

## Взаимодействие гигаваттных лазерных импульсов с жидкими средами. Часть 1. Взрывное вскипание крупных изолированных водных капель

Д.В. Апексимов<sup>1</sup>, О.А. Букин<sup>2</sup>, Е.Е. Быкова<sup>1</sup>, Ю.Э. Гейнц<sup>1</sup>, С.С. Голик<sup>3</sup>,  
А.А. Землянов<sup>1</sup>, Ал.А. Землянов<sup>4</sup>, А.А. Ильин<sup>3</sup>, А.М. Кабанов<sup>1</sup>,  
Г.Г. Матвиенко<sup>1</sup>, В.К. Ошлаков<sup>1</sup>, Е.Б. Соколова<sup>2\*</sup>

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

<sup>2</sup> *Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН  
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5*

<sup>3</sup> *Дальневосточный государственный университет  
690950, г. Владивосток, ул. Суханова, 8*

<sup>4</sup> *Научное управление Томского государственного университета  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36*

Поступила в редакцию 11.03.2010 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований взаимодействия фемтосекундных лазерных импульсов гигаваттной мощности с подвешенными каплями дистиллированной воды миллиметровых размеров. Исследованы временная и пространственная динамика развития очагов оптического пробоя в объеме жидкой частицы, ее взрывная фрагментация в результате испарения и взрыва перегретых областей, а также спектральные характеристики свечения водной частицы.

*Ключевые слова:* фемтосекундное лазерное излучение, водная капля, фотоионизация, оптический пробой, испарение, взрывная фрагментация частицы; femtosecond laser radiation, water droplet, photoionization, optical breakdown, evaporation, particle explosive fragmentation.

### Введение

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 значительно изменяются спектральные, временные и пространственные характеристики лазерного излучения, сопровождающегося формированием световых и плазменных каналов-филаментов, в которых концентрируется энергия лазерного излучения. Явление филаментации сопровождается генерацией суперконтинуума,

т.е. широкополосного излучения, простирающегося от ультрафиолетового до инфракрасного диапазона спектра. Импульс такого «белого света» рассматривается как перспективный источник для лазерного зондирования и мониторинга окружающего пространства, включая водные среды.

Кроме того, объектом исследования в последнее время является также фемтосекундная оптика аэрозоля. Это связано с уникальными возможностями, которые предоставляют капли в части проявления различных нелинейно-оптических процессов (неупругое светорассеяние, оптический пробой). Сферическая поверхность микрочастиц, действуя как линза, фокусирует падающее излучение, приводит к существенному увеличению интенсивности внутреннего оптического поля. Более того, аэрозольные частицы малого поглощения обладают резонаторными свойствами. Микрочастица поддерживает целую систему собственных высокодобротных колебательных мод (мод «шепчущей галереи»), которые способны аккумулировать энергию оптического поля внутри частицы и приводить, таким образом, к снижению порогов нелинейных процессов светорассеяния в отличие от сплошной среды. Эти факторы способствуют появлению ряда уникальных особенностей различных нелинейно-

\* Апексимов Дмитрий Владимирович (areximov@iao.ru); Букин Олег Алексеевич (o\_bukin@mail.ru); Быкова Елена Евгеньевна (bee@iao.ru); Гейнц Юрий Эльмарович (ygeints@iao.ru); Голик Сергей Сергеевич (golik\_s@mail.ru); Землянов Александр Анатольевич (zaa@iao.ru); Землянов Алексей Анатольевич (zeml16@mail.ru); Ильин Алексей Анатольевич (triplecks@mail.ru); Кабанов Андрей Михайлович (kam@iao.ru); Матвиенко Геннадий Григорьевич (magg@iao.ru); Ошлаков Виктор Константинович (ovk@iao.ru); Соколова Екатерина Борисовна (mastapes@mail.ru).

оптических процессов в сферических микрочастицах, облученных интенсивным ультракоротким лазерным излучением, таких как вынужденное комбинационное рассеяние, многофотонно возбужденная флуоресценция и вынужденное излучение, генерация третьей гармоники. Высокая интенсивность фемтосекундного излучения, возбуждающего нелинейные процессы светорассеяния внутри микрочастицы, а также высокая направленность назад рассеянного излучения делают аэрозоль привлекательным объектом для методик лазерной дистанционной диагностики химического и микробиологического состава диспергированного вещества атмосферы и океана.

