

Соколова Екатерина Борисовна

**СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЫ ПРИ
ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ С ЖИДКИМИ СРЕДАМИ**

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Владивосток – 2013

Работа выполнена в Федеральном бюджетном государственном учреждении науки Институте автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук

Научный руководитель: Букин Олег Алексеевич, профессор,
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты: Долгих Григорий Иванович, чл.-корр. РАН,
профессор, доктор физико-математических наук, заведующий отделом, Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивостока

Луговой Владимир Александрович,
профессор, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Дальневосточного государственного университета путей сообщения, г. Хабаровска

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск

Защита состоится «19» апреля 2013г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д005.007.02 при Институте автоматики и процессов управления ДВО РАН по адресу: 690041 г. Владивосток, ул. Радио, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института автоматики и процессов управления ДВО РАН.

Автореферат разослан « 18 » марта 2013 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 005.007.02,

кандидат технических наук, доцент



Гамаюнов Е.Л.

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Актуальность диссертационной работы связана с проблемой взаимодействия ультракоротких лазерных импульсов с жидкими средами. На сегодняшний день фундаментальные исследования в данной области, как правило, связаны с изучением таких нелинейных процессов, как ионизация, самофокусировка и филаментация лазерного излучения, генерация гармоник и т.д. Помимо этого, огромное значение имеют прикладные исследования, среди которых стоит выделить спектроскопию с использованием филаментов, и фемтосекундную лазерную искровую спектроскопию (ЛИС). В последнем случае плазма генерируется при взаимодействии тераваттного лазерного излучения с поверхностью жидкости. В спектре такой плазмы регистрируются эмиссионные линии ионов, атомов и молекул, что позволяет, используя калибровочные зависимости, определить содержание исследуемых элементов. Как правило, исследования спектральных характеристик, динамики электронной плотности и температуры плазмы при взаимодействии фемтосекундного лазерного излучения с жидкостями проводятся на временном интервале 1 нс, что в первую очередь связано с вышеупомянутыми фундаментальными исследованиями. Но спектрально-временные характеристики плазмы пока еще не достаточно изучены на временах, превышающих 10 нс, что говорит о необходимости детального исследования, т.к. эти параметры являются существенными для ЛИС. Помимо этого, важно оценить температуру и электронную плотность, а также проверить выполнимость критерия локального термодинамического равновесия (ЛТР). Поскольку ЛИС является оперативным и бесконтактным методом исследования вещества, одной из задач которой является понижение пределов обнаружения, то представляется актуальным исследование возможностей фемтосекундной лазерной искровой спектроскопии для разработки методов мониторинга морских акваторий и биологических объектов.

Цель и задачи исследования.

Целью настоящей работы является диагностика плазмы, генерируемой фемтосекундными лазерными импульсами на поверхности жидкости для разра-

ботки метода фемтосекундной лазерной искровой спектроскопии. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Исследование спектрального состава излучения плазмы морской воды в зависимости от длительности возбуждающего импульса.
2. Исследование временных характеристик линейчатого и сплошного спектров при пробое на поверхности морской воды.
3. Оценка температуры и электронной плотности плазмы.
4. Определение пределов обнаружения и соотношение между пределами обнаружения различных элементов.
5. Оценка возможности ЛИС при двухимпульсном возбуждении.
6. Исследование спектрального состава плазмы при пробое на поверхности фильтров с осажденными на них клетками фитопланктона.

Научная новизна результатов.

В диссертационной работе впервые были получены следующие результаты для плазмы, генерируемой фемтосекундными импульсами 50 фс на длине волны 800 нм с энергией в импульсе 1.1 мДж:

1. Проведено сравнение эмиссионных спектров плазмы генерируемых на поверхности морской воды при длительностях возбуждающего импульса 50 и 650 фс.
2. Исследована динамика формирования эмиссионных спектров при варьировании времени задержки регистрации относительно лазерного импульса, определены характерные времена спада интенсивностей эмиссионных линий и фона.
3. Произведена оценка температуры и электронной плотности фемтосекундной лазерной плазмы.
4. Зарегистрировано снижение пределов обнаружения элементов при использовании импульсов фемтосекундной длительности по сравнению с импульсами наносекундной длительности.
5. Рассмотрены соотношения пределов обнаружения элементов и их связь с поведением констант скоростей возбуждения.
6. Исследована возможность повышения чувствительности метода ЛИС при двухимпульсном пробое на поверхности морской воды.

7. Произведен спектральный анализ биологических материалов на примере клеток фитопланктона в целях мониторинга окружающей среды методом фемтосекундной лазерной искровой спектроскопии.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. При пробое фемтосекундными лазерными импульсами на поверхности жидкости с задержкой регистрации спектра относительно лазерного импульса порядка десяти наносекунд отсутствуют эмиссионные линии ионов азота и кислорода характерные для наносекундной плазмы.
2. Для элементов, относящихся к группе щелочно-земельных металлов (Ca, Mg), присутствующих в морской воде, регистрируются эмиссионные линии атомов и однократно заряженных ионов, для щелочных (Na) – только атомарные линии, поскольку последние обладают более низким потенциалом возбуждения.
3. При уменьшении энергии верхнего уровня исследуемых резонансных линий элементов, значения временных задержек регистрации спектра плазмы относительно лазерного импульса увеличиваются.
4. Константы скоростей возбуждения атомов и ионов из основного состояния позволяют определить соотношения пределов обнаружения элементов методом фемтосекундной лазерной искровой спектроскопии.

Научная и практическая значимость работы.

