

На правах рукописи



БУЛАНОВ Алексей Владимирович

**Режимы движения плазменных фронтов и
динамика спектральных линий при оптическом
пробое в газе и на поверхности
конденсированных сред**

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Владивосток

2009

Работа выполнена в Тихоокеанском океанологическом институте им. В.И.

Ильичева Дальневосточного отделения Российской Академии наук

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

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук
доцент
Безвербный Александр Васильевич

доктор физико-математических наук,
профессор, член – корреспондент
РАН
Долгих Григорий Иванович

Ведущая организация: Институт космофизических
исследований и распространения
радиоволн ДВО РАН

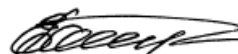
Защита состоится "29" декабря в 14 часов на заседании Диссертационного
совета Д005.007.02 в Институте автоматики и процессов управления ДВО РАН
по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТОИ ДВО РАН и ИАПУ
ДВО РАН

Автореферат разослан «___» 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д005.007.02

кандидат технических наук, доцент



Гамаюнов Е.Л.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Исследование механизмов лазерного пробоя в газовой атмосфере и на поверхности конденсированных сред является актуальной задачей. Результаты этих исследований используются для решения широкого круга фундаментальных и прикладных проблем: развитие методов разогрева лазерной плазмы, исследование процессов плазмообразования при взаимодействии мощного лазерного излучения с газовыми и конденсированными средами, получение многозарядной высокотемпературной плазмы, развитие методов лазерной искровой спектроскопии, разработка технологий лазерного напыления.

Механизм разлета плазмы (быстрая волна ионизации, светодетонационная волна, сверхзвуковая радиационная волна, пробойная волна, волна механизма электронной теплопроводности) зависит как от параметров лазерной системы (длин волны излучения, энергии и длительности импульса, способа фокусировки), так и от параметров окружающего газа (потенциала ионизации, сечения поглощения и ионизации ультрафиолетовыми квантами и др.)

В последнее время интерес к изучению механизмов движения лазерной плазмы обусловлен созданием лазерных устройств зажигания смесей горючих газов и воздуха, разработкой перенастраиваемых источников микроволнового диапазона, исследованием характеристик лазерной плазмы и взаимодействующих плазменных фронтов, а также коэффициентов поглощения лазерного излучения.

Режим движения плазмы определяет температуру и электронную плотность плазмы. Таким образом, данные исследования важны для разработки новых методов лазерной искровой спектроскопии.

Исследование динамики эмиссионных линий сплошного спектра и линий атмосферы, в которой проводится спектральный анализ, позволяет определить временной интервал, в котором наблюдаются максимальные величины контраст эмиссионных линий исследуемых элементов. Особенно актуальны эти исследования для лазерной искровой спектроскопии жидкостей. Преимуществом данного метода перед другими является возможность дистанционного измерения, отсутствие предварительной подготовки пробы, высокая степень автоматизации эксперимента и возможность определения элементного состава вне зависимости от фазового состояния анализируемого вещества.

Таким образом, **цель** диссертационной работы заключается в исследовании режимов движения плазменных фронтов и динамики спектральных линий при оптическом пробое газа и на поверхности конденсированных сред.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

- Исследовать режим движения разлетающейся плазмы в процессе лазерного пробоя в нормальной атмосфере.
- Изучить распределение интенсивности свечения плазмы в зависимости способа фокусировки лазерного излучения и исследование

спектроскопических параметров плазмы в области взаимодействия двух плазменных фронтов, распространяющихся во встречных направлениях в условиях пробоя нормальной атмосферы.

- Провести исследование временной динамики эмиссионных спектров излучения лазерной плазмы при оптическом пробое в атмосфере и на поверхности конденсированных сред
- Использовать полученные результаты для повышения чувствительности метода лазерной искровой спектроскопии с целью измерения элементного состава конденсированных сред

Научная новизна. В диссертационной работе получены следующие новые научные результаты:

1. Экспериментально и теоретически установлено, что фронт плазмы в нормальной атмосфере, созданный лазерным импульсом первой, второй и третьей гармониками Nd:YAG лазера плотностью мощности больше, чем 10^{11} Вт/см², движется в режиме быстрой волны ионизации навстречу лазерному излучению.

2. Определены оптимальные условия регистрации спектра, которые позволяют поднять контраст эмиссионных линий, регистрируемых на фоне сплошного спектра при оптическом пробое на поверхности конденсированных сред и в нормальной атмосфере.

3. Выявлены закономерности поведения спектральных линий мультиплетов азота и кислорода в области взаимодействия двух плазменных фронтов.

4. Показаны особенности временной зависимости интенсивности сплошного спектра, линий Na, Mg, Ca и молекулярных полос OH и CN, а также отношения интенсивности линии к фону при оптическом пробое на поверхности морской воды.

5. Разработана методика, позволяющая определить переходы, вносящие значительный вклад в излучение мультиплетов.

Практическая значимость работы.

Результаты работы могут быть применены на практике для:

- разработки методов управления движением плазменного фронта;
- увеличения чувствительности методов лазерной искровой спектроскопии измерения концентрации элементов;

Результаты работы использовались при выполнении проектов ДВО РАН №09-III-B_02-060 "Исследование режимов взаимодействия лазерных плазм генерируемых оптическим пробоем в атмосфере", ДВО РАН № 09-I-П9-01 "Исследование механизмов взаимодействия фемтосекундных лазерных импульсов с жидкими средами, газами и биологическими объектами с целью разработки новых методов зондирования океана и атмосферы", ДВО РАН № 09-II-СО-02-001 "Оптика фемтосекундных лазерных импульсов в атмосфере и океане", НИР № 2.1.1/1443 "Управление плазменным фронтом при оптическом пробое в конденсированных средах и газах" аналитической ведомственной программы "Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010)" Федерального агентства по образованию. Часть работы выполнялась в рамках проектов РФФИ №09-02-98508-р_восток_а "Исследование процессов

распространения фемтосекундных лазерных импульсов в морской воде" и № 06-05-96206 "Разработка комплексного оптоакустического метода и новых технологий дистанционного зондирования верхнего слоя океана". В этих НИР автор выполнял обязанности руководителя и исполнителя работ.

Основные положения, выносимые на защиту:

- При оптическом пробое в нормальной атмосфере, генерируемом первой, второй и третьей гармониками Nd:YAG лазера с интенсивностями излучения в диапазоне $10^{10} - 10^{12}$ Вт/см² и длительностью лазерного импульса 10 нс, наблюдается распространение плазменного фронта в режиме быстрой волны ионизации навстречу лазерному излучению.
- При взаимодействии встречных плазменных фронтов оптического пробоя в нормальной атмосфере наблюдается двукратное увеличение интенсивности эмиссионных линий по сравнению с интенсивностью аналогичных спектральных линий в невзаимодействующей плазме.
- Характерное время светимости мультиплетов ионов азота NII и кислорода OII в спектре оптического пробоя на поверхности жидкости составляет 400 нс, что позволяет использовать временную селекцию эмиссионных линий на фоне непрерывного излучения для увеличения чувствительности метода лазерной искровой спектроскопии.
- Наибольшие скорости распространения плазменного фронта при оптическом пробое в газе навстречу лазерному излучению наблюдается в режиме быстрой волны ионизации.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на 19 конференциях, включая 7 международных:

Публикация результатов работы. Основные результаты диссертации опубликованы в 32 печатных работах, в том числе 4 - в журналах, входящих в Перечень журналов ВАК.