Коллективом авторов настоящей статьи были проведены комплексные экспериментальные и теоретические исследования, направленные на установление количественных связей и построение моделей реализации перечисленных эффектов в жидких и жидкокапельных средах. Эксперименты включали в себя исследования взаимодействия гигаваттных лазерных импульсов фемтосекундной длительности с каплями дистиллированной воды, морской воды, воды с наночастицами, спирта с красителем R6G. Исследовались динамика разрушения, спектры свечения частиц в поле лазерных импульсов и их зависимости от мощности воздействующего излучения. Были проведены исследования филаментации и уширения спектров лазерных импульсов в сплошных жидких средах, состоящих из воды, воды с добавлением наночастиц, очищенной морской воды, морской воды с органической взвесью.

В настоящей статье, являющейся первой частью планируемого цикла статей, посвященных проведенным исследованиям, представляются результаты лабораторных и теоретических экспериментов в рамках одной из задач — разрушение водных капель при воздействии цугом фемтосекундных лазерных импульсов.

## Схема и методика проведения экспериментов

Комплексные эксперименты по взаимодействию с жидкими и жидкокапельными средами

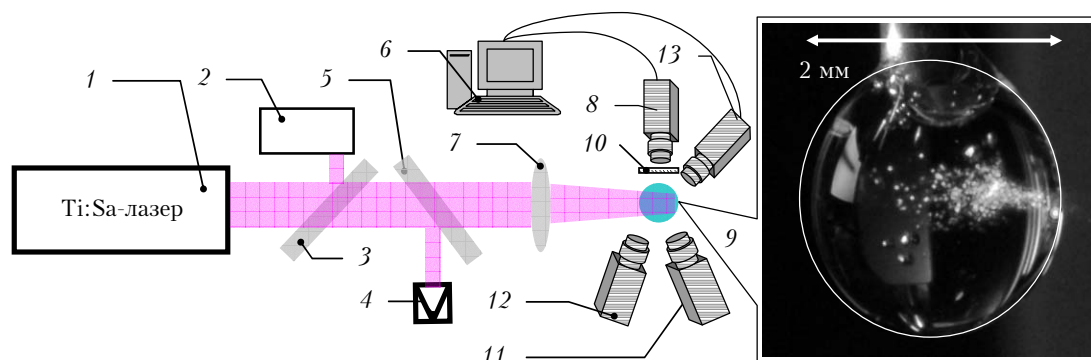


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — лазерная система ( $\lambda = 800$  нм,  $E_0 = 1$  мДж,  $f = 1$  кГц); 2 — автокоррелятор PSCOUT PL-SP-LF, Spectra Physics; 3, 5 — поворотные пластины; 6 — компьютер; 4 — измеритель энергии лазерного излучения Spectra Physics 407A; 7 — фокусирующая линза 200 мм; 8 — спектрометр Ocean Optics HR4000; 9 — капля; 10 — светофильтр; 11 — видеокамера JVC GZ-MG255; 12 — фотокамера NICON E8700; 13 — ИК-спектрометр USB4000 (Ocean Optics)

лазерных импульсов гигаваттной мощности были выполнены в объединенной лаборатории ИАПУ ДВО РАН и ДВГУ совместно с ИОА СО РАН по схеме, представленной на рис. 1.

В качестве объекта исследования использовались неподвижные капли дистиллированной воды со средним диаметром  $2a_0 = 2$  мм, которые подвешивались на конце иглы. Воздействующий лазерный пучок диаметром 7 мм по уровню  $e^{-2}$  с помощью линзы 7 фокусировался таким образом, чтобы его диаметр был немногим меньше поперечника капли и избежать влияния нагрева иглы при длительном воздействии цугом лазерных импульсов. Диаметр пучка в зоне воздействия на частицу составлял 1,27 мм.