Расчет температуры и электронной плотности плазмы, констант скоростей возбуждения позволил использовать полученные результаты для разработки метода фемтосекундной лазерной искровой спектроскопии и для определения оптимальных спектрально-временных характеристик плазмы с целью повышения чувствительности метода лазерной искровой спектроскопии.

В ходе проведенных исследований были получены патенты на полезную модель «Лазерно-искровой спектрометр с микропозиционированием» - № 95844 и патент на изобретение «Способ лазерно-искрового спектрального анализа для определения элементного состава образца вещества» - № 2436070.

Апробация работы.

Основные результаты, вошедшие в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

XV, XVI, XVII и XVIII International Symposium “Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics”, Tomsk, Russia, (2008, 2009, 2011, 2012); Asia-Pacific Conference on Fundamental Problems of Opto and Microelectronics, Vladivostok, Russia, 2009; IV и VI International Conference “Current problems in Optics of Natural Waters”, St.-Peterburg, Russia, (2009, 2011); 18th Annual Meeting “Understanding ecosystem dynamics and pursuing ecosystem approaches to management”, Jeju, Korea, 2009; “International conference on coherent and nonlinear optics” “Conference on lasers, applications, and technologies”, Kazan, Russia, 2010; “Atomic and Molecular Pulsed Lasers”, Tomsk, Russia, 2011; 7th International Conference on Laser Induced Breakdown Spectroscopy, Luxor, Egypt, 2012; Всероссийская конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по физик, ДВГУ, г.Владивосток, Россия, (2007, 2009, 2010, 2011); 3-я и 4-ая конференции молодых ученых «Океанологические исследования», ТОИ ДВО РАН, г.Владивосток, Россия, (2008, 2009); 15-ая всероссийская научная конференция студентов - физиков и молодых ученых ВНКСФ-15, Кемерово - Томск, Россия, 2009; VI Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики - 2010», Санкт-Петербург, Россия, 2010; XXIII Всероссийская Научная Конференция «Распространение радиоволн», г.Йошкар-Ола, Россия, 2011; X Международной Школы молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А.Г. Колесника, г. Томск, Россия; 2012, Актуальные проблемы радиофизики «АПР-2012», г. Томск, Россия, 2012.

Достоверность полученных результатов обусловлена:

использованием современного высокотехнологичного оборудования и методическим контролем регистрации и обработки спектральных данных. Применяемые в работе датчики и приборы стандартизированы и прошли международную сертификацию, а их внутренняя погрешность не выходит за рамки технической документации, сохраняя точность полученных результатов. Статистика экспериментальных данных подтверждает воспроизводимость результатов, а полученные измерения согласуются с результатами других авторов и не противоречат им.

Публикации.

По теме диссертации, опубликовано 17 печатных работ, из них 15 статей в журналах из перечня ВАК РФ [1-15], 2 патента на полезную модель и на изобретение [16, 17].

Личный вклад автора.

Автор работы принимал участие в подготовке и выполнении экспериментальных работ, обработке экспериментальных данных, интерпретации полученных результатов. Обсуждение и написание статей, патентов и тезисов докладов выполнено в соавторстве при его непосредственном участии. Вошедшие в диссертацию результаты отражают итоги исследований, проведенных автором в ИАПУ ДВО РАН совместно с сотрудниками лаборатории лазерной спектроскопии Школы естественных наук Дальневосточного федерального университета.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 173 библиографические ссылки. Общий объем диссертации составляет 120 страниц. Работа содержит 38 рисунков.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования и проанализировано современное состояние данной тематики. Сформулированы цель и задачи работы, приведено краткое описание материала диссертации, обсуждена научная и практическая значимость представляемого материала.

В **первой главе** представлен литературный обзор, позволяющий оценить вклад других авторов в направление, занимающееся методом лазерной искровой спектроскопии при формировании нано- и фемтосекундного лазерного пробоя.

В *разделе 1.1* рассмотрены основные принципы метода лазерной искровой спектроскопии. Описан процесс формирования лазерного пробоя на поверхности твердых тел, жидкостей и биологических материалов, начиная с процесса термического нагрева взаимодействующей поверхности и заканчивая испа-

рением и разлетом исследуемого материала. Проанализировано поведение интенсивности спектральных линий в зависимости от времени задержки регистрации относительно лазерного импульса.

Основные характеристики лазерного пробоя, такие как электронная плотность, порог пробоя, поглощающая способность и др. представлены в *разделе 1.2*. На основе этих данных произведена оценка динамики распространения плазмы в жидкости в зависимости от длительности возбуждающего импульса.

В *разделе 1.3* рассмотрен способ двухимпульсного возбуждения лазерной плазмы импульсами нано- и фемтосекундной длительности, где описаны причины повышения чувствительности метода ЛИС при данных способах возбуждения.

Во **второй главе** описана экспериментальная установка с параметрами возбуждающей системы и характеристиками регистрирующей аппаратуры.

В *разделе 2.1* представлена и описана схема установки применяемой для формирования одноимпульсного фемтосекундного лазерного пробоя на поверхности жидкостей и для регистрации эмиссионных спектров плазмы (рис.1).

