

Свечение морского аэрозоля под действием ультракоротких лазерных импульсов Ti:Sapphire-лазера на первой и второй гармониках

Д.В. Апексимов¹, О.А. Букин², Е.Е. Быкова¹, С.С. Голик³, А.А. Землянов¹,
А.М. Кабанов¹, Г.Г. Матвиенко¹, А.В. Петров^{1*}

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

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

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

Поступила в редакцию 13.03.2013 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований спектров свечения морского аэрозоля под действием фемтосекундных импульсов Ti:Sapphire-лазера с длинами волн 800 и 400 нм. Показано, что при облучении первой гармоникой наблюдается свечение линии натрия 588,9 нм, при облучении второй гармоникой возбуждается флуоресценция растворенных в морской воде органических веществ.

Ключевые слова: лазерное излучение, филаментация, фемтосекундный импульс, аэрозоль, оптический пробой, плазма, спектр; laser radiation, filamentation, femtosecond pulse, aerosol, optical breakdown, plasma, spectrum.

Интерес к исследованиям в области фемтосекундной оптики аэрозолей связан с уникальными возможностями, которые предоставляют микронные частицы в части проявления различных нелинейно-оптических процессов (неупругое светорассеяние, оптический пробой). Сферическая поверхность микрочастиц трансформирует падающее излучение внутри их, приводя к существенному увеличению интенсивности внутреннего оптического поля [1]. Высокая интенсивность фемтосекундного излучения, возбуждающего нелинейные процессы светорассеяния внутри микрочастицы, а также высокая направленность назад рассеянного излучения [2, 3] делают аэрозоль привлекательным объектом для разработки методик лазерной дистанционной диагностики химического и микробиологического состава диспергированного вещества атмосферы и океана. В последнее время активно совершенствуются как фемтосекундная лазерная техника [4], так и методы управления параметрами гига-

и тераваттных лазерных пучков в атмосфере [5], что делает перспективным использование ультракоротких лазерных импульсов для задач зондирования атмосферы и океана.

В настоящей статье представлены результаты экспериментального исследования спектров свечения морского аэрозоля, облученного импульсами Ti:Sapphire-лазера с длительностью на полувысоте 45 фс гигаваттной мощности на основной (800 нм) и второй гармониках (400 нм). Эксперименты проводились на стенде ИАПУ ДВО РАН совместно с ДВФУ и ИОА СО РАН. Принципиальная схема эксперимента представлена на рис. 1.

Лазерный пучок диаметром 9 мм фокусировался линзой 8 с фокусным расстоянием 200 мм. Регистрация спектров проводилась под углом ~150° к направлению распространения излучения спектрометром 10. Энергия и длительность импульса контролировались измерителем энергии 7 и автокоррелятором 5 соответственно. В предыдущих работах авторов [2, 3] проводились измерения спектров свечения одиночных капель миллиметрового размера. Было показано, что основной вклад в свечение таких частиц вносит фазовая самомодуляция лазерного излучения в объеме частиц. При этом уширение спектра тем значительнее, чем крупнее частица. В работе [6] была показана возможность регистрации дуплета Na от одиночных частиц диаметром

* Дмитрий Владимирович Апексимов (areximov@iao.ru); Олег Алексеевич Букин (o_bukin@mail.ru); Елена Евгеньевна Быкова (bee@iao.ru); Сергей Сергеевич Голик (golik_s@mail.ru); Александр Анатольевич Землянов (zaa@iao.ru); Андрей Михайлович Кабанов (kam@iao.ru); Геннадий Григорьевич Матвиенко (magg@iao.ru); Алексей Вадимович Петров.