Личный вклад автора. В составе коллектива авторов участвовал в разработке и проведении всех экспериментов, самостоятельно проводил отдельные экспериментальные исследования по лазерно-искровой спектроскопии, включая исследования в морских экспедициях в Японском и Охотском морях на парусном учебном судне "Надежда" (2004, 2006 г.г.) и малых НИС типа НИС "Малахит" в заливе Петра Великого Японского моря (2007-2009 г.г.). Самостоятельно проводил обработку и анализ полученных измерений, выполнял необходимые теоретические расчеты. Результаты, связанные с исследованиями особенностей динамики эмиссионных спектров, получены при решающем вкладе автора. Все защищаемые научные положения получены при основном вкладе автора.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 132 наименования. Работа представлена на 141 страницах, включая 5 таблиц и 34 рисунка

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируются цель и основные задачи исследования, даны основные положения, выносимые на защиту, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов

В **первой главе** представлен обзор литературных данных, механизмов оптического пробоя и современное состояние методов лазерной искровой спектроскопии конденсированных сред. Глава содержит 4 основных параграфа. В **параграфе 1.1** представлены основные представления о механизмах оптического пробоя газа, имеющиеся в отечественной и зарубежной литературе. Представлены данные о динамике пробоя под действием лазерного излучения. Показано, что имеющиеся данные, позволяют отчасти ответить на основной вопрос о том, как происходит ионизация газа лазерным лучом, при этом сформулированы ограничения имеющихся представлений.

В **параграфе 1.2** рассмотрены основные физические механизмы оптического пробоя на поверхности конденсированных сред. Показано, что в зависимости от интенсивности лазерного излучения (I) выделяют основные четыре стадии взаимодействия с металлами: а) поглощение излучения поверхностным слоем с последующим плавлением (диапазон значений интенсивности лазерного излучения на поверхности мишени $10^4 - 10^6$ Вт/см²); б) нагрев поверхности до температуры кипения, испарение и разлет прозрачных паров вплоть до момента лазерного пробоя ($I \sim 10^6 - 10^8$ Вт/см²); в) лазерный пробой и образование плазмы ($I > 10^7 - 10^9$ Вт/см²); г) образование волны поглощения лазерного излучения и формирование ударно-волновой структуры в результате разлета плазмы в буферный газ ($I \sim 10^7 - 10^9$ Вт/см²). Отмечено, что механизм оптического пробоя при облучении мощным лазерным излучением жидкостей существенным образом отличается от механизма взаимодействия лазерного излучения с металлами. В зависимости от интенсивности лазерного излучения различают несколько механизмов взаимодействия излучения с жидкостью: а) тепловое расширение; б) поверхностное испарение $I < 10^6$ Вт/см²; в) взрывное вскипание ($10^6 < I < 10^8$ Вт/см²); г) оптический пробой ($I > 10^8$ Вт/см²).

Во **второй главе** представлены экспериментальные и теоретические исследования режимов распространения плазменных фронтов при оптическом пробое.

В **параграфе 2.1** представлено описание экспериментальной установки и методики эксперимента. Для возбуждения оптического пробоя использовалась первая, вторая и третья гармоники излучения Nd:YAG лазера Brilliant В с различными плотностями мощности падающего излучения при длительности лазерного импульса 10 нс соответственно, фокусное расстояние линз 15 мм, импульс одномодовый с Гауссовским распределением интенсивности излучения относительно направления распространения, радиус пучка 6 мм, расходимость пучка менее 0,7 мрад. Излучение лазера "Brilliant В" (1) с помощью поворотного зеркала (2) и линзой (3) фокусировалось в нормальной атмосфере. Излучение плазмы оптического пробоя проецировалось линзой (6)

на входную щель монохроматора (7), сопряженного с CCD – камерой (5). Управление осуществлялось компьютером (8).

Во всех экспериментах в качестве регистрирующего устройства применялся многоканальный оптический анализатор спектра Flame Vision PRO System, состоящий из монохроматора SPECTRA-PRO фирмы Acton Research Corporation (США) и оптического усилителя яркости DiCAM-PRO фирмы PCO CCD IMAGING (Германия). Эта универсальность достигалась за счет того, что прибор позволяет производить все необходимые спектральные измерения, а также может использоваться в качестве цифровой фотокамеры с высоким пространственным и временным разрешением. Это позволило исследовать динамику ударных волн и режимы распространения плазменных фронтов, рассмотреть их взаимодействие, выявить некоторые характерные особенности и провести спектральные измерения в заинтересовавших нас пространственных и временных областях.

В параграфе 2.2 представлены экспериментальные результаты по распространению плазменных фронтов при оптическом пробое воздуха. Пробой воздуха наблюдается, как правило, через 1-2 нс от начала лазерного импульса. После начала пробоя расширение плазменного факела происходило, в основном, в направлении навстречу лучу, но наблюдалось движение фронта и в направлении распространения луча. Такая картина типична для всех длин волн.

Табл. 1. Зависимость максимальной скорости плазменного фронта от плотности мощности падающего излучения.

Плотность мощности падающего излучения, 10^{11} Вт/см ²	1.85	1.77	1.71	1.61	1.41	1.21	0.89	0.54	0.31
Максимальная скорость, км/с	279	249	227	200	188	180	160	145	105

В итоге можно отметить следующие закономерности в поведении скоростей плазменных фронтов:

- скорость движения навстречу лазерному лучу практически в три раза превышает скорость движения по лучу;
- характер временных зависимостей скоростей движения фронтов различен в зависимости от направления распространения фронта. Для направления по лазерному импульсу наблюдается резкое падение величины скорости (практически в пять раз) сразу после начала регистрации (после 3 нс с момента пробоя). Для направления навстречу лазерному лучу наблюдается иная картина, - в промежуток времени от 4 до 5 нс от момента пробоя наблюдается максимум скорости.