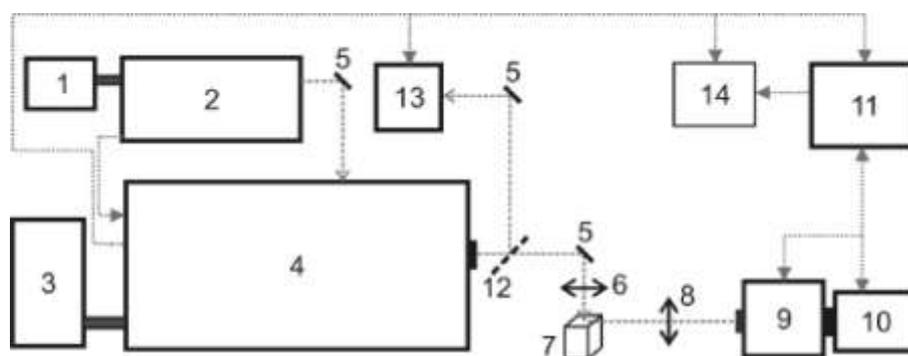


Рис. 1. Экспериментальная установка одноимпульсного способа возбуждения лазерной плазмы и система регистрации эмиссионных спектров. 1, 3 - лазеры накачки (Millenia - Nd:YVO₄) и (Empower - Nd:YLF); 2 - фемтосекундный Ti:sapphire лазер (Tsunami); 4 - Ti:sapphire усилитель (Spitfire PRO 40F); 5 - система поворотных диэлектрических зеркал с коэффициентом отражения 99%; 6 - линза с фокусным расстоянием 150 мм; 7 - оптическая кювета; 8 - кварцевая линза с фокусным расстоянием 100 мм; 9 - спектрограф (SpectraPro 2500i); 10 - ICCD камера с усилителем яркости (PicoStar HR); 11 - компьютер; 12 - диэлектрический светоделитель с коэффициентом отражения 3%; 13 - автокоррелятор; 14 - плата задержки.

Способ подготовки проб к анализу, представленных в виде солевых растворов исследуемых элементов для определения их пределов обнаружения, проб морской воды, а также биологических проб на примере клеток фитопланктона осажденных на поверхности беззольных фильтров описан в *разделе 2.2*. Там же рассмотрены характеристики и особенности ICCD камеры с усилителем яркости (PicoStar HR, LaVision), включающей спектрограф (SpectraPro 2500i, Spectra Physics), позволяющей менять пространственно-временные параметры регистрации эмиссионных спектров фемтосекундной лазерной плазмы.

В *разделе 2.3* представлена схема экспериментального лазерного комплекса по двухимпульсному способу возбуждения фемтосекундной лазерной плазмы (рис.2).

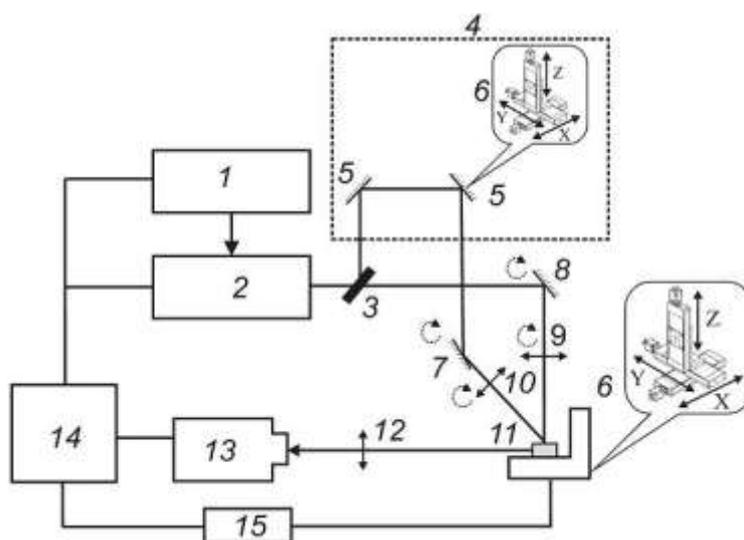


Рис. 2. Экспериментальный комплекс двухимпульсного способа возбуждения лазерной плазмы и система регистрации эмиссионных спектров. 1 - лазер накачки (Millennia Pro) и генератор (Tsunami); 2 - лазер накачки (Etrpower) и усилитель (Spitfire PRO); 3 - диэлектрический светоделитель с коэффициентом отражения 50%; 4 - оптическая линия задержки, состоящая из поворотных диэлектрических зеркал 5 и транслятора-микропозиционера 6; 7 и 8 - подвижные поворотные диэлектрические зеркала; 9 и 10 - линзы с фокусным расстоянием 100 мм; 11 - исследуемый образец; 12 - линза с фокусным расстоянием 100 мм; 13 - система регистрации спектров (ICCD камера PicoStar HR и спектрограф SpectraPro 2500i); 14 - компьютер; 15 - контроллер трехкоординатного позиционера BSC103.

В третьей главе рассмотрены спектрально-временные характеристики фемтосекундного лазерного пробоя на поверхности жидкостей и биологических объектов и произведена оценка термодинамических параметров плазмы.

В разделе 3.1 приведены данные спектрального состава излучения плазмы генерируемой на поверхности морской воды при различных длительностях возбуждающего импульса 50 и 650 фс. На спектрах отчетливо видны эмиссионные линии элементов присутствующих в морской воде в высоких концентрациях (Mg, Ca, Na), линии атмосферных газов (азот, кислород, водород). Обнаружено, что возбуждение длительностью импульса 50 фс более эффективно, чем 650 фс из-за низкого фона излучения плазмы.

В разделе 3.2 исследован спектральный состав плазмы при пробое на поверхности фильтров с осажденными на них клетками фитопланктона. Показано сравнение спектральных результатов анализа двух проб морской воды, пропущенных через беззольные фильтры. Забор первой пробы произведен за год до фильтрации, а второй пробы за сутки до осаждения и измерения и был взят в прибрежной зоне г. Владивостока.