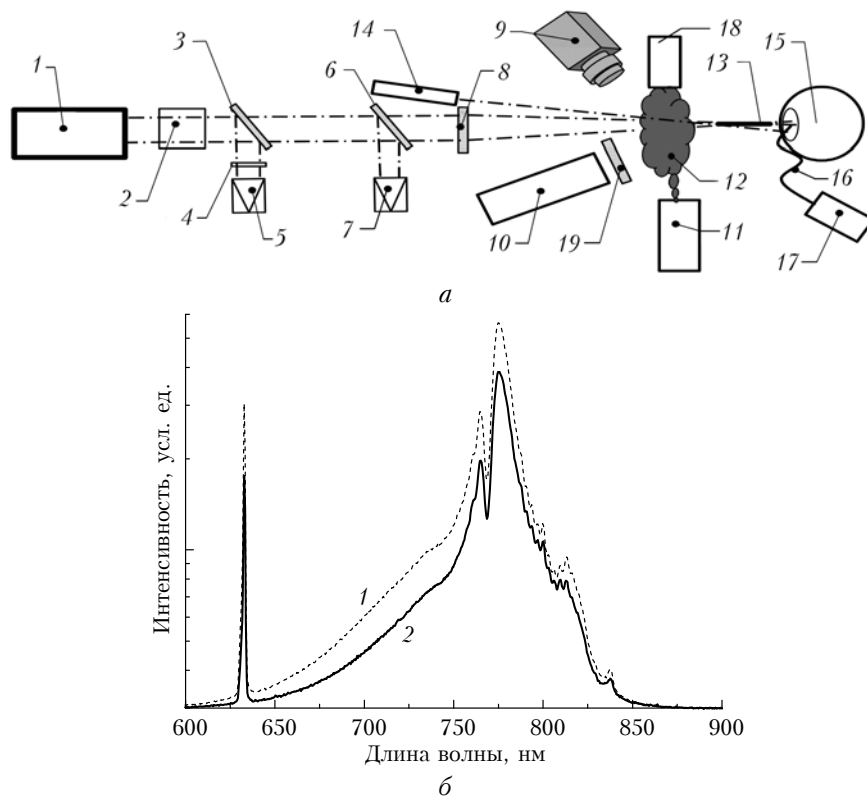


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – лазерная система: $\lambda_1 = 800$ нм, $E_1 \leq 6$ мДж, $\lambda_2 = 400$ нм, $E_2 \leq 2,2$ мДж, частота следования импульсов 1 кГц, $t_{in} = 45$ фс, диаметр пучка 9 мм (Spitfire Pro 40F, Spectra Physics); 2 – преобразующий кристалл бета-бората бария ВВО ($\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$); 3, 6 – поворотные пластины; 4 – светофильтр; 5 – автокоррелятор PSCOUT PL-SP-LF (Spectra Physics); 7 – измеритель энергии 407A (Spectra Physics); 8 – фокусирующая линза $f = 200$ мм (Plano-Convex Lens, BK7, $d \sim 20$ мм); 9 – фотокамера SONY DSC-F828; 10 – спектрограф Acton SP2300 с камерой PI-MAX3 1024i (Princeton Instruments); 11 – ультразвуковой генератор аэрозоля Муссон-1М; 12 – аэрозоль: диаметр частиц 5 мкм, $N = 10^5$ см $^{-3}$, концентрация NaCl 30 г/л; 13 – область филаментации; 14 – непрерывный He–Ne-лазер $\lambda = 634$ нм; 15 – интегрирующая сфера; 16 – световод; 17 – спектрометр Maya 2000 Pro; 18 – вытяжной вентилятор; 19 – сменные светофильтры (а). Сигналы на длинах волн Ti:Sapphire-лазера и зондирующего He–Ne-лазера без аэрозоля (1) и с аэрозолем (2), принимаемые в интегрирующую сферу (15) (б)

50–80 мкм раствора хлорида натрия в воде при воздействии импульсами первой гармоники Ti:Sapphire-лазера интенсивностью $\sim 10^{12}$ Вт/см 2 . В [6] линия Na регистрировалась от морского аэрозоля при воздействии фемтосекундными импульсами длительностью 80 фс, энергией 72 мДж с применением телескопа с зеркалом диаметром 30 см и специальной аэрозольной камеры длиной 1,2 м, в которую фокусировалось излучение.

В настоящих экспериментах для устранения влияния суперконтинуального свечения из капель использовались частицы микронного диапазона размеров, а для компенсации уменьшения объема частиц и, следовательно, молекул NaCl, возбуждаемых излучением, использовался плотный аэрозоль морской воды (бухта Кривой Рог, г. Владивосток), который подавался в пучок в виде струи диаметром 2 см на расстоянии 3 см от геометрического фокуса линзы, в области которого формировался филамент (рис. 2).

Для стабилизации аэрозольной струи и во избежание осаждения капель жидкости на оптических элементах применялся вытяжной вентилятор 18.