В параграфе 2.3 представлен теоретический анализ волн поглощения лазерного излучения с целью выявления механизма распространения плазмы навстречу лазерному излучению. Анализ выполнен на примере оптического пробоя лазерным излучением с длиной волны $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ в нормальной

атмосфере при интенсивностях применяемого лазерного излучения – $5 \cdot 10^8 - 11^{11}$ Вт/см². Задача определения механизма распространения плазмы сводится к сравнению скоростей для трех режимов: светодетонационного, радиационного и быстрой волны ионизации - СДВ, СРВ, БВИ. Если при данной интенсивности лазерного излучения один из этих механизмов обеспечивает наибольшую скорость распространения разряда, то плазма движется навстречу лазерному излучению именно в этом режиме. Выражение для скорости волны световой детонации от интенсивности лазерного излучения представлена формулой:

$$D = \left[\frac{2(\gamma^2 - 1)I}{\rho} \right]^{1/3} \quad (1)$$

где D – скорость движения фронта, γ - показатель адиабаты, I – интенсивность лазерного излучения, необходимая для поддержания режима световой детонации, ρ - плотность газа перед фронтом световой детонации.

Нижняя граница скорости БВИ находится из соотношения, полученного В.М. Фишером, В. М. Харашем (ЖЭТФ, 1983):

$$u_* = \frac{1}{zN_0} \int_{\varepsilon_i}^{\infty} d\varepsilon \int_0^1 d\mu \frac{\mu F_\varepsilon \sigma(\varepsilon)}{\sigma_a(\varepsilon)}, \quad I = 2N_0 u e(\bar{m}, T), \quad F_\varepsilon \approx F_{\varepsilon p}, \quad z \approx 10^{-3}. \quad (2)$$

Здесь N_0 – число Лошмидта, $e(\bar{m}, T)$ – внутренняя энергия газа за фронтом (в расчете на 1 исходный атом), $\bar{m}(T)$ – средний заряд плазмы, ε_i - энергия УФ кванта, соответствующего порогу ионизации молекулы кислорода, z , F_ε – степень ионизации и поток ионизирующих УФ квантов на границе фронта ионизации, $\mu \equiv \cos \vartheta$, $\sigma(\varepsilon) = 0.21\sigma_{iO_2}(\varepsilon) + 0.79\sigma_{iN_2}(\varepsilon)$ - суммарное сечение фотоионизации воздуха ($\sigma_{iO_2}(\varepsilon)$ и $\sigma_{iN_2}(\varepsilon)$ - сечения ионизации молекулярного кислорода и азота), $\sigma_a(\varepsilon)$ - суммарное сечение поглощения воздуха, определяемое аналогично сечению фотоионизации.

На рис. 1 представлены результаты расчетов скоростей фронта ионизации для трех режимов: СДВ, СРВ, БВИ. Скорость СДВ рассчитывалась по соотношению (1). Нижняя граница скорости БВИ определялась трижды: при $R = 0.15$ и $R = 0.01$ см, в обоих случаях $z = 3 \cdot 10^{-2}$, на основе (2), при $x = 0$ и для равновесного потока при $z = 10^{-3}$.

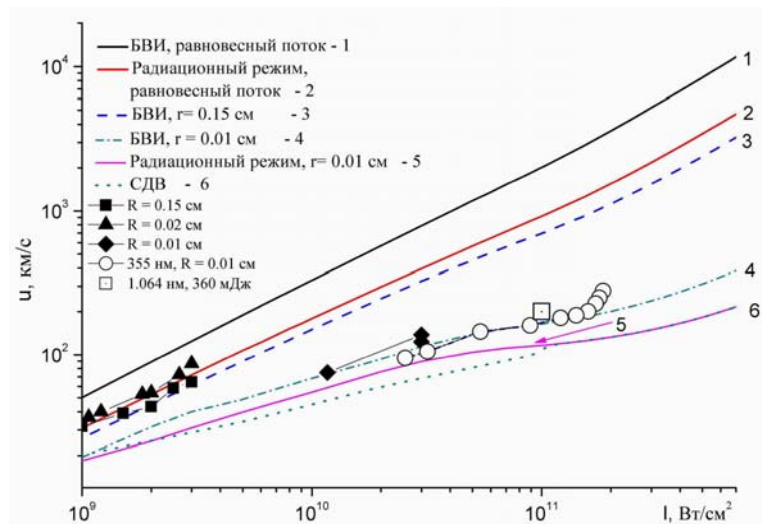


Рис. 1 Скорости распространения фронта ионизации, кривые – расчет, символы – данные экспериментов. 1 – нижняя граница скорости для БВИ ($z = 10^{-3}$, равновесный поток), 2 – радиационный режим ($z_0 = 3 \cdot 10^{-2}$, равновесный поток), 3 – БВИ ($z = 3 \cdot 10^{-2}$, $R = 0.15$), 4 – БВИ ($z = 3 \cdot 10^{-2}$, $R = 0.01$), 5 – радиационный

режим ($z_0 = 3 \cdot 10^{-2}$, $R = 0.01$), штрих пунктирная кривая – СДВ. ■ – скорость БВИ, $R \approx 0.15$, ▲ – БВИ, $R \approx 0.02$, ● – БВИ, $R \approx 0.01$, ○ – БВИ, 355 нм, $R \approx 0.01$, □ – БВИ, 1064 нм, $R \approx 0.01$

На основании сравнения экспериментальных и теоретических результатов для условий проведенных экспериментов можно утверждать, что механизм распространения плазменного фронта навстречу излучению отвечает режиму быстрой волны ионизации (на рис.1 кривая БВИ при $R=0.01$ см совпадает с экспериментальным значением скорости фронта). Малые скорости БВИ и увеличение степени ионизации на границе фронта до $z \sim 10^{-2}$ при $R = 0.01$ см объясняются тем, что поток ионизирующего излучение ниже равновесного. При таких малых пятнах фокусировки становятся существенными диффузные потери электронов. При пробое короткими лазерными импульсами БВИ не успевает выйти на стационарный режим распространения. При $R = 0.15$ см поток ионизирующего излучение является равновесным, но наименьшие скорости наблюдаются при переходе от тонких нитей к нитям большего диаметра и сплошным мишеням. Это, возможно, связано с увеличением времени образования плазмы при пробое на тонких нитях излучением с большим диаметром пятна фокусировки (что приведет к увеличению времени формирования БВИ), а также с ростом рекомбинационных потерь электронов.

Таким образом, использование систем неравенств и уравнений позволило определить режим распространения плазменного фронта для заданных экспериментальных условий. Минимальные скорости БВИ, соответствующие неустановившемуся режиму, будут наблюдаться при пробое на мишени острогофокусированными лазерными импульсами, длительность которых совпадает с временем формирования БВИ. Для установившегося режима БВИ характерны наибольшие скорости распространения, малая степень ионизации и температура за фронтом по сравнению с другими механизмами. Это, в свою очередь, может привести к уменьшению интенсивности сплошного спектра и увеличению контраста эмиссионных линий, а, следовательно, - и к увеличению чувствительности лазерной искровой спектроскопии.

