

УДК 621.378.33, 535.621.33

*Д.В. АПЕКСИМОВ\**, *О.А. БУКИН\*\**, *Е.Е. БЫКОВА\**, *Ю.Э. ГЕЙНЦ\**, *С.С. ГОЛИК\*\*\**, *А.А. ЗЕМЛЯНОВ\**,  
*А.А. ИЛЬИН\*\**, *А.М. КАБАНОВ\**, *Г.Г. МАТВИЕНКО\**, *В.К. ОШЛАКОВ\**, *А.В. ПЕТРОВ\**, *Е.Б. СОКОЛОВА\*\**

### **ВОЗДЕЙСТВИЕ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА МИЛЛИМЕТРОВЫЕ ВОДНЫЕ КАПЛИ<sup>1</sup>**

Представлены результаты экспериментальных исследований взаимодействия гигаваттных фемтосекундных лазерных импульсов гигаваттной мощности с подвешенными водными каплями миллиметровых размеров. Исследована взрывная фрагментация водной частицы в результате испарения и взрыва перегретых областей, а также спектральные характеристики ее свечения в зависимости от размера частицы и мощности излучения.

**Ключевые слова:** *фемтосекундное лазерное излучение, водная капля, фазовая самомодуляция, фотоионизация, оптический пробой.*

При распространении мощного лазерного излучения в средах, включая водные, происходят сложные физические процессы. Наиболее интересные явления возникают при распространении излучения с фемтосекундной длительностью импульсов, мощность которых превышает определенный критический уровень. При этом происходит значительное изменение спектральных, временных и пространственных характеристик лазерного излучения, сопровождающегося формированием световых и плазменных каналов – филаментов, в которых происходит концентрация энергии лазерного излучения. Актуальность направления исследований определяется в первую очередь теми достижениями лазерной физики, которые позволили генерировать световые импульсы предельно короткой длительности. К настоящему времени достигнуты значения длительности импульсов менее 10 фс и соответственно гигантские, гига-, пета- и эксаваттные плотности мощности. При таких мощностях и соответственно интенсивностях электромагнитной волны реализуются ранее недостижимые нелинейно-оптические эффекты, такие, как филаментация лазерного пучка, генерация суперконтинуального свечения (за счет фазовой самомодуляции волны) и т.п. Для построения адекватных моделей нелинейно-оптических эффектов, реализующихся в атмосфере, необходим набор количественной эмпирической информации.

Микрочастицы жидкости в форме сфер неизменно привлекают повышенный интерес специалистов в различных областях лазерной физики в плане реализации разнообразных нелинейно-оптических процессов, таких, как вынужденное комбинационное рассеяние, многофотонно возбужденная флуоресценция и вынужденное излучение, генерация третьей и более высоких гармоник, а также широкополосного оптического сигнала. Высокая пиковая интенсивность, характерная для лазерных источников фемтосекундного излучения, является дополнительным фактором, облегчающим возбуждение нелинейных эффектов в аэрозольных частицах, в частности оптического пробоя и взрывного разрушения жидких частиц. Высокая направленность эмиссии плазмы в обратном направлении открывают определенные перспективы для использования аэрозольных частиц в методиках лазерной дистанционной диагностики химического и микробиологического состава атмосферы и океана.

В работе представлены результаты комплексных экспериментов, проведенных в объединенной лаборатории ИАПУ ДВО РАН и ДВФУ совместно с ИОА СО РАН по взаимодействию мощных ультракоротких лазерных импульсов с конденсированными средами. В частности, были исследованы динамика взрывного разрушения и спектры свечения подвешенных миллиметровых водных капель, облученных гигаваттным излучением фемтосекундного титан-сапфирового лазера.

Экспериментальный стенд, на котором проводились эксперименты, подробно описан в [1]. Капли дистиллированной воды со средним диаметром  $2a = 2-5$  мм подвешивались на конце иглы, при этом точка подвеса была смещена относительно фокуса пучка на расстояние 24 мм по направлению к источнику.

<sup>1</sup> Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-05-00716), Интеграционного проекта № 67 СО РАН и ДВО РАН, Программы фундаментальных исследований Президиума РАН №13, Программы РАН, Программы 8.1 ОФН РАН.

