

09.1;10;03

Исследование оптических и акустических спектральных характеристик при лазерном пробое воды в ультразвуковом поле

© А.В. Буланов^{1,2}, И.Г. Нагорный^{2,3}, Е.В. Соседко¹¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия² Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия³ Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия

E-mail: a_bulanov@me.com

Поступило в Редакцию 12 ноября 2018 г.

В окончательной редакции 28 августа 2019 г.

Принято к публикации 28 августа 2019 г.

Показано, что оптический пробой внутри жидкости в ультразвуковом поле существенно зависит от амплитуды и частоты ультразвука. Зарегистрировано увеличение интенсивности спектральных линий калия и кислорода при оптическом пробое при увеличении амплитуды и частоты ультразвука. Вместе с тем показано, что на высоких частотах (выше 200 kHz) и при высоких мощностях ультразвука наблюдается эффект насыщения, когда рост интенсивности спектральных линий резко замедляется, что свидетельствует об отсутствии необходимости применения больших мощностей и высоких частот ультразвука для исследования оптоакустических эффектов при лазерном пробое в жидкости.

Ключевые слова: оптический пробой, лазерно-искровая спектроскопия, ультразвук, спектральные линии, оптоакустические эффекты.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.23.48717.17586

Оптический пробой, генерируемый лазерным излучением, показывает высокую эффективность оптоакустического преобразования [1,2]. В работах [1–5] было продемонстрировано, что наличие дополнительного источника звука, который облегчает оптический пробой, приводит к увеличению эффективности оптоакустического преобразования, а также при определенных условиях к усилению интенсивности спектральных линий элементов в водных растворах. Вместе с тем отмечается недостаточность понимания механизмов совместного воздействия лазерного излучения и ультразвука при оптическом пробое жидкости [6,7]. В частности, неясна зависимость от частоты и мощности ультразвука.

В настоящей работе изучены особенности лазерного пробоя жидкостей в поле мощного ультразвука и проведено сравнительное исследование возможностей акустической и оптической диагностики пробоя. Наряду с регистрацией излучения от места пробоя в оптической области спектра были изучены спектральные и энергетические характеристики акустической эмиссии. Одновременная синхронизация акустического и оптического излучения в моменты максимального растяжения или сжатия жидкости акустическими импульсами относительно начала оптического пробоя позволила эффективно провести его спектроскопические исследования с применением ультразвука.

Для возбуждения оптического пробоя в толще жидкости использовался Nd:YAG-лазер „Brilliant B“ со следующими параметрами излучения: длина волны 1064 nm, длительность импульса 10 ns, энергия в импульсе до 500 mJ. Одновременно использовались акустические излучатели с различными мощностями и частотами

для формирования возмущенной области в жидкости, в которой происходит оптический пробой. Основная схема эксперимента подробно описана в [8]. В настоящей работе ограничимся изложением основных параметров установки. Для облучения ультразвуком использовались пьезокерамические акустические излучатели с различными резонансными частотами, при этом для синхронизации акустических и оптических импульсов применялся генератор задержек. Описанная нами в [8] методика синхронизации позволяла проводить регистрацию акустической эмиссии специализированным измерительным гидрофоном с одновременной регистрацией пробоя в оптической области спектра.

Важным было создание условий для уменьшения влияния поглотительной способности жидкости на интенсивность и время жизни спектральных линий химических элементов. Мы использовали наклонное падение лазерного излучения внутрь жидкости. Вблизи мишени угол между поверхностью и направлением распространения лазерного излучения был отличен от 90°. При этом его величина была такова, чтобы плазма пробоя распространялась навстречу лазерному лучу, а эрозийный факел — преимущественно перпендикулярно поверхности пробоя. Отличительной чертой данного способа является уменьшение зависимости возрастающего нежелательного эффекта взрывного вскипания и нестабильности поверхности водных растворов от увеличения энергии. Это позволяет использовать более интенсивные лазерные импульсы для улучшения пределов обнаружения. С помощью описанной выше методики были впервые получены спектральные линии химических элементов, таких как калий, марганец, в зависимости от