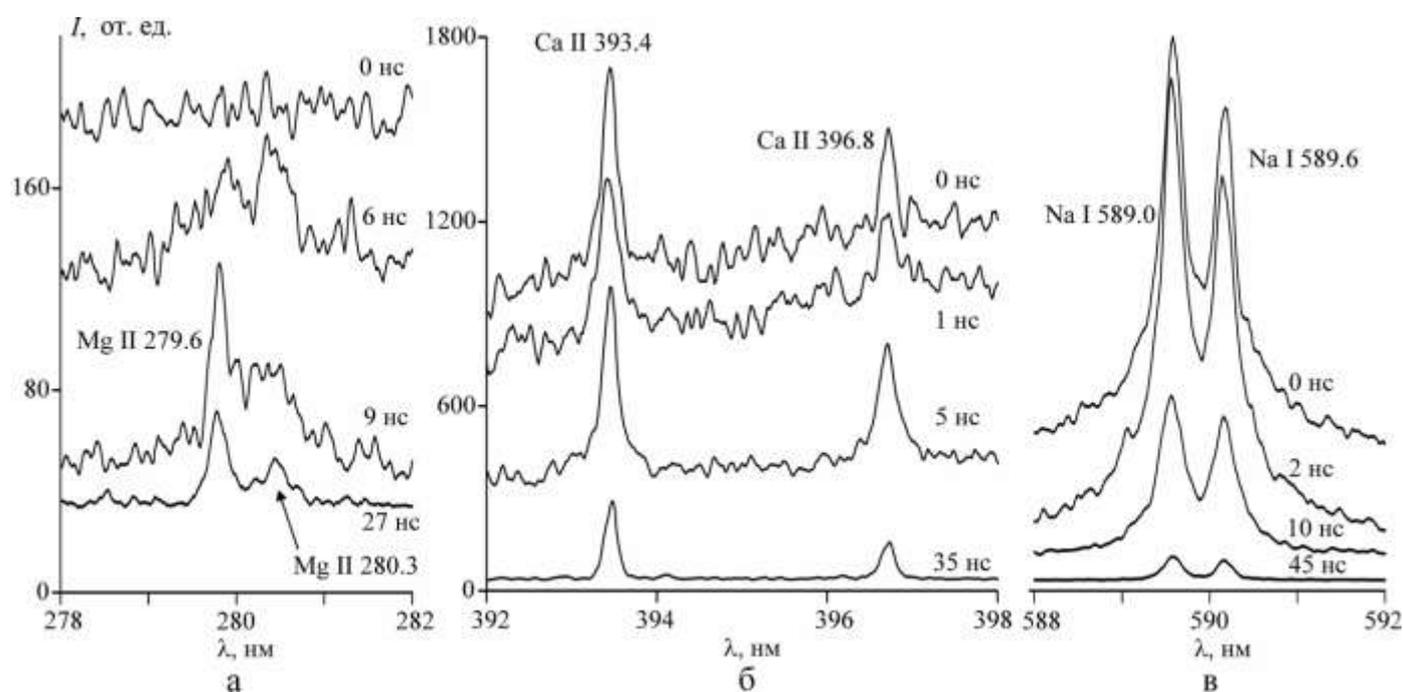


Рис. 3. Динамика спектров линий дублетов Mg, Ca и Na относительно временной задержки при пробое лазерным импульсом 50 фс в морской воде, шкала интенсивности для б и в одинакова.

Отмечено, что эмиссионные линии железа не были зарегистрированы в первой пробе вследствие малых концентраций, что предположительно связано с разложением клеток фитопланктона в морской воде и их прохождением сквозь поры фильтра. Во второй пробе наблюдалось большее число линий линейчатого спектра плазмы, интенсивность свечения которых выше, чем в первой пробе.

Результаты анализа показали, что фемтосекундный ЛИС позволяет регистрировать элементный состав клеток фитопланктона и обнаружить микроэлементы в пробах, также выявлено, что анализ морской воды и клеток фитопланктона необходимо осуществлять сразу после забора проб.

В *разделе 3.3* описаны временные характеристики линейчатого и сплошного спектров при пробое на поверхности морской воды импульсами длительностью 50 фс с экспозицией камеры 500 пс. Исследования проводились для наиболее интенсивных эмиссионных линии дублетов Ca, Mg и Na в морской воде (рис.3). Временной интервал задержки регистрации спектра относительно лазерного импульса (t_d) варьировался от 0 до 90 нс.

Исследован характер спада интенсивностей сплошного спектра (рис.4). Наблюдалось быстрое уменьшение интенсивности сплошного спектра для Na с характерным временем $\tau = 1.9$ нс, а для Ca и Mg были зарегистрированы практически равные значения $\tau = 4.2$ нс и $\tau = 4.7$ нс.