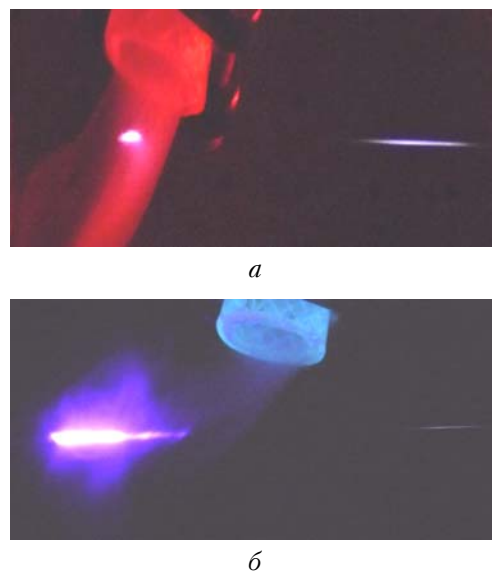


Рис. 2. Свечение аэрозоля под воздействием фемтосекундных лазерных импульсов с длинами волн 800 (а) и 400 нм (б). Излучение падает слева

Концентрация аэрозольных частиц в объеме взаимодействия контролировалась по ослаблению зондирующего пучка He–Ne-лазера 14, распространяющегося под малым углом с воздействующим пучком Ti:Sapphire-лазера. Оценка концентрации аэрозоля, проведенная по полученному соотношению прошедшего аэрозольный слой излучения и опорному сигналу (см. рис. 1, б, кривые 1 и 2 соответственно), показала, что она составляет 10^5 см^{-3} . При этом объем жидкости в области взаимодействия мощных лазерных импульсов с аэрозолем составляет всего $\sim 10^{-6} \text{ см}^3$, что соответствует десяткам наногамм хлорида натрия. Для одиночных миллиметровых капель количество NaCl на три порядка выше. Однако дальнейшее увеличение концентрации аэрозольных частиц или оптической толщи аэрозоля нецелесообразно, так как приводит к сильному ослаблению на передней части трассы, в результате чего интенсивность в теневой ее части недостаточна для генерации пробоя в объеме частиц.

На рис. 3 представлены регистрируемые спектры свечения аэрозоля при его облучении фемтосекундными импульсами с длиной волны 800 нм. Отчетливо видна эмиссионная линия неразрешенного резонансного дуплета NaI электронных переходов ($3^2S_{1/2} - 3^2P_{3/2}$) 588,9 нм и ($3^2S_{1/2} - 3^2P_{1/2}$) 589,6 нм, энергия возбуждения в соответствии со схемой Гроттриана ~ 2 эВ. Линия уверенно фиксируется в пределах энергий импульсов от максимального (6 мДж) в данных экспериментах до ~ 2 мДж, что соответствует интенсивности излучения в объеме взаимодействия с частицами $10^{11} - 10^{12} \text{ Вт/см}^2$. При дальнейшем уменьшении энергии импульса контур и амплитуда линии сливаются с фоновым сигналом спектрометра.

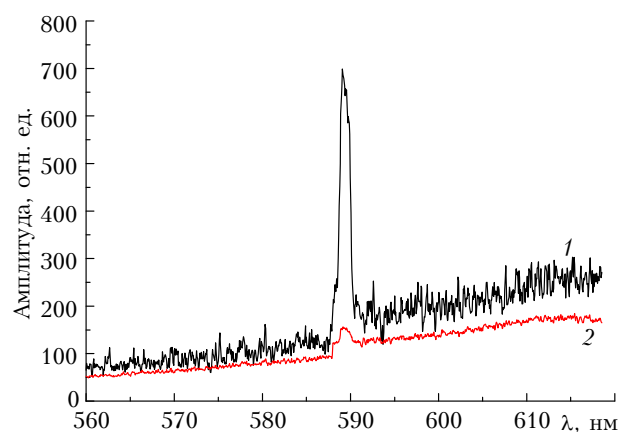


Рис. 3. Спектр свечения морского аэрозоля под действием первой гармоники Ti:Sapphire-лазера. Энергия импульса 6 (1) и 2 мДж (2)

На рис. 4 представлен спектр свечения морского аэрозоля при облучении второй гармоникой Ti:Sapphire-лазера. Видно, что в области 400 нм, соответствующей длине волны возбуждающего импульса, в спектре регистрируемого свечения наблюдается широкая полоса ($\sim 420 - 600$ нм) с максимумом в области 470 нм, обусловленная наличием

в воде биогенных взвесей и растворенного органического вещества (РОВ), к ним относятся флуоресцирующие природные соединения – белки – и ароматические аминокислоты, нуклеиновые кислоты, фенолы и полифенольные соединения (лигнин, танин), гуминовые соединения и их компоненты, а также некоторые пигменты [8, 9]. Эмиссионная линия Na при облучении морского аэрозоля импульсами с длиной волны 400 нм не зарегистрирована, очевидно, это связано с тем, что при преобразовании во вторую гармонику, во-первых, теряется четверть энергии импульса, во-вторых, преобразующий кристалл бета-бората бария удлиняет лазерный импульс. Как первое, так и второе обстоятельство приводят к уменьшению интенсивности воздействующего на частицы аэрозоля излучения, которая не превышает порога пробоя вещества частиц.