Лазерный источник 1, состоящий из непрерывного лазера накачки (Millennia Pro 5sJ, Spectra Physics с  $\lambda = 532$  нм, средняя мощность 4 Вт), фемтосекундного титан-сапфирового генератора (Tsunami, Spectra Physics:  $\lambda = 800$  нм, ширина спектра  $\leq 65$  нм, длительность импульсов от 30 фс, частота генерации импульсов 75 МГц), импульсного лазера накачки (Empower, Spectra Physics с  $\lambda = 527$  нм, средняя мощность 10 Вт), фемтосекундного титан-сапфирового усилителя (SpitFire40F, Spectra Physics,  $\lambda = 800$  нм, ширина спектра 35 нм), работал в частотно-импульсном режиме с частотой повторения 1 кГц и энергией в импульсе  $E_0 = 1$  мДж. Измерение длительности импульсов проводилось с помощью автокоррелятора 2, минимальная длительность импульсов составляла 40 фс.

Спектральные измерения свечения капель проводились спектрометром HR4000 (Ocean Optics, входная щель 25 мкм 8), снабженным решеткой 300 штр./мм и оптикой, обеспечивающей регистрацию сигнала в диапазоне длин волн от 195 до 1150 нм. Калибровка искажающего влияния линзы на спектральный контур воздействующего лазерного импульса проводилась спектрометром 13. Кроме того, проводилась фото- и видеорегистрация капель при воздействии лазерных импульсов на капли 11, 12. Мощность лазерных импульсов менялась в пределах 1–25 ГВт.

## Испарение и взрывное вскипание водных капель под действием мощного фемтосекундного лазерного излучения

В экспериментальной работе [1] отмечено, что воздействие интенсивного лазерного излучения фемтосекундной длительности ( $\lambda = 800$  нм) на изолированные водные капли микронных размеров (диаметр  $\sim 100$  мкм) может сопровождаться их испарением и взрывным разрушением. Представленные данные указали на многообразие реализаций процесса взрывной фрагментации капли при ультракоротком воздействии и его зависимость от энергии и длительности лазерного импульса. Взрыв капель имел характер выбросов пароконденсата из фронтальной (навстречу излучению) и теневой (по ходу светового луча) поверхностей жидкой частицы, где были локализованы зоны тепловыделения. Эти выбросы могли быть симметричными и несимметричными относительно направления действия излучения. С увеличением мощности лазерного импульса наблюдались формирование явно выраженной газовой полости в теневой полусфере капли и разрушение капли.

Ранее в работах [2, 3] при ультракоротком облучении свободно падающих капель дистиллированной и соленой воды (50–70 мкм в диаметре) одиночными импульсами излучения титан-сапфирового лазера было зафиксировано интенсивное свечение всей капли в видимой области спектра без ее механического разрушения. Присутствие эмиссионных линий ионов  $\text{Na}^+$  в спектре свечения и некогерентный характер самого свечения позволили авторам сделать вывод о том, что наблюдающееся свечение капли имеет плазменную природу, а не связано с фазовой самомодулирующей воздействием лазерного импульса, прошедшего каплю. Характерный размер этих плазменных областей в [3] был оценен на уровне нескольких микрометров, а их пространственное положение соответствовало локализации основных максимумов интенсивности оптического поля внутри сферической капли, так называемым «горячим точкам».

Возможный сценарий взрывного вскипания жидкой частицы в поле ультракороткого лазерного излучения был развит в [4, 5]. Было показано, что, в отличие от известных экспериментов по взрыву капель длинными лазерными импульсами (например, воздействие нано- и микросекундного излучения  $\text{CO}_2$ -лазера на капли воды – см. монографию [6] и ссылки в ней), при ультракоротком лазерном облучении капель их взрыв реализуется специфическим образом. В данном случае нет прямого нагрева жидкости излучением, поскольку вода в ближнем ИК-диапазоне обладает пренебрежимо малым поглощением (показатель поглощения на длине волны 800 нм не превышает  $\sim 10^{-7}$  по данным работы [7]). Тем не менее ультракороткое лазерное излучение вследствие своей экстремально высокой плотности мощности ( $\sim 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup>) за

время импульса способно создать плотную плазму в зонах внутренней фокусировки оптического поля микрочастицы. Фотоионизация в этом случае проходит преимущественно по механизму многофотонного поглощения излучения молекулами воды, что приводит к экстремально быстрому (за времена порядка сотни фемтосекунд) увеличению концентрации свободных зарядов в «горячих точках» капли.