В параграфе 2.4 представлены результаты исследований оптического пробоя на поверхности твердого тела. Для возбуждения оптического пробоя использовались первая гармоника Nd:YAG лазера Brilliant В с энергией в импульсе 360 мДж при длительности лазерного импульса 6 нс, фокусное расстояние линзы 100 мм. Плотность мощности лазерного излучения на поверхность мишени составляла величину $\sim 5 \cdot 10^{10}$ Вт/см². Положение фронтов определялось по изображению плазменного факела, полученного на оптическом многоканальном анализаторе спектров "Flame Vision Pro System", который обеспечивал разрешении не хуже 3 нс.

Чтобы обеспечить раздельное наблюдение движения вещества, вызванное процессами пробоя и взрывного вскипания, излучение направлялось на мишень под углом порядка 45° к нормали. При этом наблюдалось движение вещества против возбуждающего луча (режим светодетонации) и движение перпендикулярно поверхности мишени, вызванное взрывным вскипанием.

На рис.2 показано развитие плазменного фронта и фронта абляции при возбуждении оптического пробоя лазерным излучением с различными задержками относительно начала пробоя.

Было показано, что скорость фронта пробоя превышает скорость фронта взрывного вскипания в области абляции. Предложенный механизм на основе светодетонационной волны для области пробоя и на основе уже остывшей плазмы на больших задержках относительно начала пробоя для области абляции объясняет превышение концентрации атомов в фронте пробоя над концентрацией ионов в области взрывного вскипания.

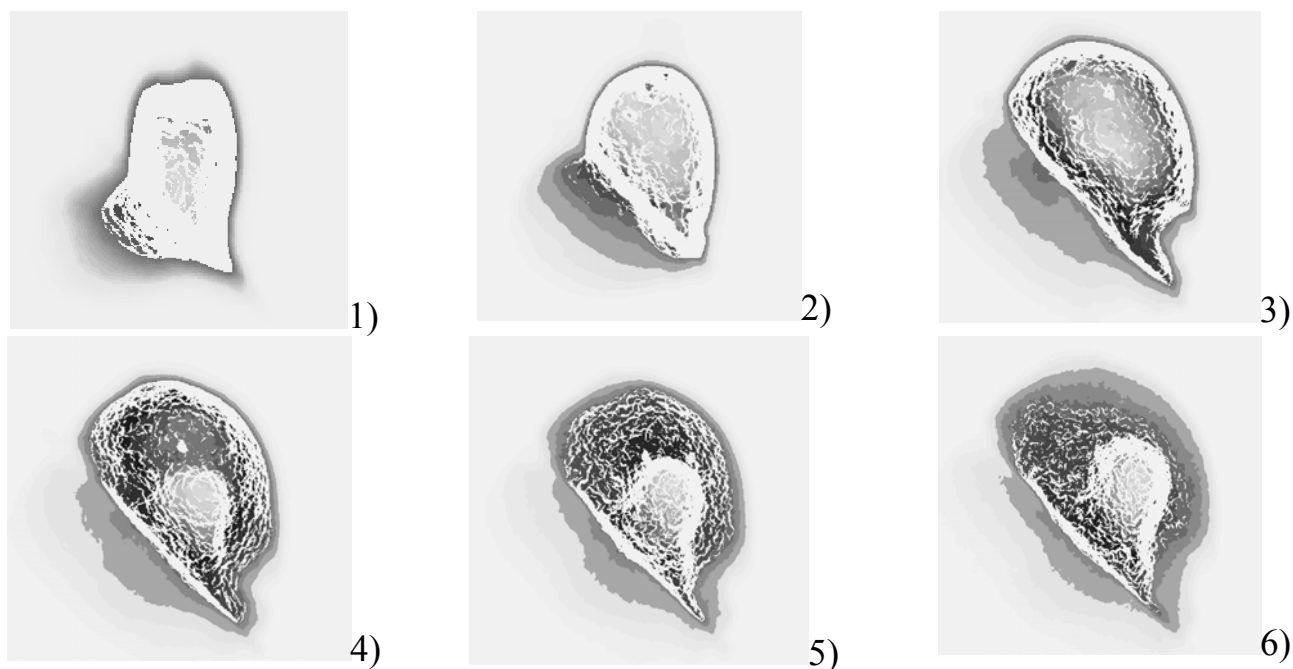


Рис.2. Эволюция плазменного фронта и фронта абляции при различных задержках относительно начала пробоя: 1) 10 нс, 2) 30 нс, 3) 90 нс, 4) 140 нс, 5) 200 нс, 6) 320 нс.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований динамики спектров оптического пробоя в нормальной атмосфере и на поверхности твердого тела. В параграфе 3.1 представлены результаты исследований динамики эмиссионных спектров атмосферных газов при пробое в нормальной атмосфере. Возбуждение оптического пробоя осуществлялась на длинах волн 532 и 1064 нм. При исследовании динамики эмиссионных линий лазерной плазмы измерения проводились в первом порядке дифракции, в монохроматоре SPECTRA-PRO использовалась решетка 1200 штр./мм, ширина аппаратной функции монохроматора 1 Å при ширине щели 0,02 мм. Эмиссионные линии излучения лазерной плазмы измерялись в спектральном диапазоне от 300 нм до 800 нм. Для анализа спектров оптического пробоя были выбраны три спектральных диапазона, где зарегистрированы наиболее интенсивные мультиплеты атмосферных газов NII 333, NII 500, OI 777 нм.

На рис. 3 и рис.4 представлена динамика спектральных атомарных и ионных линий азота в диапазоне 300-375 нм, полученная при оптическом пробое, генерируемая на длинах волн 532 и 1064 нм, соответственно.

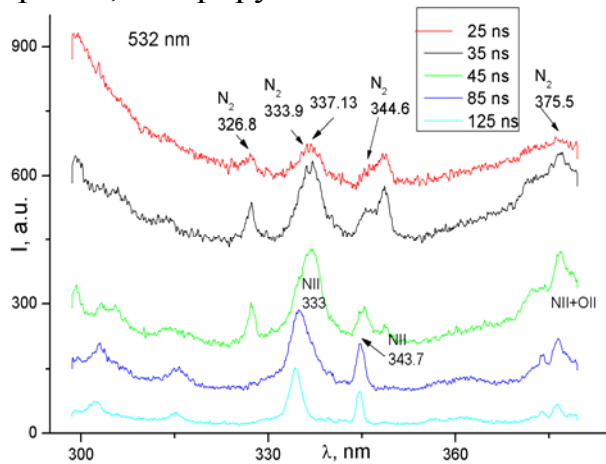


Рис. 3. Динамика спектральных атомарных и ионных линий азота в диапазоне 300-375 нм, полученная при оптическом пробое, генерируемая на длине волны 532 нм