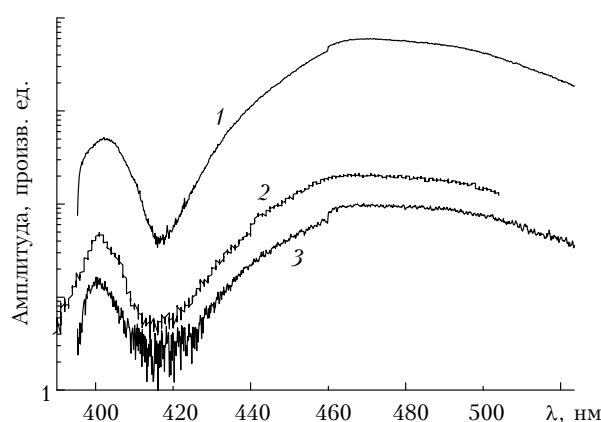


Рис. 4. Спектр свечения аэрозоля под действием второй гармоники Ti:Sapphire-лазера: 1 – энергия в импульсе 2,2; 2 – 1,5; 3 – 1 мДж (перед щелью спектрографа фильтр ЗС-8)

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что при облучении морского аэрозоля в свободном пространстве первой гармоникой Ti:Sapphire-лазера с энергией в импульсе $2 < E < 6$ мДж регистрируется свечение линии натрия, при облучении второй гармоникой наблюдается свечение в видимой области спектра, связанное с флуоресценцией растворенных в морской воде органических веществ.

Выражаем благодарность д.ф.-м.н. А.В. Майору и к.ф.-м.н. К.А. Шмирко за помощь при проведении экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 13, интеграционного проекта Президиума СО РАН № 67, гранта РФФИ № 12-05-33068 мол_а_вед, Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 8381.

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., Букин О.А., Быкова Е.Е., Гейнц Ю.Э., Голик С.С., Землянов А.А., Землянов Ал.А., Ильин А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Соко-

- лова 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.
3. 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., Хабибуллин Р.Р. Взаимодействие гигаваттных лазерных импульсов с жидкими средами. Часть 2. Спектральные и угловые характеристики рассеяния на миллиметровых водных каплях // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 8. С. 648–654.
 4. Фролов С.А., Трунов В.И., Пестряков Е.В., Кирпичников А.В., Петров В.В. Оптимизация каскадов параметрического усиления петаваттной малопериодной лазерной системы на основе кристаллов ВВО и LBO // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 3. С. 278–284.
 5. Апексимов Д.В., Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Степанов А.Н. Фламентация негауссовских лазерных пучков с различной геометрической расходимостью на атмосферной трассе // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 11. С. 929–935.
 6. Boutou V., Favre C., Hill S.C., Pan Y.L., Chang R.K., Wolf J.P. Backward enhanced emission from multiphoton processes in aerosols // Appl. Phys. B. 2002. V. 75, iss. 2. P. 145–152.
 7. Daigle J.-F., Méjean G., Liu W., Théberge F., Xu H.L., Kamali Y., Bernhardt J., Azarm A., Sun Q., Mathieu P., Roy G., Simard J.-R., Chin S.L. Long range trace detection in aqueous aerosol using remote filament-induced breakdown spectroscopy // Appl. Phys. B. 2007. V. 87. P. 749–754.
 8. Букин О.А., Голик С.С., Салюк П.А., Бауло Е.Н., Ластовская И.А. Изменение спектров лазерной индуцированной флуоресценции морской воды в процессе деградации растворенного органического вещества // Ж. прикл. спектроскопии. 2007. Т. 74, № 1. С. 103–107.
 9. Горшкова О.М., Пацаева С.В., Федосеева Е.В., Шубина Д.М., Южаков В.И. Флуоресценция растворенного органического вещества природной воды // Вода: химия и экология. 2009. № 11. С. 31–37.

D.V. Apeximov, O.A. Bukin, E.E. Bykova, S.S. Golik, A.A. Zemlyanov, A.M. Kabanov, G.G. Matvienko, A.V. Petrov. Emission of sea aerosol under action of the ultrashort Ti:Sapphire laser pulses at the first and second harmonics.

The experimental results on investigation of the emission spectra of sea aerosol under action of femtosecond Ti:Sapphire laser pulses of 800 and 400 nm wavelengths are presented. It is shown that emission of a sodium line at 588.9 nm is observed during irradiation by the first harmonic of radiation, while fluorescence of the organic matters dissolved in sea water is excited by the second harmonic.