сюр-Иветт, Франция

## Совет редколлегии

*Борисов Ю.А.*, к.ф.-м.н., Центральная аэрологическая обсерватория, г. Долгопрудный Московской обл., Россия;  
*Заворуев В.В.*, д.б.н., Институт вычислительного моделирования СО РАН, г. Красноярск, Россия;  
*Ивлев Л.С.*, д.ф.-м.н., Научно-исследовательский институт физики им. В.А. Фока при СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия;  
*Игнатьев А.Б.*, д.т.н., ГСКБ концерна ПВО «Алмаз-Антей» им. академика А.А. Расплетина, г. Москва, Россия;  
*Кабанов М.В.*, чл.-кор. РАН, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск, Россия;  
*Михалев А.В.*, д.ф.-м.н., Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия;  
*Якубов В.П.*, д.ф.-м.н., Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

**Зав. редакцией** С.Б. Пономарева

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
Россия, 634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Адрес редакции: 634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1  
Тел. (382-2) 49-24-31, 49-19-28; факс (382-2) 49-20-86  
E-mail: psb@iao.ru  
<http://www.iao.ru>

© Сибирское отделение РАН, 2014

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, 2014

# СОДЕРЖАНИЕ

Том 27, № 10 (309), с. 849–936

октябрь, 2014 г.

## СПЕКТРОСКОПИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

- Гейнц Ю.Э., Землянов А.А. Влияние молекулярного поглощения приземной атмосферной трассы на характеристики области филаментации мощного излучения CO<sub>2</sub>-лазера ..... 851
- Тихомиров Б.А. Изменение сдвига центра линии поглощения H<sub>2</sub>O 694,380 нм в зависимости от давления водорода. .... 859

## ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

- Коршунов В.А., Зубачев Д.С., Мерзляков Е.Г., Jacobi Ch. Результаты определения аэрозольных характеристик средней атмосферы методом двухволнового лидарного зондирования и их сопоставление с измерениями метеорного радиоэхо ..... 862
- Поддубный В.А., Наговицына Е.С. Оценка погрешностей и верификация метода флюид-локации атмосферы ..... 869
- Землянов А.А., Булыгин А.Д. Колебания заряженной водной капли в условиях сильных деформаций в приближении эллипсоидальной формы поверхности ..... 878
- Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л., Фёдоров В.А. Структурные функции компонент вектора ветра над неоднородной подстилающей поверхностью ..... 882
- Варламова Е.В., Соловьев В.С. Исследование вариаций индекса NDVI тундровой и таежной зон Восточной Сибири на примере территории Якутии ..... 891
- Комаров В.С., Нахтигалова Д.П., Ильин С.Н., Лавриненко А.В., Ломакина Н.Я. Климатическое районирование территории Сибири по режиму общей и нижней облачности как основа для построения локальных облачных моделей атмосферы. Часть 1. Методические основы ..... 895
- Комаров В.С., Нахтигалова Д.П., Ильин С.Н., Лавриненко А.В., Ломакина Н.Я. Климатическое районирование территории Сибири по режиму общей и нижней облачности как основа для построения локальных облачных моделей атмосферы. Часть 2. Результаты климатического районирования ..... 899
- Юсупов Д.В., Радомская В.И., Павлова Л.М., Трутнева Н.В., Ильенко С.С. Тяжелые металлы в пылевом аэрозоле северо-западной промышленной зоны г. Благовещенска (Амурская область) ..... 906

## АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

- Банах В.А., Смалихо И.Н., Фалиц А.В., Белан Б.Д., Аршинов М.Ю., Антохин П.Н. Совместные радиозондовые и доплеровские лидарные измерения ветра в пограничном слое атмосферы ..... 911
- Лушев В.П., Литвинов А.В., Демидов Н.Ю., Козлов С.Н., Рейно В.В. Динамика подъема облака продуктов сгорания при огневой утилизации зарядов твердотопливных энергоустановок на открытом стенде. Процессы и их идентификация. .... 917