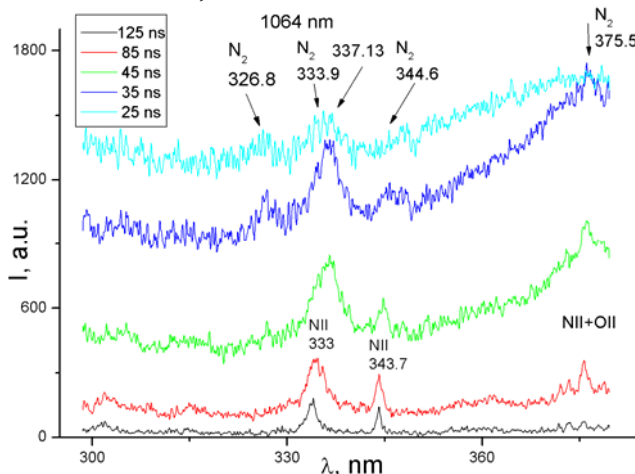


Рис. 4. Динамика спектральных атомарных и ионных линий азота в диапазоне 300-375 нм, полученная при оптическом пробое, генерируемая на длине волны 1064 нм

Из рис. 3 и рис. 4 видно, что в течение первых сотен наносекунд в спектре плазмы регистрируется интенсивное излучение сплошного фона и мультиплетов азота и кислорода, затем в течение нескольких сотен наносекунд сплошной фон быстро падает, при этом исчезает большая часть мультиплетов и остаются только наиболее интенсивные эмиссионные линии азота на длинах волн 333 и 343.7 нм.

Рассмотрим динамику спектров лазерного пробоя атмосферы в зависимости от времени t от начала пробоя. Для $t = 2$ нс на фоне интенсивного сплошного спектра выделяются молекулярные полосы, соответствующие излучению молекулярного азота (кривая 1). При $t = 10$ нс наряду с молекулярными полосами наблюдается провал интенсивности сплошного спектра с минимумом на $\lambda = 340-350$ нм (кривая 2). Данный эффект регистрируется при $3 < t < 200$ нс. Через $t = 50$ нс регистрируемый спектр, скорее всего, обусловлен суперпозицией излучения атомов, молекул и сплошного спектра (кривая 3). Провал интенсивности сплошного спектра можно объяснить поглощательными переходами с возбужденных колебательно-вращательных уровней основного электронного состояния и с возбужденных электронных состояний молекул атмосферных газов. Они и приводят к фотодиссоциации молекул. Такое объяснение справедливо и в нашем случае, т.к., во-первых, зарегистрировано поглощение на линии OI 777, во-вторых, механизм переноса плазменного фронта - быстрая волна ионизации, для которой фотоионизация атмосферных газов играет существенную роль. Начиная с $t = 200$ нс (кривая 4 на рис. 5), провал интенсивности сплошного спектра пропадает, отсутствуют также молекулярные полосы. В остальных

исследуемых спектральных диапазонах молекулярные полосы и провал интенсивности сплошного спектра не были зарегистрированы. Отметим также, что мультиплет NII 333 наблюдается до времени $t = 500$ нс, мультиплет NII 500 наблюдается на временном интервале $15 \text{ нс} < t < 5 \text{ мкс}$, мультиплет OII 777 на временном интервале $60 \text{ нс} < t < 20 \text{ мкс}$.

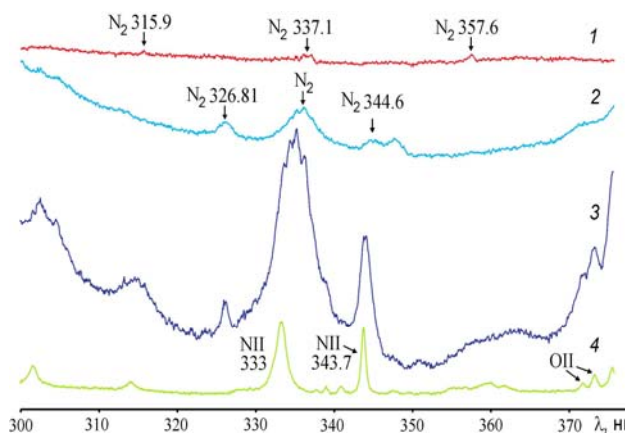


Рис. 5. Динамика эмиссионных линий при оптическом пробое газа на длине волны 344 нм

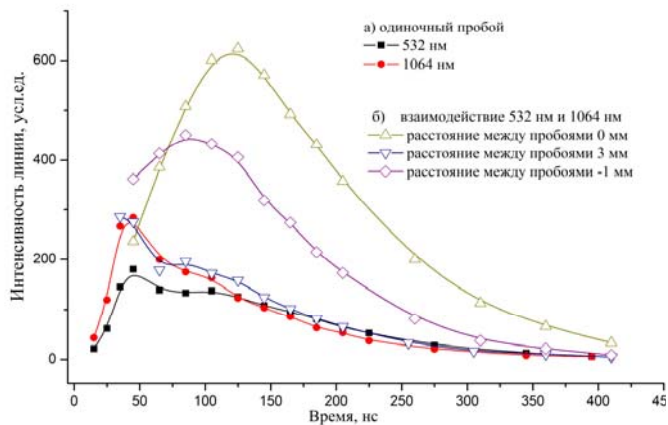


Рис. 6. Динамика мультиплета NII 333 нм и фона при взаимодействии лазерных плазм: а – нет взаимодействия, б – взаимодействие при различном расстоянии между пробоями

В параграфе 3.2 представлены результаты исследований динамики свечения сплошного и эмиссионного спектров лазерной плазмы. Во взаимодействующем режиме были проведены измерения интегральной (по спектру) светимости лазерной плазмы в зависимости от расстояния между точками фокусировки d , а также исследована динамика свечения сплошного и эмиссионного спектров лазерной плазмы. Можно выделить три области взаимодействия, I, II и III, соответственно. Первая пространственная область соответствует случаю, когда взаимодействующие плазменные факелы движутся в направлении распространения своего луча в режиме СДВ. Одной из характерных особенностей второй пространственной области является образование единого плазменного факела. Третья пространственная зона соответствует случаю, когда существуют два ярко выраженных плазменных факела, движущихся навстречу лазерному излучению в режиме быстрой волны ионизации. В этой области наблюдается увеличение интегральной интенсивности свечения плазмы до 85%.

В параграфе 3.3 представлены результаты исследований особенностей пространственно-временной динамики спектров взаимодействия лазерных плазм. Была изучена динамика профиля интенсивности излучения мультиплета однократно ионизованного азота NII 500 нм для трех пространственных зон и случая невзаимодействующих плазм, которые представлены на рис. 6. Характеристики сплошного и линейчатого спектров значительно различаются в зависимости от степени взаимодействия лазерных плазм. Характерное время спада интенсивности сплошного спектра увеличивается от 50 нс до 150 нс,

максимум интенсивности мультиплета $\text{Ni II } 500$ смещается от временного интервала $50 < t < 150$ нс к $100 < t < 200$ нс при переходе от случая невзаимодействующих плазм к взаимодействию в 3-ей или 1-ой пространственной зоне. При этом взаимодействие плазм в этих зонах сопровождается появлением «горба». Данная особенность наиболее выражена в 1-ой пространственной зоне на временном интервале $50 < t < 200$ нс в распределении сплошного спектра, и для $t > 150$ нс в распределении интенсивности мультиплета.