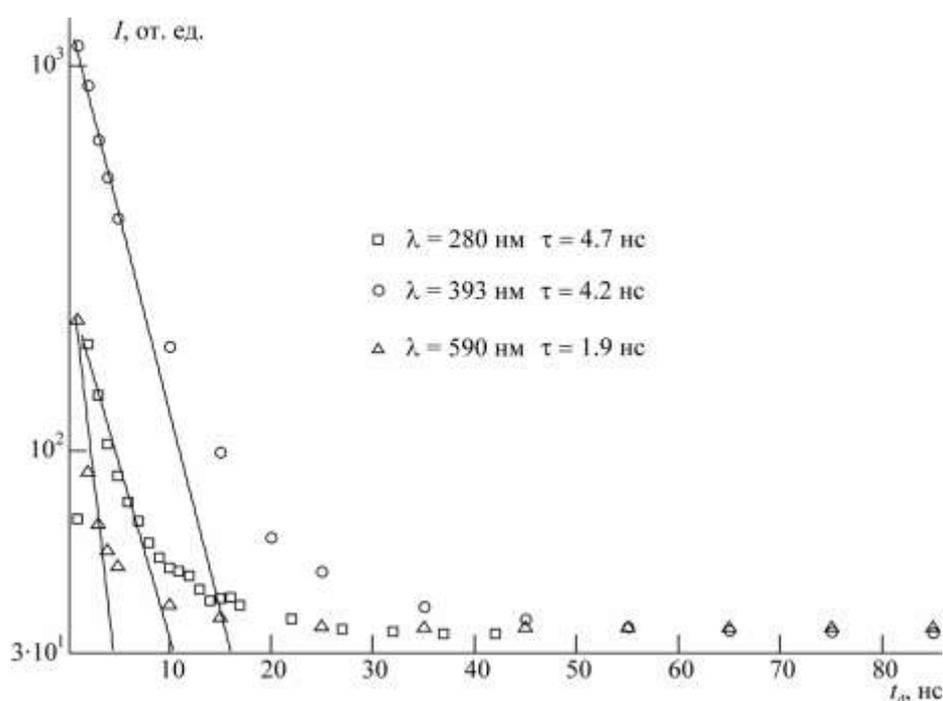


Рис.4. Динамика интенсивностей сплошного спектра.

Спад интенсивности сплошного спектра на временном промежутке $0 \div 90$ нс от максимального значения аппроксимировался биэкспоненциальной функцией, что совпало с выводами других работ по наносекундному пробую.

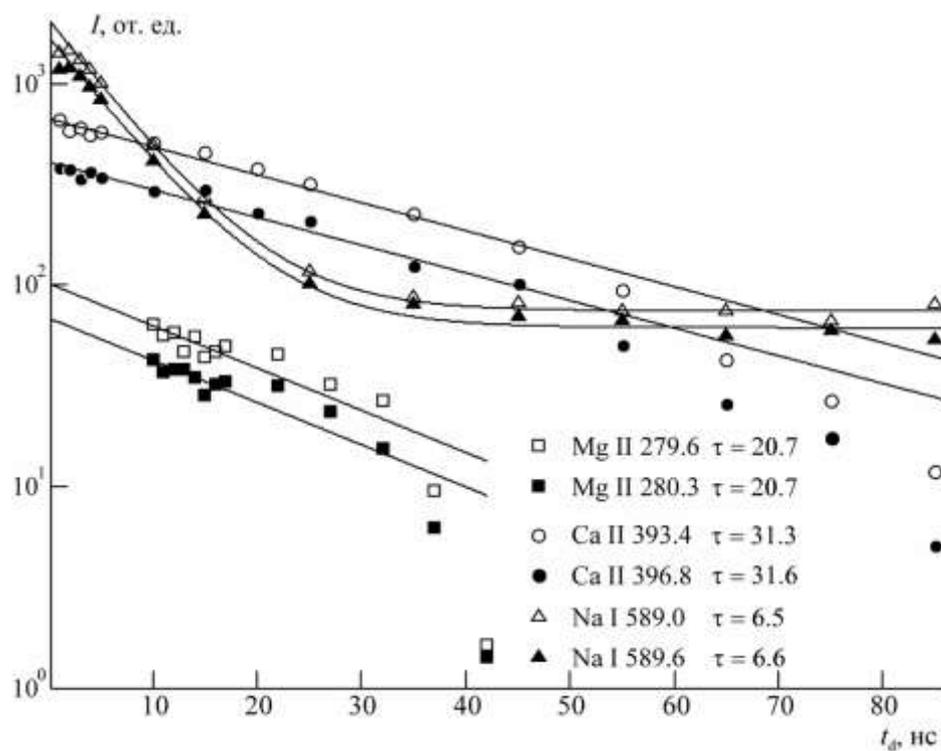


Рис. 5. Динамика интенсивностей эмиссионных линий дублетов Mg, Ca и Na.

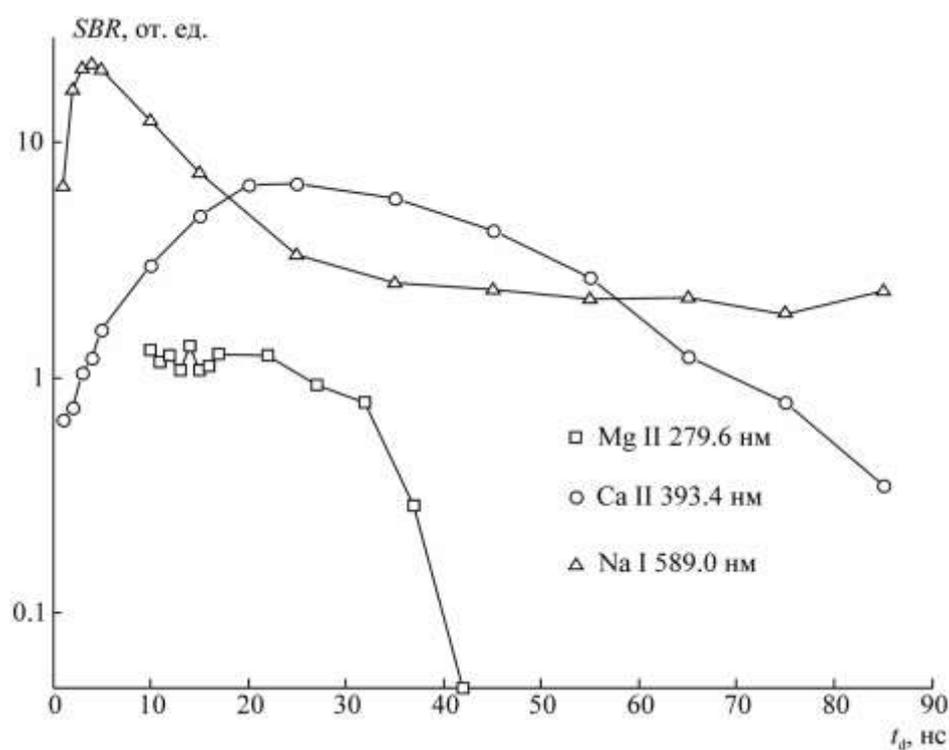


Рис.6. Соотношение сигнал к фону для эмиссионных линий Mg, Ca, Na.