В качестве примера на рис. 1 приведены два фотоснимка капли воды, находящейся под воздействием цуга ультракоротких лазерных импульсов. Фотографии получены при различной временной выдержке затвора (1/500 и 1 с) и при различном увеличении объектива. На обоих снимках отчетливо наблюдается свечение капли, причем видимая часть спектра этого свечения имеет красновато-оранжевый цвет. Как показывает рис. 1, *а*, светящиеся области располагаются по всему объему капли, но наибольшая их плотность наблюдается в теневой полусфере. При этом здесь же видны (рис. 1, *б*) светящиеся выбросы парокапельной смеси, направленные по ходу светового луча и имеющие размер в поперечнике  $\sim 100\text{--}150$  мкм. Жидкость внутри прозрачной частицы нагревается в результате термализации плазмы, возникшей в результате оптического пробоя в поле лазерного импульса. В пользу этого предположения говорит то, что область свечения имеет гранулированную структуру, образованную мелкими паровыми пузырями 20–50 мкм в диаметре, свидетельствующими о протекании фазового перехода первого рода (кипении) в жидкости. Выбросы материала частицы из ее теневой поверхности указывают на взрывной характер этого кипения и реализацию высоких давлений в областях плазмообразования, которые по оценкам могут достигать 20 кбар. Газодинамическая разгрузка области высокого давления сопровождается возникновением ударной волны и следующей за ней волны разряжения в жидкости, что является причиной появления кавитации в холодных зонах частицы и формирования несветящихся газовых пузырей

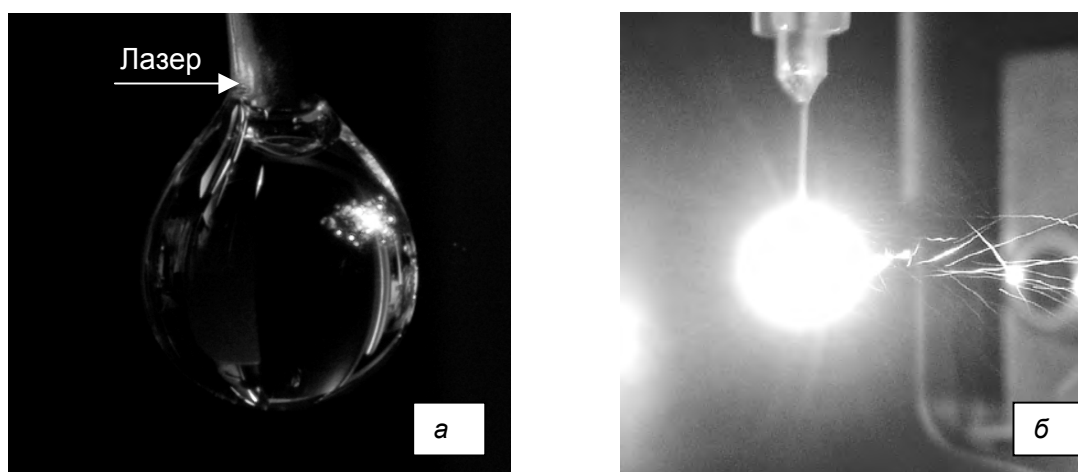


Рис. 1. Фотографии оптического пробоя и свечения водной капли с  $a_0 \approx 1$  мм, облученной цугом фемтосекундных лазерных импульсов, зафиксированные при различной временной выдержке 1/500 с (*а*) и 1 с (*б*). Излучение падает слева

Экспериментальные спектры рассеянного на подвешенной водной капле лазерного излучения приведены на рис. 2 для различных мощностей воздействующего импульса (*а*) и углов приема (*б*). Здесь же для сравнения показан спектральный контур падающего на частицу светового излучения. Изменение длительности лазерного импульса, производимое при помощи chirpирования излучения, меняло величину пиковой интенсивности, падающей на каплю световой волны.

При большой длительности импульса, форма спектрального контура свечения, как видно, близка к спектральному контуру падающего излучения (кривая 1 на рис. 2, *а*), что говорит об отсутствии регистрируемого плазмообразования в капле. При длительности импульса  $t_p = 800$  фс пиковая интенсивность, падающего на частицу излучения составляла всего  $I_0 \approx 2$  ГВт/см<sup>2</sup>, что даже с учетом внутренней фокусировки поля недостаточно для преодоления порога пробоя воды. Как видно из рис. 2, *б*, существует определенная зависимость амплитуды и ширины спектрального распределения регистрируемого сигнала от угла рассеяния и мощности импульса. В основном это касается диапазона длин волн 600–1000 нм, в то время как более коротковолновое крыло спектра рассеяния ( $< 600$  нм) не претерпевает видимых изменений формы, а повторяет ход воздействующего излучения.