## АДАПТИВНАЯ И ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОПТИКА

- Лавринов В.В., Лавринова Л.Н., Туев М.В. Численное исследование алгоритма вычисления напряжений, управляющих гибким зеркалом, в зависимости от представления информации о волновом фронте ..... 925
- Артыщенко С.В., Головинский П.А., Чернов Р.А. Восстановление фазы волнового фронта с использованием комплексной нейронной сети. .... 932

## CONTENTS

Vol. 27, No. 10 (309), p. 849–936

October 2014

### Spectroscopy of ambient medium

- Geynts Yu.E., Zemlyanov A.A.** Influence of molecular absorption of the ground atmospheric path on characteristics of the filamentation range of high-power CO<sub>2</sub>-laser radiation ..... 851
- Tikhomirov B.A.** Behavior of the position of 694.380 nm water vapor absorption line in dependence on the hydrogen pressure..... 859

### Optical models and databases

- Korshunov V.A., Zubachev D.S., Merzlyakov E.G., Jacobi Ch.** Results of determination of the middle atmosphere aerosol characteristics by means of two wavelengths lidar sensing and comparison with meteor radio echo measurements ..... 862
- Poddubny V.A., Nagovitsyna E.S.** Estimation of errors and verification of the fluid location of atmosphere method ... 869
- Zemlyanov A.A., Bulygin A.D.** Vibrations of a charged water drop in the conditions of strong deformations in approach of the ellipsoidal form of the surface..... 878
- Gladkikh V.A., Nevzorova I.V., Odintsov S.L., Fedorov V.A.** Structure functions of wind velocity components over inhomogeneous underlying surface ..... 882
- Varlamova E.V., Solovyev V.S.** Study of NDVI variations at tundra and taiga areas of Eastern Siberia (Yakutia) .... 891
- Komarov V.S., Nakhtigalova D.P., Il'in S.N., Lavrinenko A.V., Lomakina N.Ya.** Climatic zoning of the Siberia territory according to the total and lower cloudiness conditions as a basis for construction of local cloud atmosphere models. Part 1. Methodical bases ..... 895
- Komarov V.S., Nakhtigalova D.P., Il'in S.N., Lavrinenko A.V., Lomakina N.Ya.** Climatic zoning of the Siberia territory according to the total and lower cloudiness conditions as a basis for construction of local cloud atmosphere models. Part 2. The results of climatic zoning ..... 899
- Yusupov D.V., Radomskaya V.I., Pavlova L.M., Trutneva N.V., Il'enok S.S.** Heavy metals in dust aerosols on the northwest industrial area of Blagoveshchensk (Amur region)..... 906

### Optical instrumentation

- Banakh V.A., Smalikho I.N., Falits A.V., Belan B.D., Arshinov M.Yu., Antokhin P.N.** Joint radiosonde and Doppler lidar measurements of wind in the atmospheric boundary layer ..... 911
- Lushev V.P., Litvinov A.V., Demidov N.Yu., Kozlov S.N., Reyno V.V.** Lift dynamics of a cloud of combustion products at fire utilization of charges of solid-fuel power plants at an open test bench. Processes and their identification..... 917

### Adaptive and integral optics

- Lavrinov V.V., Lavrinova L.N., Tuev M.V.** Numerical simulation of the algorithm to compute the voltage control for the flexible mirror depending on the representation of information on the wavefront ..... 925
- Artyschenko S.V., Golovinski P.A., Chernov R.A.** Reconstruction of the wavefront phase with the use of a complex neural network ..... 932

**ОПТИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА. Т. 27, № 10. 2014**

Редактор **А.В. Лисевич**  
Технический редактор **Н.С. Заварзина**  
Корректоры **М.А. Андросова, Г.Г. Иванова**  
Верстка оригинала-макета **Л.К. Болотовой, Т.В. Исаевой**

---

Лицензия ИД № 03420 от 05.12.2000 г.  
Сдано на верстку 4.07.2014 г. Подписано к печати 25.09.2014 г. Формат 60 × 84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Печать офсетная.  
Бумага офсетная. Гарнитура «Кудряшов». Усл. печ. л. 10,2. Уч.-изд. л. 9,7.  
Изд. № 309. Тираж 250 экз. Заказ № 59.  
Журнал зарегистрирован в Комитете РФ по печати 5.04.96 г. Регистрационный № 01337.