Полученные результаты показывают, что спектральные и временные характеристики при взаимодействии лазерных плазм значительно отличаются от случая невзаимодействующей плазмы при лазерном пробое в нормальной атмосфере. В структуре взаимодействующих плазм выделяются три пространственные зоны, определяемые механизмами распространения плазменного фронта. Наблюдается увеличение интегральной интенсивности излучения, интенсивностей линейчатого и сплошного спектров, но таким образом, что отношение интенсивности эмиссионной линии к интенсивности фона возрастает в два раза. При этом зарегистрировано значительное увеличение временного интервала, когда наблюдаются большие значения величины отношения интенсивностей.

Четвертая глава посвящена использованию метода лазерной искровой спектроскопии для определения спектральных характеристик плазмы на поверхности жидкости.

В параграфе 4.1 приведены результаты исследования динамики сплошного спектра, эмиссионных линий Na , Mg , Ca и молекул OH , CN на временном интервале $0 \leq t_d \leq 30$ мкс, проведено сравнение с ранее полученными результатами.

В области 375-390 нм зарегистрированы интенсивные линии поглощения Ni I и полосы CN , которые могут исказить результаты спектрального анализа морской воды и элементов загрязнителей, т.к. в этой области находятся интенсивные линии $\text{Cl II } 386$, $\text{Fe I } 386$, $\text{Ba I } 388.9$, $\text{Pb I } 374$ нм.

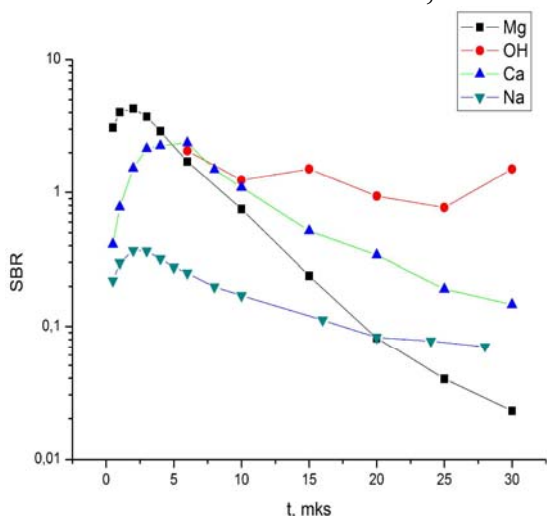


Рис. 7. Временная зависимость отношения интенсивности линии к фону (SBR)

Показано, что временная зависимость отношения интенсивности линий к фону (см. рис.7), интенсивности сплошного спектра, линий Na , Mg и молекулярных полос, аппроксимируется экспоненциальной зависимостью с двумя характерными временами, интенсивности линии Ca – с одним характерным временем. При задержке регистрации относительно лазерного импульса ~ 1 мкс и времени регистрации ~ 30 мкс можно ожидать близких по величине значений МОК для резонансных дублетов ионов Ca и Mg .

В параграфе 4.2 показана динамика интенсивности мультиплетов ОII и NII. Мультиплет 314 высвечивается и гаснет раньше остальных, что обусловлено высокими значениями энергий верхних уровней излучаемых переходов (см. рис.8). Мультиплеты 302 и 315 имеют похожее увеличение интенсивности до точки максимума, т.к. при $t_d < 100$ ns основной вклад в излучение обусловлен высокорасположенными уровнями, но затем наблюдается медленный спад интенсивности мультиплета 302, т.к. при $t_d > 100$ ns существенный вклад в излучение вносит нижерасположенный переход NII. Для мультиплета ОII 435 и мультиплетов с низко расположенными излучательными переходами NII 302, 400, 568, 594 характерны длительные времена высвечивания, дольше всех наблюдаются линии с самыми низкими энергиями верхних уровней NII 400 и 568. Для этих мультиплетов наблюдается идентичная динамика интенсивности излучения, что обусловлено почти равными энергиями уровней. Такой же характер излучения наблюдается для мультиплетов NII 594 и ОII 435, хотя максимальная разница энергий верхних уровней 5.3 eV. Для мультиплетов NII 568 и 594 зарегистрировано различие времен максимальной интенсивности $t_d = 100$ и 160 ns, соответственно, что говорит о наличии рекомбинационного каскада. Для мультиплетов ОII 407 и 435 такого эффекта не наблюдается. Возможно, это связано с тем, что различие времен максимального контраста для мультиплетов ОII меньше шага изменения t_d , равного 50 ns. Возможно также, что в излучение мультиплета ОII 435 вносит основной вклад переход ОII $3p^2D^o - 3s^2D$ при $t_d < 200$ ns, энергия верхнего уровня которого совпадает с энергией верхнего уровня ОII 407. В этом случае поведение мультиплетов NII594 и ОII 435 должно быть похожим, в силу разности потенциалов ионизации ионов ОII и NII 35.1 и 29.6 eV, соответственно, т.к. разница энергий верхних уровней совпадает с разницей потенциалов ионизации ионов.

Таким образом, с использованием динамики интенсивности излучения нескольких мультиплетов, значения сил осцилляторов и энергий уровней, возможно определить переходы, вносящие значительный вклад в излучение мультиплетов. Большая часть мультиплетов NII и ОII практически исчезает при $t_d = 500$ ns, такая задержка регистрации спектра пробоя позволит избежать наложения линий мультиплетов на линии исследуемых элементов.

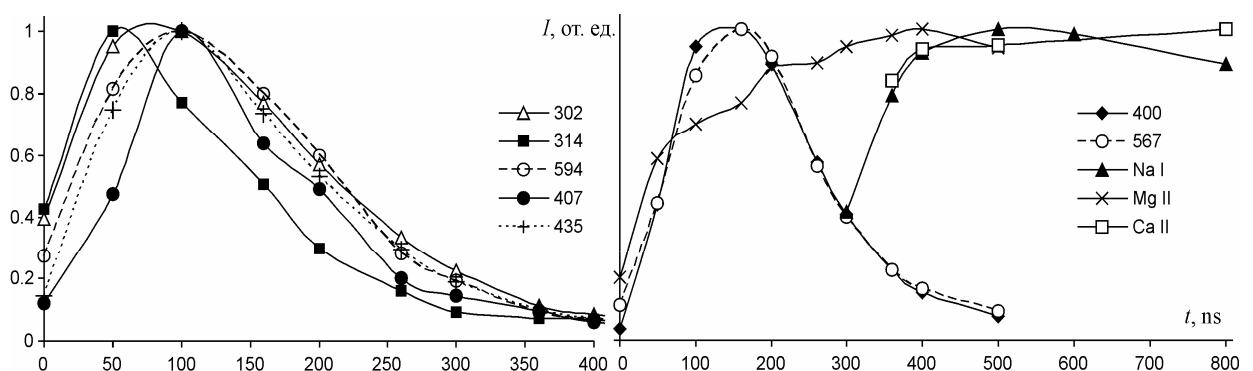


Рис. 8. Динамика нормированной на максимальное значение интенсивности линий и мультиплетов