По поводу спектра последнего отметим наличие искажений его центральной части, обусловленных самовоздействием мощного фемтосекундного импульса при прохождении через фокусирующую стеклянную (КРХ106AR.16, аналог российской ВК7) линзу. Также на вставке к рис. 2

виден ряд максимумов в видимой области спектра (линии Hg I с центрами на 435,83; 546,1; 576,96; 578,97; 579,07; 546,08 и 435,83 нм), связанных с использованием во время измерений фоновой подсветки ртутной (галофосфатный люминофор) лампой дневного света [2].

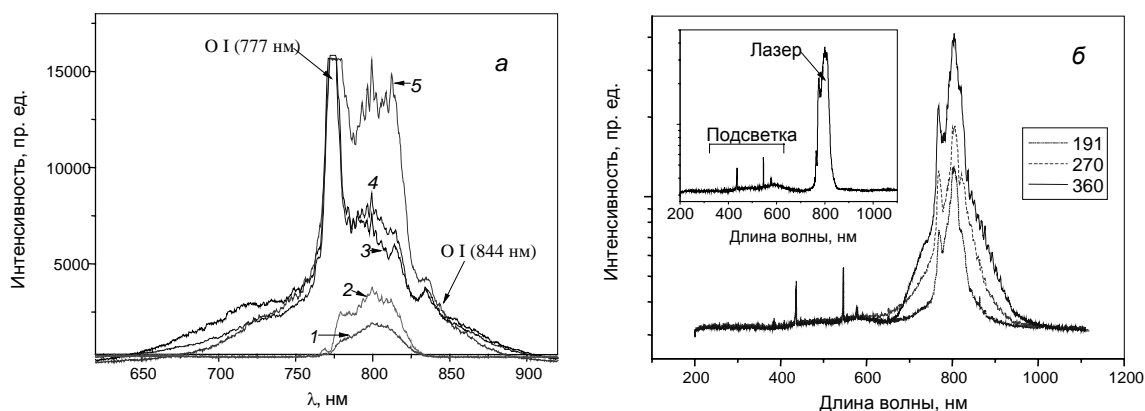


Рис. 2. Усредненные спектры свечения капли воды при различной длительности импульса падающего излучения  $t_p = 800$  (кр. 1); 685 (кр. 2); 285 (кр. 3); 143 (кр. 4) и 55 фс (кр. 5) (а). Спектральная зависимость сигнала рассеяния (в усл. ед.) от водной капли с диаметром 1,5 мкм под различными углами. На вставке – спектр падающего лазерного импульса (б)

Более детально угловое поведение усредненной по различным спектральным диапазонам амплитуды сигнала рассеяния показывает серия графиков на рис. 3. Разбиение спектра на подинтервалы имеет своей целью условно разделить основные физические процессы, трансформирующие спектральный состав рассеянного каплей излучения. С одной стороны, это свечение нагретой в результате термализации плазмы воды, а также излучательная рекомбинация свободных электронов в областях оптического пробоя. С другой стороны, это фазовая самомодуляция лазерного импульса при его распространении через водную среду под действием оптического эффекта Керра и плазменной дефокусировки.