Формирующиеся плазменные области являются своеобразными внутренними тепловыми источниками, инициирующими вскипание жидкости в результате термализации свободных электронов. Диссипация запасенной в плазменных областях энергии во внутреннюю энергию вещества частицы реализуется, как правило, уже после прохождения лазерного импульса (характерные времена порядка нескольких десятков пикосекунд), сопровождается газодинамическим расширением перегретого двухфазного вещества и может привести к фрагментации или даже к механическому разрушению капли как целого.

Подчеркнем, что капля в сравнении с протяженным объемом той же жидкости обладает более выраженной нелинейной оптической активностью, что обусловлено ее морфологией, а именно квазисферической формой поверхности. Оптически прозрачная сферическая частица действует как фокусирующая оптическая система, увеличивая интенсивность падающего на нее светового излучения во внутренних зонах, расположенных вблизи ее освещенной и теневой поверхностей. Степень подъема интенсивности растет с увеличением размера капли и для «оптически крупных» частиц может достигать нескольких порядков величины. Это приводит к тому, что целый ряд нелинейно-оптических эффектов, реализующихся в жидкости, например эффекты вынужденного рассеяния [6], а также эффект оптического пробоя, в микронных каплях имеют значительно более низкий порог своего проявления, чем в оптической кювете. В частности, экспериментально измеренное значение пороговой интенсивности пробоя  $I_{bd}$  чистой воды 100-фс лазерными импульсами с  $\lambda = 800$  нм составляет примерно 56 ТВт/см<sup>2</sup> [8]. В то же время по данным [2] оптический пробой 50-микронных водных капель регистрировался при падающей интенсивности  $I_0 = 7$  ТВт/см<sup>2</sup>, а численные расчеты, представленные в [9], указывают на возможность достижения критической плотности свободных электронов (для воды  $n_e = 1,7 \cdot 10^{27}$  м<sup>-3</sup>) в таких частицах уже при пиковой интенсивности в фемтосекундном импульсе  $I_0 = 0,1$  ТВт/см<sup>2</sup>.

Ниже будут представлены результаты экспериментальных исследований воздействия интенсивного фемтосекундного лазерного излучения на капли воды, имеющие миллиметровые размеры. Крупные капли жидкости могут считаться в некотором роде переходным этапом между аэрозольной частицей и жидкостью в оптической кювете. С одной стороны, у них по-прежнему граница раздела «жидкость–газ» имеет сферическую форму и, значит, присутствует эффект фокусировки падающей

световой волны, а с другой стороны, объем таких каплей становится уже значительным для того, чтобы избежать разрушения частицы при взрывном вскипании жидкости в «горячих точках». Поэтому основное внимание в экспериментах было уделено регистрации динамической картины развития оптического пробоя и последующего вскипания крупных жидких частиц в поле ультракороткого излучения.

## Результаты и их обсуждение

На рис. 2 показана капля воды, облученная цугом лазерных импульсов. Фотографии получены в последовательные моменты времени от начала воздействия за суммарный промежуток  $\sim 1$  с при выдержке каждого кадра  $1/500$  с. Поскольку положение капли было фиксировано в пространстве,

можно утверждать, что от кадра к кадру с изменением времени варьировался и энерговклад в жидкую частицу.

Видно, что на всех снимках прослеживается появление свечения внутри капли. Это свечение начинается в теневой полусфере (рис. 2, *а*) и с увеличением времени воздействия захватывает все новые и новые области жидкости, постепенно переходя в освещенную излучением часть частицы (рис. 2, *б*). При этом через некоторое время из теневой полусферы возникают выбросы парокapельной смеси (рис. 2, *в*, *г*), которые локализованы на главном диаметре частицы и имеют размер в поперечнике  $\sim 100$ – $150$  мкм.