---

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, 634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1.  
Тираж отпечатан в типографии ИОА СО РАН.  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1.

## СПЕКТРОСКОПИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 530.182.551.510.42+535.621.33

# Влияние молекулярного поглощения приземной атмосферной трассы на характеристики области филаментации мощного излучения CO<sub>2</sub>-лазера

Ю.Э. Гейнц, А.А. Землянов\*

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

Поступила в редакцию 14.02.2014 г.

Рассмотрены теоретические аспекты самофокусировки и филаментации мощного импульсного излучения CO<sub>2</sub>-лазера с несущей длиной волны 10,6 мкм в атмосферном воздухе. В численной модели проведен учет селективного молекулярного поглощения оптической трассы. Показано, что в условиях суперконтинуального уширения частотного спектра лазерного импульса, происходящего в результате его самовоздействия, атмосферное поглощение дестабилизирует сам процесс филаментации, искажая частотный спектр излучения и сокращая длину формируемого в канале пучка плазменного канала.

**Ключевые слова:** ультракороткое лазерное излучение, самофокусировка, филаментация, ионизация, лазерная плазма; ultra-short laser radiation, self-focusing, filamentation, ionization, laser plasma.

## Введение

Распространение импульсного лазерного излучения высокой мощности в воздухе проходит, как правило, в режиме сильной оптической нелинейности среды. Это выражается в пространственно-временной самомодуляции импульса, широкомасштабных изменениях его спектрального состава, фрагментации пучка на высокоинтенсивные световые области — филаменты, формировании на трассе протяженных плазменных каналов высокой плотности (см. [1–6]). Всю эту совокупность нелинейных трансформаций, происходящих с лазерным импульсом, называют филаментацией излучения. Область практического применения явления филаментации достаточно широка и простирается от лазерных технологий получения предельно коротких импульсов [7] до атмосферного зондирования и управления электрическим разрядом [8]. В настоящее время подавляющее большинство экспериментальных и расчетных работ по тематике самофокусировки и филаментации излучения выполнено для УФ-, видимого и ближнего ИК-диапазонов длин волн, что исторически объясняется созданием в конце XX в. надежного и коммерчески успешного фемтосекундного лазера на кристалле сапфира.

В то же время прогресс в лазерной технологии привел к появлению источников импульсного излучения гига- и тераваттного уровня мощности в более длинноволновой части спектра [9, 10]. В частности,

в научном сообществе активно обсуждаются перспективы использования излучения современных газовых CO<sub>2</sub>-лазеров высокого давления, способных генерировать тераваттные импульсы пикосекундной и субпикосекундной длительности в диапазоне 10 мкм [11, 12]. Важным преимуществом такого относительно длинноволнового излучения является то, что его несущая длина волны попадает в окно прозрачности атмосферы. Кроме того, в данном диапазоне пороговая мощность, необходимая для реализации самофокусировки импульса, значительно выше и составляет порядка 1 ТВт (в ближней ИК-области ~ 10 ГВт), а значит, возрастает и лучевая прочность воздушной трассы.

Ранее в теоретических работах [13, 14] были установлены основные закономерности взаимодействия тераваттного десятимикронного импульсного излучения с газовой средой в режиме самофокусировки пучка. Отличительными чертами самовоздействия излучения CO<sub>2</sub>-лазера по сравнению с филаментацией в видимом и ближнем ИК-диапазонах является формирование достаточно протяженного и широкого в поперечнике плазменного канала, а также масштабное спектральное уширение импульса после прохождения им участка филаментации. В частности, в теоретической работе [14] было показано, что самовоздействие пикосекундного излучения CO<sub>2</sub>-лазера с пиковой мощностью порядка 3 ТВт на 300-м воздушной трассе характеризуется увеличением ширины спектра импульса в целую октаву, примерно от 3 до 30 мкм.

Вместе с тем в упомянутых выше исследованиях атмосферный воздух моделировался монокомпонентной газовой средой, состоящей из молекулярного

\* Юрий Эльмарович Гейнц (ygeints@iao.ru); Александр Анатольевич Землянов (zaa@iao.ru).