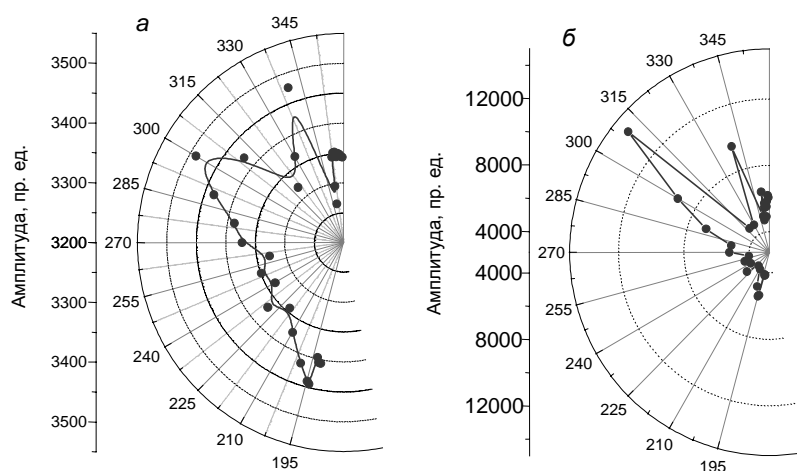


Рис. 3. Усредненная амплитуда сигнала рассеяния от водной капли ( $d \sim 1,5$  мкм) в зависимости от угла  $\theta$  в спектральных диапазонах 450–600 нм (а) и 600–1100 нм (б). Направление падения лазерного излучения показано стрелкой. Экспериментальные точки для наглядности соединены линиями

Из рис. 3 следует, что диаграмма направленности рассеянного излучения от капли в общем случае не изотропна. Достаточно слабая неоднородность распределения по углу наблюдается в интервале длин волн  $\lambda = 450\text{--}600$  нм (рис. 2, а), который соответствует «белому» свечению очагов оптического пробоя внутри капли. Можно предположить, что причина полученного углового распределения рассеянного света обусловлена самой морфологией жидкой частицы, имеющей близкую к сферической форму поверхности и оказывающей фокусирующее действие на падающее лазерное излучение. В результате этого плазменные области, являющиеся источниками «белого»

света, сосредотачиваются преимущественно в теневой полусфере капли. Это делает свечение капли назад направленным, а по ходу действия возбуждающего пучка наблюдается излучение в широкий конус.

Второй из рассматриваемых спектральных диапазонов включает в себя основную мощность падающего излучения, это видно по изменению шкалы оси ординат на рис. 3, б. Диаграмма рассеяния по углу здесь резко неоднородная с абсолютным максимумом сигнала в направлении  $310^\circ$ . Несколько меньший по величине максимум наблюдается под углом  $330^\circ$ , а рассеяние вперед и назад происходит приблизительно с равной интенсивностью.

В целом, исходя из анализа представленных данных, можно с высокой вероятностью заключить, что основной причиной широкомасштабного изменения спектра лазерного импульса при его рассеянии на миллиметровой водной капле является самомодуляция фазы излучения вследствие оптической нелинейности жидкости за счет эффекта Керра и плазмообразования. Увеличение размера водной частицы при прочих равных условиях сопровождается дополнительным уширением спектра наблюдаемого рассеянного излучения, по крайней мере, в попутном падающему излучению направлении. В поле ультракороткого светового излучения крупные оптически прозрачные капли испаряются и вскипают с выбросом части своей массы в виде пара и жидких фрагментов. Причиной взрывной фрагментации является фазовый переход жидкости в местах локализации зон плазмообразования внутри капли, возникающих в результате ионизации молекул, поддержанной эффектом фокусировки оптического поля сферической поверхностью капли.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Апексимов Д.В., Букин О.А., Быкова Е.Е. и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2010. – Т. 23. – № 7. – С. 536–542.
2. [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Spectrum\\_of\\_halophosphate\\_type\\_fluorescent\\_bulb\\_\(f30t12\\_ww\\_rs\).png](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Spectrum_of_halophosphate_type_fluorescent_bulb_(f30t12_ww_rs).png)

\*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 20.07.12.

\*\*Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,

г. Владивосток, Россия

\*\*\*Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

E-mail: bee@iao.ru

---

Апексимов Дмитрий Владимирович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;

Букин Олег Алексеевич, д.ф.-м.н., профессор, зав. лабораторией;

Быкова Елена Евгеньевна, науч. сотр.;

Гейнц Юрий Эльмарович, д.ф.-м.н., гл. науч. сотр.;

Голик Сергей Сергеевич, к.ф.-м.н., зав. лабораторией;

Землянов Александр Анатольевич, д.ф.-м.н., профессор, зав. лабораторией;

Ильин Алексей Анатольевич, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;

Кабанов Андрей Михайлович, д.ф.-м.н., ведущ. науч. сотр.;

Матвиенко Геннадий Григорьевич, д.ф.-м.н., директор;

Ошлаков Виктор Константинович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;

Петров Алексей Вадимович, аспирант;

Соколова Екатерина Борисовна, инженер-программист.