Свечение внутри капли имеет красновато-оранжевый цвет, который соответствует излучению абсолютно черного тела, нагретого до температуры примерно  $1000$ – $2000$  К. Жидкость внутри прозрачной

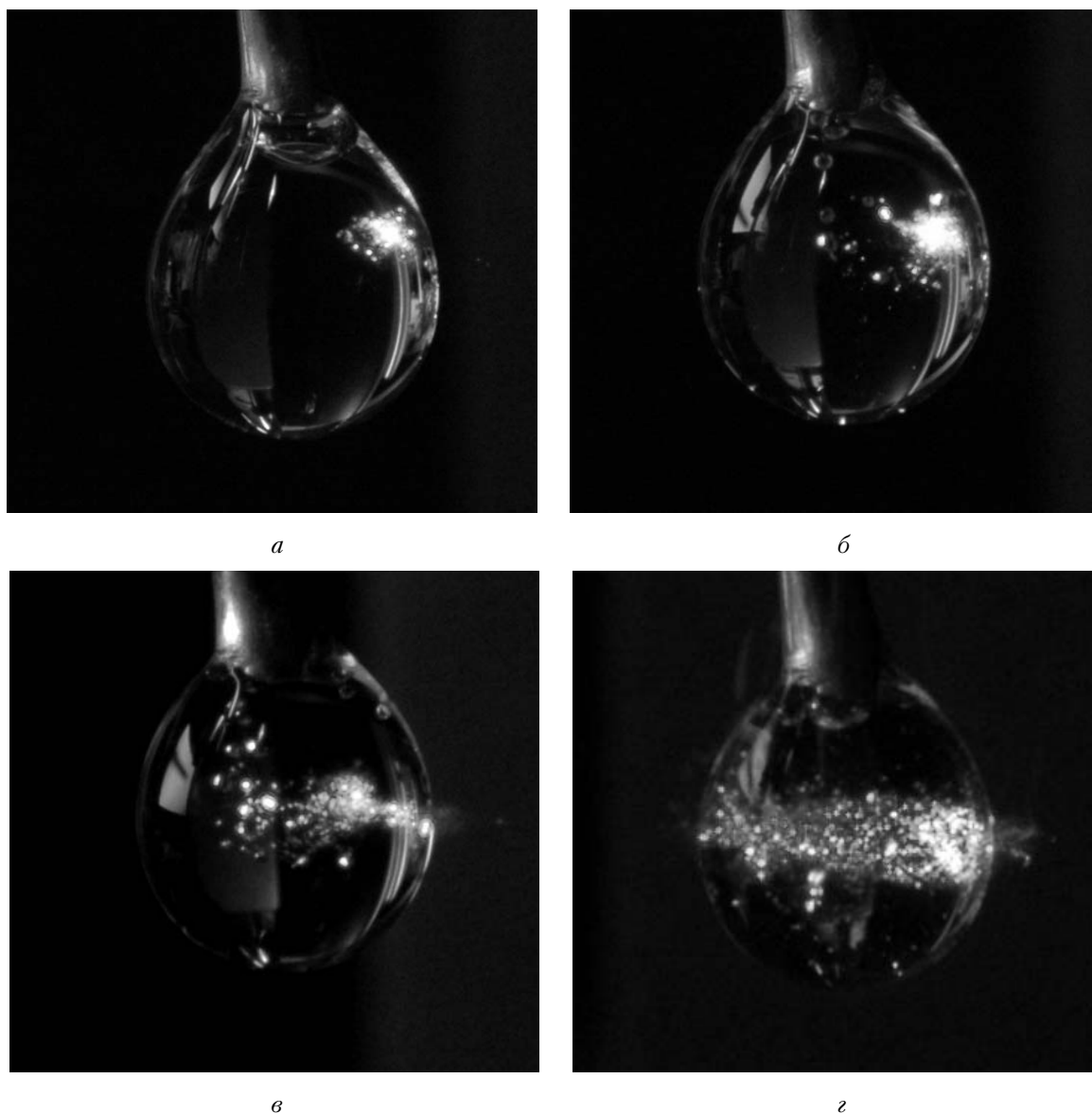


Рис. 2. Водная капля с  $a_0 \approx 1$  мм, облученная цугом фемтосекундных лазерных импульсов и зафиксированная в последовательные моменты времени [увеличивается от (*а*) к (*г*)]. Излучение падает слева

частицы может нагреться до таких температур только в результате термализации плазмы, возникшей в результате оптического пробоя в поле лазерного пучка. В пользу этого предположения говорит также и 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 фрагментов частицы из ее теневой поверхности указывают на взрывной характер этого кипения и реализацию высоких давлений в областях плазмообразования, которые по оценкам [5] 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, которые при должном увеличении можно обнаружить на рис. 2, б–г.