Динамика интенсивности исследуемых дублетов Mg, Ca и Na и результаты аппроксимации моноэкспоненциальной зависимостью представлены на (рис.5). Для линий ионов медленный спад интенсивности сменялся быстрым и наблюдалось отклонение от моноэкспоненциальной зависимости (для Mg - при времени задержки $t_d \geq 35$ нс, для Ca - при $t_d \geq 55$ нс), а для линии Na был характерен наиболее быстрый спад от максимального значения. Наименьшие характерные времена наблюдались для Na $\tau = 6.5$ нс, наибольшие - для Ca $\tau = 31.3$ нс и для Mg $\tau = 20.7$ нс.

Произведена оценка динамики отношения интенсивностей линий к фону (SBR) (рис. 6). Наиболее быстро сплошной фон спадал для Na $\lambda = 589$ нм, наиболее медленно - для Ca $\lambda = 393$ нм, таким образом, SBR_{\max} достигался быстрее всего для Na при $t_d = 5$ нс и медленнее всего для Ca при $t_d = 20$ нс. Постоянное значение фона и интенсивности линии привели к тому, что SBR для Na при $t_d > 45$ нс практически не менялся.

В разделе 3.4 оценена температура и электронная плотность плазмы на основе спектров ЛИС полученной при пробое на поверхности морской воды со временем экспозиции 200 нс. В работе рассмотрена динамика молекулярных полос первой отрицательной и положительной, и второй положительной систем азота при временной задержке $t_d = 20$ нс и $t_d = 40$ нс.

При увеличении времени задержки с $t_d = 20$ нс до $t_d = 40$ нс интенсивность сплошного спектра уменьшалась до фонового значения, исчезала линия кислорода O I (778 нм) и полосы, обусловленные переходами с высоковозбужденных уровней молекулы азота. Учтено, что все три полосы молекулярного азота вносят наибольший вклад в излучение воздушной плазмы при температуре $T_e = 6000$ К, а с понижением температуры плазмы вторая положительная и первая отрицательная системы исчезают, и при $T_e = 4000$ К наибольший вклад в излучение плазмы воздуха вносит первая положительная система азота. Таким образом, показано, что при увеличении времени задержки с $t_d = 20$ нс до $t_d = 40$ нс температура плазмы уменьшилась на 2000 К.

Для оценки электронной плотности проанализированы работы других авторов, в которых одним важным фактором являлось наличие ЛТР в плазме.

В состоянии ЛТР нижняя граница электронной плотности - N_e^{LTE} , определена Гримом:

$$N_e^{LTE} \geq 9 \cdot 10^{17} \left(\frac{E_2}{E_H} \right)^3 \left(\frac{T_e}{E_H} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где T_e - электронная температура плазмы, E_2 - энергия возбужденного уровня, E_H - энергия ионизации водорода. Основываясь на (1) рассчитана критическая электронная плотность с учетом ЛТР для интенсивных компонент дублетов при $t_d = 40$ нс, т.е. когда температура плазмы $T_e = 4000$ К.

Для оценки электронной плотности применялось соотношение времени тройной рекомбинации - τ_{TBR} (2), так как этот процесс является преобладающим по отношению к процессу радиационной рекомбинации, условие которого не выполняется в нашем случае:

$$\tau_{TBR} = \frac{T_e^{9/2}}{8.75 \cdot 10^{-27} \cdot z^3 \cdot N_e^2}, \quad (2)$$

где z - заряд оставшегося иона, N_e - электронная плотность. На основе данных диаграмм Гротриана для Ca, Mg, Na и положения верхних и нижних границ уровней, образующих «узкое место», был сделан вывод, что $\tau_{TBR} \leq \tau$ - характерного времени спада интенсивности линии.

Согласно этому для оценки электронной плотности было положено, что $\tau_{TBR} \sim \tau$. Для Na была взята температура $T_e = 6000$ К при $t_d = 20$ нс с характерным временем спада 6.5 нс, а для Ca II и Mg II - $T_e = 4000$ К при $t_d = 40$ нс со значениями характерных времен спада Ca II - 31.3 нс и Mg II - 20.7 нс.

Исходя из полученных данных, был сделан вывод, что в силу большей энергии верхнего уровня, ЛТР для Mg нарушается при $t_d \geq 35$ нс - раньше, чем для Ca - при $t_d \geq 55$ нс. ЛТР для Na I соблюдается на всем временном интервале. В результате динамику интенсивности линий ионов не удастся описать моноэкспоненциальной функцией в отличие от интенсивности линий натрия.

В **четвертой главе** определены пределы обнаружения основных элементов входящих в состав морской воды на основе анализа солевых растворов (Ca, Na, Mg, Al, Ba, Cu, Fe, K, Zn). Пределы обнаружения в *разделе 4.1* выражались как концентрация, которую можно детектировать с разумной определенностью и определялись, как значение $k \cdot \sigma / m$ (где m - это значение наклона калибровочной кривой, σ - стандартное отклонение фона в чистом образце (в нашем случае дистиллированная вода), а $k = 3$, что соответствует доверительной вероят-

ности, составляющей не менее 95%). В табл. 1 приведены полученные результаты.