В параграфе 4.3 проведен сравнительный анализ между измерениями интенсивности флуоресценции растворенного органического вещества (ИФРОВ) на спектрах флуоресценции морской воды и интенсивностью линии углерода в эмиссионных спектрах лазерного пробоя на поверхности морской воды по данным двух экспедиций: в эстуарии реки Амур в июне 2006 года и по маршруту вокруг острова Сахалин в июле-августе 2006 года. Выбранные для анализа районы интересны с той точки зрения, что содержат ярко выраженные случаи, где РОВ определялось только процессами жизнедеятельности фитопланктона (шельф о. Сахалин), и воды, в которых преобладало РОВ терригенного происхождения (эстуарий реки Амур).

Линейная зависимость между ИФРОВ при возбуждении зеленым излучением и интенсивностью эмиссионной линии углерода наблюдалась только в районах, где процессы воспроизводства РОВ определялись функционированием фитопланктонных сообществ. Линейная связь между Q_{355} и C_{194} присутствовала в большинстве районов, что говорит о том, что изменения в содержании общего углерода на исследуемых акваториях происходили в связи с изменениями флуоресцирующей части общего РОВ.

Метод лазерной искровой спектроскопии позволяет проводить анализ содержания общего углерода в морской воде, а метод лазерно-индуцированной флуоресценции дает возможность исследовать углерод, содержащийся во флуоресцирующей части РОВ и изучать процессы воспроизводства РОВ, его трансформации и деградации в морской воде. С помощью использования зеленого лазерного возбуждающего излучения в методе ЛИФ можно выделить сигнал «молодого» РОВ, связанного с жизнедеятельностью клеток фитопланктона, которые являются основным производителем органического вещества и одним из основных поглотителей углекислого газа в океане. Совместное использование методов ЛИС и ЛИФ морской воды позволяет оперативно получать дополнительную информацию по содержанию, природе происхождения и типу углеродосодержащих веществ в морской воде, а также по процессам переноса углерода из одних геохимических резервуаров в другие.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

- Экспериментально установлено и теоретически обоснованно, что фронт плазмы в нормальной атмосфере, созданный лазерным импульсом первой, второй и третьей гармониками Nd:YAG лазера плотностью мощности больше чем 10^{10} Вт/см², движется в режиме быстрой волны ионизации навстречу лазерному излучению.
- При взаимодействии встречных плазменных фронтов оптического пробоя в нормальной атмосфере наблюдается двукратное увеличение интенсивности спектральных линий мультиплетов азота по сравнению с интенсивностью линий в невзаимодействующей плазме.
- Экспериментально выявлено, что характерное время светимости мультиплетов ионов азота NI и кислорода OII в спектре при оптическом

пробое на поверхности жидкости равно 400 нс, что позволяет использовать временную селекцию регистрации линий исследуемых элементов для повышения чувствительности метода лазерной искровой спектроскопии.

- Экспериментально показано, что при оптическом пробое газа импульсами модулированной добротности Nd:YAG лазера наблюдается режим быстрой волны ионизации, который характеризуется наибольшими скоростями распространения плазменного фронта по сравнению с другими режимами распространения лазерной плазмы.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В журналах, входящих в перечень ВАК:

1. О.А. Букин, А.А. Ильин, И.Г. Нагорный, А.Н. Павлов, А.В. Буланов. "Особенности взаимодействия встречных плазменных фронтов при лазерном пробое в нормальной атмосфере."//Письма в ЖТФ, том 32, выпуск 13 (2006), с. 32-37;
2. О.А. Букин, А.А. Ильин, Ю.Н. Кульчин, И.Г. Нагорный, А.Н.Павлов, А.В.Буланов "Взаимодействие лазерных плазм при оптическом пробое газа в нормальной атмосфере."//Квантовая электроника, 36, 6 (2006), с.553-556;
3. А.А. Ильин, О.А. Букин, А.В. Буланов. Режимы движения лазерной плазмы при оптическом пробое в нормальной атмосфере. // ЖТФ. – 2008. – Т. 78, выпуск 6. - С. 20-24.
4. А.А. Ильин, О.А. Букин, А.В. Буланов, И.Г. Нагорный, С.С. Голик, Е.Н. Бауло. Спектрально – временные характеристики плазмы, генерируемой на поверхности морской воды наносекундным лазерным импульсом.// Оптика атмосферы и океана, 2009. Т.22, № 7. С.705-709

В журналах, не входящих в перечень ВАК

1. Букин О.А., Буланов А.В., Боровой Д.И., Буланов В.А., Корсков И.В.,Коротенко А.А, Майор А.Ю., Попов П.Н., Салюк П.А., Стороженко А.В. Исследования структуры мелкомасштабных неоднородностей в шельфовой зоне методами акустического зондирования и лазерной флуориметрии // Подводные исследования и робототехника, №2(6). 2008. с.64-74

В трудах и тезисах докладов конференций:

1. Alexey A. Ilin, Sergey S. Golik, Ivan G. Nagorny and Alexey V. Bulanov. "Improving sensitivity of laser-induced breakdown spectroscopy using laser plasmas interaction."// Proceedings SPIE Vol. 6522 65220Z (2006);
2. Alexey A. Ilin, Oleg A. Bukin, Ivan G. Nagorny and Alexey V. Bulanov. "Absorption waves interaction in gas and plasma. " // International Conference High-Power Laser Ablation. Taos, New Mexico USA. 7-12 May 2006;
3. Alexey A. Ilin, Oleg A. Bukin, Ivan G. Nagorny and Alexey V. Bulanov. "Absorption waves interaction in gas and plasma."// Proceedings SPIE Vol. 6261 62612O (2006);
4. Alexey A. Ilin, Sergey S. Golik, Ivan G. Nagorny and Alexey V. Bulanov. "Sensitivity improving of laser-induced breakdown spectroscopy method at laser plasmas interaction."// Proceedings of XIII International Symposium Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric physics. 2006. p.98;
5. Буланов А.В. "Механизм распространения плазменного фронта при оптическом пробое газа". Тезисы докладов. XI конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по физике полупроводников, диэлектрических и магнитных материалов. ПДММ-2007. Владивосток 13 – 16 июня 2007г. с. 99-105;
6. A.V.Bulanov, P.A.Salyuk, A.A.Il'in, O.A.Bukin, S.S.Golik. "Laser spectroscopy methods in sea water organic matter researches."// Proceedings of IV International Conference "Current problems in Optics of Natural Waters." ONW-2007. Nizhny Novgorod, Russia. 11-15 September 2007. p.224-229;
7. Alexey A. Il'in, Oleg A. Bukin, Ivan G. Nagorny and Alexey V. Bulanov. "Time-resolved measurements of laser plasmas interaction during breakdown in normal atmosphere by various wavelengrh Absorption waves interaction in gas and plasma."// Proceedings SPIE Vol. 6735 673514 (2007);
8. A.V.Bulanov, A.A.Il'in. "Peculiarities of waves of laser radiation absorption at gas optical breakdown."// Труды X конференции молодых ученых "Современные проблемы в астрофизике и физике космической плазмы". БШФФ-2007. Иркутск, Russia 17-22 сентября 2007 г. p.259-261;
9. Буланов А.В., Ильин А.А. "Спектроскопия лазерного пробоя на поверхности жидкости ". Труды конференции. XII конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по физике полупроводников, диэлектрических и магнитных материалов. ПДММ-2009. Владивосток 17 – 20 июня 2009 г. с. 342-347;
10. Нагорный И.Г., Буланов А.В, Ильин А.А. "Особенности раздельного движения плазменного фронта в режиме оптического пробоя и взрывного вскипания на поверхности металла."// Труды конференции. XII конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по физике полупроводников, диэлектрических и магнитных материалов. ПДММ-2009. Владивосток 17 – 20 июня 2009 г. с. 350-354;
11. Буланов А.В. "Динамика движения фронтов лазерной плазмы при оптическом пробое газа."//Тезисы докладов. 12 Всероссийской научной