Из рис. 2 следует, что в целом конфигурация светящихся областей соответствует пространственному профилю интенсивности лазерного пучка внутри капли: на начальном этапе плазменный очаг внутри капли имеет форму пятна, центр которого находится у теневой поверхности частицы, а к концу экспозиции светящаяся область уже простирается через весь поперечник капли.

Обратимся к рис. 3, где представлены проведенные в рамках обобщенной теории Ми [10] теоретические расчеты распределения плотности

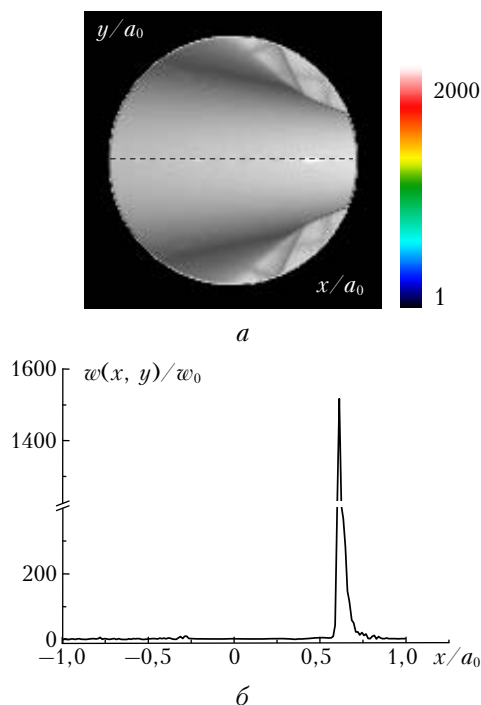


Рис. 3. Пространственное распределение нормированной плотности световой энергии по главному сечению (а) и вдоль диаметра (б) водной капли с  $a_0 = 500$  мкм при облучении ее гауссовским пучком  $R_0 = 300$  мкм и  $\lambda = 800$  нм, направленным в центр капли. Излучение падает слева

световой энергии  $w(x, y) = \int_0^{\infty} I(t; x, y) dt$  внутри вод-

ной капли с несколько меньшим (в силу технических причин), чем в экспериментах, размером, облученной узким лазерным пучком с гауссовским по времени и поперечному сечению профилем интенсивности. Значения  $w$  на рис. 3 рассчитаны к концу импульса и нормированы на свое начальное пиковое значение  $w_0 = I_0 t_p \sqrt{\pi}$ , радиус светового пучка  $R_0$  составлял 60% от радиуса капли, длительность импульса  $t_p = 100$  фс, а показатель преломления воды  $n = 1,33$ . Считалось, что капля имеет сферическую форму и находится в воздухе.

Из рис. 3 следует, что энергия светового пучка внутри капли преимущественно сконцентрирована в области с центром  $r_c \approx 0,65R_0$  и поперечником  $\sim 50$  мкм, где и происходит зарождение оптического пробоя жидкости. Плотность энергии в других зонах капли незначительно отличается от плотности падающего излучения, и только вдоль главного диаметра капли имеется подъем значений  $w$  примерно на порядок величины.

### Спектральные характеристики свечения капель в поле мощных фемтосекундных лазерных импульсов

При достаточно продолжительном воздействии излучения на водную каплю (несколько десятков секунд) процессы диффузионного и конвективного теплопереноса из области «горячих точек» приводят к прогреву всего объема частицы. Нагретая капля начинает активно кипеть с образованием множества паровых пузырьков, испаряться и производить выбросы горячих светящихся жидких фрагментов достаточно крупных размеров (десятки микрометров).

Рис. 4 наглядно показывает эту фазу вскипания жидкой частицы. Белый цвет свечения капли и ее фрагментов связан с электрической перегрузкой матрицы фотоаппарата при длительной экспозиции. В действительности же свечение имело красный цвет, как и на рис. 2.

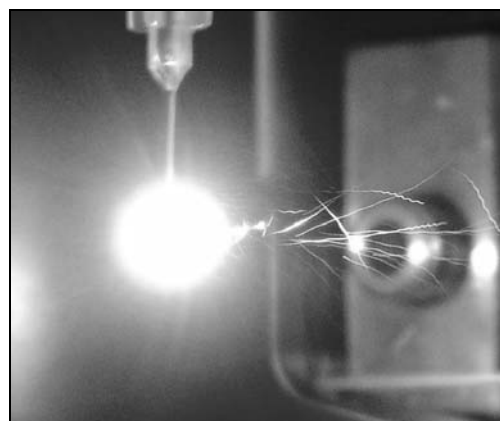


Рис. 4. Взрывная фрагментация водной капли при продолжительном облучении цугом лазерных импульсов. Излучение падает слева

Спектральный состав исходного импульса излучения и свечения капли показан на рис. 5.