Табл.1. Значения пределов обнаружения

Элементы	λ , нм	Частота импульсов, кГц	t_d , нс	Экспозиция, нс	Пределы обнаружения, г/л
Al I	396.1	1	150	200	$1.9 \cdot 10^{-4}$
Ba II	455.4	0.1	72	200	$8.7 \cdot 10^{-5}$
Ca II	393.3	0.5	70	200	$1 \cdot 10^{-5}$
Cu I	324.7	0.1	92	200	$7.8 \cdot 10^{-4}$
Fe I	373.7	1	170	200	$3.4 \cdot 10^{-3}$
K I	766.5	1	180	200	$6 \cdot 10^{-6}$
Mg I	285.2	1	120	200	$1 \cdot 10^{-3}$
Na I	588.9	1	210	500	$9 \cdot 10^{-7}$
Zn I	213.8	1	57	200	$2.5 \cdot 10^{-3}$

Оценка соотношений пределов обнаружения на основе констант скоростей возбуждения показала, что: константа скорости возбуждения распределяется по элементам $k(K) > k(Na) > k(Al) > k(Mg) > k(Zn)$, а пределы обнаружения $(Na) > (K) > (Al) > (Mg) > (Zn)$.

В разделе 4.2 приведено сравнение соотношений пределов обнаружения, которое показывает, что чем больше скорость возбуждения, тем меньше предел обнаружения. В случае с K и Na соотношение нарушается поскольку, K наблюдается на фоне первой положительной системы азота N_2 , т.е. фон получается больше, чем у Na. Сделано заключение, что чем больше энергия перехода, тем меньше временная задержка. Исключение составляют линии K и Na поскольку по данным элементам необходимо провести более детальное исследование SNR (сигнал/шум) и SBR (сигнал/фон) в зависимости от времени задержки. Также возможной причиной может служить то, что регистрация Na производилась с экспозицией 500 нс, а у всех остальных элементов 200 нс.

Оценка возможности двухимпульсного способа возбуждения при пробое на поверхности солевых растворов по интенсивным линиям Na и Mg произведена в разделе 4.3.

Сравнение интенсивностей эмиссионных линий (рис.7) показало, что при двухимпульсном ЛИС наблюдается увеличение отношения сигнала к фону (SBR) для линии Mg II (279.5 нм) до 100%, а для эмиссионной линии Na I (588.9 нм) до 15% при временной задержке между первым и вторым импульсом 500 пс.

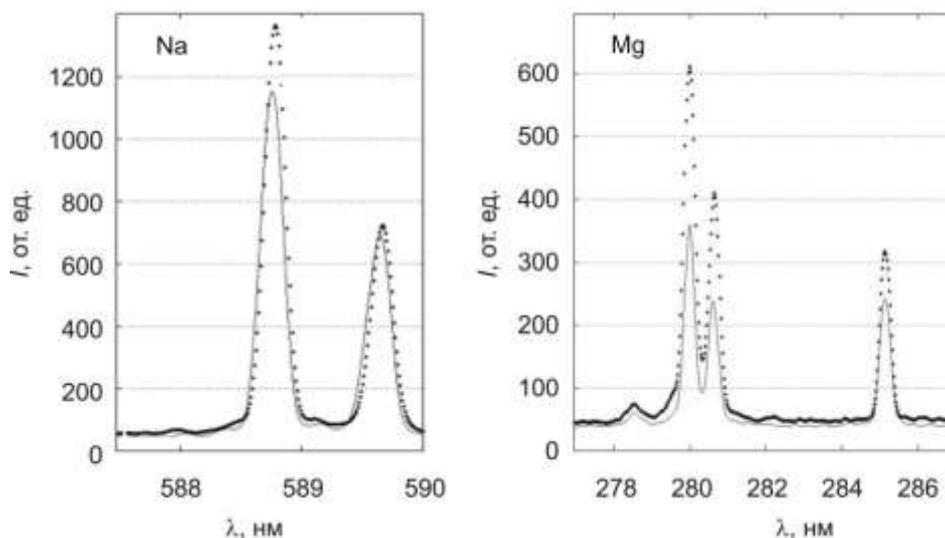


Рис. 7. Спектры интенсивностей линий Na и Mg при одно- (сплошная линия) и двухимпульсном (точечная линия) пробое на поверхности солевых растворов.

В **заключении** изложены основные результаты диссертации.

Основные результаты работы

В работе впервые получены следующие основные результаты:

1. При фемтосекундном пробое на поверхности морской воды в спектрах присутствуют эмиссионные линии элементов, обладающих высокой концентрацией, и отсутствуют линии ионов атмосферного азота N II. Показано, что возбуждение длительностью импульса 50 фс более эффективно, чем 650 фс из-за низкого фона излучения плазмы.
2. Время спада сплошного спектра плазмы генерируемой на поверхности морской воды находится в пределах 1.9 - 4.7 нс, а время спада эмиссионных линий 6.5 - 31.6 нс.