- конференции студентов – физиков. ВНКСФ – 12. Новосибирск. 2006 г. с. 342-343.
12. Буланов А.В. "Механизм распространения оптических разрядов в воздухе."//Тезисы региональной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по физике. Владивосток, 15-17 ноября 2006 г. с. 110
 13. Буланов А.В. "Экспериментальное исследование механизмов преобразования энергии лазерного излучения при оптическом пробое на границе жидкости и газа."//Материалы докладов 5 региональной научной конференции. Хабаровск, 25-27 октября 2005 г. с.89;
 14. Alexey A. Ilin, Sergey S. Golik, Ivan G. Nagorny and Alexey V. Bulanov. "Sensitivity improving of laser-induced breakdown spectroscopy method at laser plasmas interaction."// Proceedings of XIII International Symposium Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric physics. 2006. p.98;
 15. Salyuk P.A., Ilin A.A., Golik S.S., Bukin O.A., Bulanov A.V. "Investigation of Dissolved Organic Matter In Seawater By Laser-Induced Fluorescence And Laser-Induced Breakdown Spectroscopy."// Proceedings of ICONO/LAT 2007. p.99;
 16. A.A.Il'in, O.A.Bukin, A.V.Bulanov, I.G.Nagorny. "Time-Resolved measurements of Laser Plasmas Interaction During Breakdown in Normal Atmosphere by Various Wavelengths."// Proceedings of ICONO/LAT 2007. p.99;
 17. Буланов А.В. "Механизм распространения волн поглощения лазерного излучения в воздухе."// Тезисы докладов. 13 Всероссийской научной конференции студентов – физиков. ВНКСФ – 13. Ростов на Дону. 2007 г. с. 302-303;
 18. Буланов А.В., Шмирко К.А. Дорошенко И.М. "Применение ЛИС и ЛИФ спектроскопий для анализа биооптических характеристик морских вод в устье реки Амур и в районе Охотского моря."// Тезисы докладов. 13 Всероссийской научной конференции студентов – физиков. ВНКСФ – 13. Ростов на Дону. 2007 г. с. 390-392;
 19. Shmirko K.A., Salyuk P.A., Bulanov A.V., Glazkov M.N. "Interactive system for data analysis (ISAD) for FEB RAS CCU in laser researches (LR) of environment ". // Proceedings of International conference and Young Scientists School on Computer Information Technologies for Environment Sciences. Cites – 2007. Tomsk, Russia. 21-25 July 2007. p. 56;
 20. Салюк П.А., Ильин А.А., Буланов А.В. "Исследование органического вещества в морской воде методами лазерной спектроскопии". Тезисы докладов конференции молодых ученых Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева. Океанологические исследования. Владивосток 21 – 25 мая 2007г. с. 27-29;
 21. Буланов А.В. "Механизм распространения плазменного фронта при оптическом пробое газа". Тезисы докладов. XI конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по физике полупроводников, диэлектрических и магнитных материалов. ПДММ-2007. Владивосток 13 – 16 июня 2007г. с. 99-105;

22. Салюк П.А., Буланов А.В. "Использование оптических методов для исследования циклов углерода в океане."//Тезисы докладов 10 Международной Бакальской молодежной научной школе по фундаментальной физике. "Современные проблемы в астрофизике и физике космической плазмы". БШФФ-2007. Иркутск, 17-22 сентября 2007 г. с. 91;
23. A.A.Il'in and A.V.Bulanov. "Spectral characteristics of laser plasma induced in air and on the liquid surface in the 180 – 240 nm region."// Proceedings of XV International symposium. Atmospheric and ocean optics/ Atmospheric physics. Krasnoyarsk, Russia. 22-28 July 2008. p. 57;
24. A.A.Il'in, A.V.Bulanov and I.G.Nagorny. "Regimes of plasma expansion at optical breakdown by 355 and 1064 nm laser wavelength."// Proceedings of XV International symposium. Atmospheric and ocean optics/ Atmospheric physics. Krasnoyarsk, Russia. 22-28 July 2008. p. 58;
25. Salyuk P.A., Bukin O.A., Mayor A.Yu., Il'in A.A., Bulanov A.V. Differences in the fluorescence of dissolved organic matter in seawater induced by UV and green radiation // Ocean Optics XIX, 6-10 October 2008, Tuscany, Italy. Tuscany, 2008. P. 98.
26. A.V.Bulanov, P.A.Salyuk, A.A.Il'in, S.S.Golik. "Application of efficient optical methods for determination of some major chemical components in seawater and phytoplankton." // Proceedings of PICES 17th Annual Meeting."Beyond observations to achieving understanding and forecasting in a changing North Pacific: Forward to the FUTURE". PICES-2008. Dailian, PR China. October 24-November 2, 2008. p. 31
27. Ильин А.А, Буланов А.В. "Динамика эмиссионных линий и мультиплетов лазерной плазмы, генерируемой на поверхности морской воды". Тезисы конференции Всероссийская конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по физике. Владивосток 27-29 апреля 2009 г. С. 73

Буланов Алексей Владимирович

**Режимы движения плазменных фронтов и
динамика спектральных линий при оптическом
пробое в газе и на поверхности
конденсированных сред**

Специальность 01.04.21 – – лазерная физика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано к печати
Формат 60X84/16

Усл. п. л. 1,0
Тираж 100 экз.

Уч. изд. л. 0,8
Заказ 50

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