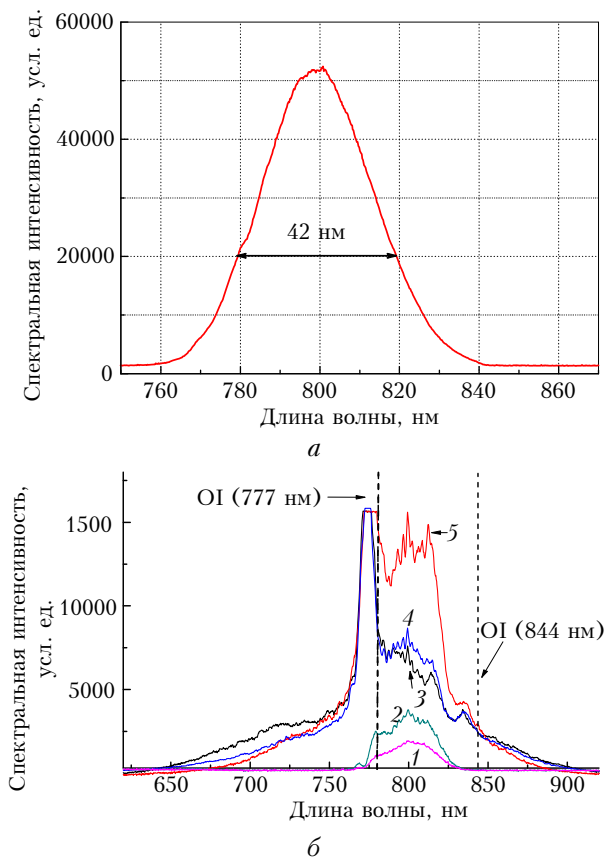


Рис. 5. Усредненные (по 100 измерениям) спектры исходного лазерного излучения (а) и свечения капли воды (б) при различной длительности импульса падающего излучения  $t_p = 800$  (1); 685 (2); 285 (3); 143 (4) и 55 фс (5)

Изменение длительности лазерного импульса при помощи chirпирования излучения меняло пиковую интенсивность излучения 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. 5, б), что говорит об отсутствии регистрируемого плазмообразования в капле. При длительности импульса  $t_p = 800$  фс пиковая интенсивность  $I_0$  падающего на частицу излучения составляла всего  $\approx 2$  ГВт/см<sup>2</sup>, но даже с учетом внутренней фокусировки поля (см. рис. 4) этого недостаточно для преодоления порога пробоя воды.

Укорочение импульса (рис. 5, б, кривые 2–5) приводит к деформациям первоначально гауссовского спектрального контура свечения и к появлению отчетливо видимых на фоне упругого рассеяния линий мультиплета иона кислорода OI  $^5P-^5S$  с центром на длине волны 777,4 нм, а также OI  $^3P-^3S$  с центром на 844,6 нм (см. рис. 5, б) [11]. Кроме того, возрастает сам уровень регистрируемого спектрального сигнала и возникает связанный со свечением плазмы «хвост» в видимой области спектра.

## Заключение

Таким образом, представленные результаты экспериментальных исследований взаимодействия мощных фемтосекундных лазерных импульсов с одиночными миллиметровыми каплями дистиллированной воды показали, что в поле ультракороткого светового излучения крупные оптически прозрачные капли испаряются и вскипают с выбросом части своей массы в виде пара и жидких фрагментов. Это вскипание носит взрывной характер и при продолжительном действии излучения охватывает большую часть объема жидкой частицы. Причиной взрывной фрагментации, как показывает теоретический анализ, является фазовый переход жидкости в местах локализации зон плазмообразования внутри капли. Эти зоны, в свою очередь, могут возникать в жидкости при ее ультракоротком лазерном облучении в результате многофотонной ионизации молекул, поддержанной эффектом фокусировки оптического поля сферической поверхностью капли.