3. Максимальные значения интенсивности сплошного спектра и эмиссионных линий наблюдаются при $t_d = 1 - 2$ нс, исключение составляет Mg, максимальная интенсивность линии которого регистрируется при $t_d = 9$ нс. SBR_{\max} достигается быстрее всего для Na при $t_d = 5$ нс и медленнее всего для Ca при $t_d = 20$ нс.
4. При увеличении времени задержки на 20 нс температура фемтосекундной плазмы генерируемой на поверхности морской воды уменьшатся с 6000 до 4000 К, а электронная плотность с $3.0 \cdot 10^{16}$ до $2.4 \cdot 10^{15}$ см⁻³.
5. Определены пределы обнаружения в солевых растворах для Ca, Mg, Na, Al, Ba, Cu, Fe, K, Zn. Соотношение констант скоростей возбуждения и пределов обнаружения показало, что чем больше скорость возбуждения иона или атома электронным ударом из основного состояния, тем меньше предел обнаружения.
6. При двухимпульсном режиме возбуждения в солевых растворах MgSO₄ и NaCl, наблюдалось двукратное увеличение интенсивностей линий по отношению к значениям сплошного спектра для линии Mg II (279.5 нм) по сравнению с одноимпульсным способом возбуждения, а для эмиссионной линии Na I (588.9 нм) это увеличение составило 15% при временной задержке между первым и вторым импульсом 500 пс.

Основные публикации по теме диссертации

1. Букин О. А., Голик 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 атмосферы и океана. 2009. Т. 22. № 3. С. 296-300.
2. Апексимов 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., Соколова Е. Б. Взаимодействие гигаваттных лазерных импульсов с жидкими средами. Часть 1. Взрывное вскипание крупных изолированных водных капель // Оптика атмосферы 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. Фи-

- ламентация острогофокусированного ультракороткого лазерного излучения на 800 нм и 400 нм. Измерения нелинейного коэффициента преломления воздуха // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 5. С. 351-358.
4. 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 атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 8. С. 648-653.
 5. Geints Y. E., Zemlyanov A. A., Kabanov A. M., Bykova E. E., Apeksimov D. V., Bukin O. A., Sokolova E. B., Golik S. S., Ilyin A. A. Angular diagram of broadband emission of millimeter-sized water droplets exposed to gigawatt femtosecond laser pulses // Applied Optics. 2011. V. 50. P. 5291-5298.
 6. Ильин А. А., Соколова Е. Б., Голик С. С., Букин О. А., Шмирко К.А. Динамика спектров излучения плазмы, возбуждаемой излучением фемтосекундного лазера при воздействии на поверхность морской воды // Журнал прикладной спектроскопии. 2011. Т. 78. № 6. С. 921-926.
 7. Апексимов Д. В., 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 водными каплями // Прикладная физика. 2011. № 6. С. 13-21.
 8. Golik S. S., Ilyin A. A., Sokolova E. B. Quantitative Elemental Determination in Water by Femtosecond Laser-Induced Breakdown Spectroscopy // Atmosphere Aerosol, Phytoplankton and its Influence on Climate Forming in the Pacific Ocean: Measurement New Method edited by V.F. Yurchik. Newcastle, UK: Cambridge Scholar Publishing, 2011. P. 5-12.
 9. Ильин А. А., Букин О. А., Соколова Е. Б., Голик С. С. Сравнение пределов обнаружения элементов в фемтосекундной лазерной искровой спектроскопии // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 5. С. 438-440.
 10. Ильин А. А., Букин О. А., Соколова Е. Б., Голик С. С., Шмирко К. А. Спектральные характеристики фемтосекундной лазерной плазмы, генерируемой на поверхности морской воды // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 5. С. 441-447.

11. Голик С. С., Букин О. А., Ильин А. А., Соколова Е. Б., Колесников А. В., Бабий М. Ю., Кульчин Ю. Н., Гальченко А. А. Определение пределов обнаружения элементов в воде методом фемтосекундной лазерно-искровой спектроскопии // Прикладная спектроскопия. 2012. Т. 79. № 3. С. 488-492.
12. Апексимов Д. В., 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., Петров А. В., Соколова Е. Б. Филаментация в воздухе сфокусированного импульса Ti:Sapphire лазера на двух гармониках // Прикладная физика. 2012. № 6. С. 14-22.
13. Апексимов Д. В., 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., Петров А. В., Соколова Е. Б. Воздействие фемтосекундных лазерных импульсов на миллиметровые водные капли // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 9/2. С. 187-190.
14. Апексимов Д. В., 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., Петров А. В., Соколова Е. Б. Филаментация фемтосекундных импульсов Ti:sa-лазера на первой и второй гармониках в жидких средах // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 9/2. С. 160-162.
15. Апексимов Д. В., 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., Петров А. В., Соколова Е. Б. Филаментация сфокусированных фемтосекундных импульсов Ti:Sa-лазера на первой и второй гармониках в воздухе // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 9/2. С. 184-186.
16. Патент на полезную модель «Лазерно-искровой спектрометр с микропозиционированием», номер патента: 95844, дата публикации: 10.07.2010, дата подачи заявки 17.02.2010, заявка 2010105743/22. Авторы: Ильин А. А., Голик С. С., Нагорный И. Г., Соколова Е. Б., Букин О. А..
17. Патент на изобретение «Способ лазерно-искрового спектрального анализа для определения элементного состава образца вещества», номер патента: 2436070, дата публикации: 10.12.2011, дата подачи заявки: 25.06.2010, заявка: 2010126121/28. Авторы: Кульчин Ю. Н., Букин О. А., Ильин А. А., Соколова Е. Б., Голик С. С.

Соколова Екатерина Борисовна

Спектрально-временные характеристики плазмы при взаимодействии
фемтосекундного лазерного излучения с жидкими средами

Автореферат

Подписано в печать 14.03.2013г. Уч. изд. л. 1,0 Усл. печ. л. 0,8
Формат 60x84/16 Заказ № 5

Тираж 100 экз.

Издано в ИАПУ ДВО РАН. 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5.
Отпечатано группой оперативной полиграфии ИАПУ ДВО РАН.
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5.