Взрывное вскипание капель, облученных цугом фемтосекундных лазерных импульсов с центральной длиной волны в ближней ИК-области, сопровождается их свечением в видимой части спектра. Яркость этого свечения, а также его спектральный состав зависят от начальной мощности воздействующего лазерного излучения. При достаточно большой интенсивности облучения в спектрах свечения капли выделяется эмиссионная линия иона кислорода и повышается спектральная интенсивность «красного» крыла.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-05-00738а), Федерального агентства по образованию (Гос. контракт № П367), Министерства образования и науки (Гос. контракт № П567), Федерального агентства по науке и инновациям (Гос. контракт № 02.740.11.0083), Интеграционного проекта СО РАН № 81, СО РАН и ДВО РАН (грант 09-II-CO-02-001), Проекта фундаментальных исследований № 9.1, Программы РАН, Программы 8.1 ОФН РАН.

1. Lindinger A., Hagen J., Socaciu L.D., Bernhardt T.M., Wöste L., Duft D., Leisner T. Time-resolved explosion dynamics of H<sub>2</sub>O droplets induced by femtosecond laser pulses // *Appl. Opt.* 2004. V. 43. N 27. P. 5263–5269.
2. Favre C., Boutou V., Hill S.C., Zimmer W., Krenz M., Lambrecht H., Yu J., Chang R.K., Woeste L., Wolf J.-P. White-light nanosource with directional emission // *Phys. Rev. Lett.* 2002. V. 89. N 3. 035002 (4 p.).
3. Courvoisier F., Boutou V., Favre C., Hill S.C., Wolf J.-P. Plasma formation dynamics within a water microdroplet on femtosecond time scales // *Opt. Lett.* 2003. V. 28. N 3. P. 206–208.
4. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А. Фазовый взрыв водной капли фемтосекундным лазерным импульсом: I. Динамика оптического пробоя // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22. № 8. С. 725–733.
5. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А. Фазовый взрыв водной капли фемтосекундным лазерным импульсом: II. Термодинамические траектории жидкости // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22. № 9. С. 844–848.

6. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Зуев В.Е., Кабанов А.М., Погодаев В.А. Нелинейная оптика атмосферного аэрозоля. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 260 с.
7. Fan C.H., Sun J., Longtin J.P. Breakdown threshold and localized electron density in water induced by ultrashort laser pulses // J. Appl. Phys. 2002. V. 91. N 4. P. 2530–2536.
8. Noack J., Vogel A. Laser-induced plasma formation in water at nanosecond to femtosecond time scales: calculation of thresholds, absorption coefficients, and energy density // IEEE J. Quantum Electron. 1999. V. 35. N 8. P. 1156–1167.
9. Землянов А.А., Гейнц Ю.Э. Пороги оптического пробоя прозрачной микрочастицы в нано-, пико- и фемтосекундном диапазонах длительностей лазерных импульсов // Оптика атмосфер. и океана. 2004. Т. 17. № 4. С. 306–311.
10. Khaled E.E.M., Hill S.C., Barber P.W. Internal electric energy in a spherical particle illuminated with a plane wave or off-axis Gaussian beam // Appl. Opt. 1994. V. 33. N 3. P. 524–532.
11. Букин О.А., Голык С.С., Ильин А.А., Кульчин Ю.Н., Соколова Е.Б., Бауло Е.Н. Лазерная искровая спектроскопия жидких сред с возбуждением импульсами фемтосекундной длительности // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22. № 3. С. 296–300.

*D.V. Apeksimov, O.A. Bukin, E.E. Bykova, Yu.E. Geints, S.S. Golik, A.A. Zemlyanov, A.A. Zemlyanov, A.A. Ilyin, A.M. Kabanov, G.G. Matvienko, V.K. Oshlakov, E.B. Sokolova.* **Interaction of GW laser pulses with liquid media. Part 1. Explosive boiling up of large isolated water droplets.**

The results of experiments on femtosecond GW laser pulse interaction with isolated millimeter-size water droplets are presented. The temporal and spatial dynamics of optical breakdown in the volume of a liquid particle is investigated. The mechanical fragmentation of the droplet as a result of the evaporation and explosion of superheated areas is also discussed. The spectral characteristics of water particle emission during its explosive boiling are investigated.