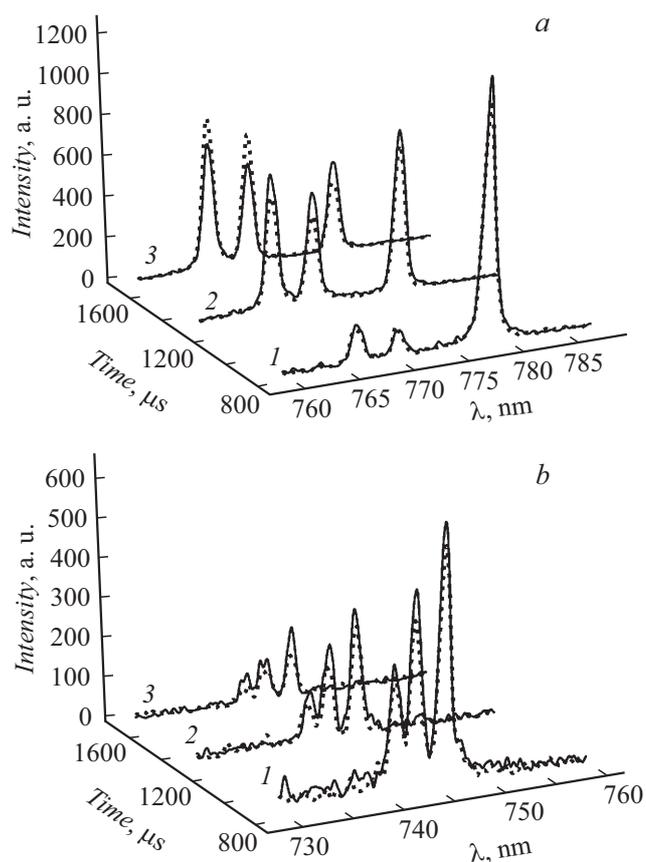


Рис. 1. Зависимости от времени задержки относительно лазерного импульса линий различных элементов без ультразвука и в присутствии ультразвука умеренной интенсивности: *a* — атомарных линий калия (766.4 и 769.8 nm) и кислорода (777 nm); *b* — атомарных линий азота (742, 744 и 746 nm). Цифры соответствуют задержкам 800 (1), 1300 (2) и 1800 ns (3) от начала пробоя при одинаковом во всех случаях времени экспозиции 500 ns. Пунктирные линии — случаи оптического пробоя без ультразвука, сплошные линии — с ультразвуком.

частоты и мощности ультразвука. Отметим, что время жизни линий составило порядка $60 \mu\text{s}$, что более чем в 50 раз превышает время жизни для случая пробоя внутри жидкости.

Для анализа линий калия при лазерном пробое был использован водный раствор K_2SO_4 . Были получены зависимости спектральных линий дублета атомарного калия на длинах волн 766.4 и 769.8 nm от параметров ультразвука. Одновременно с линией калия регистрировались спектральная эмиссионная линия атомарного кислорода на длине волны 777 nm и линии триплета азота на длинах волн 742, 744 и 746 nm. Важным оказалось проявление зависимости интенсивности линий химических элементов от времени эволюции лазерного пробоя в присутствии и в отсутствие ультразвука. В ряде экспериментов было получено неоднозначное воздействие ультразвука на предполагаемый рост интенсивности спектральных линий кислорода и калия.

Так, при определении значений задержек регистрации спектров оптического пробоя относительно лазерных импульсов для исследуемых водных растворов было экспериментально показано, что при варьировании задержки и экспозиции регистрируются различные вклады ультразвука в изменение интенсивности спектральных линий кислорода и калия, приводящие как к усилению, так и к ослаблению интенсивности спектральных линий. Это, в частности, показано на рис. 1, *a* и *b*. Видно неоднозначное поведение некоторых линий кислорода и калия в поле ультразвука при задержках 800, 1300 и 1800 ns от начала пробоя при одинаковом во всех случаях времени экспозиции 500 ns. Причина такого поведения указанных линий осталась невыясненной. В целом видно, что ультразвук даже при небольшой интенсивности приводит к усилению интенсивности спектральных линий.

Было показано также, что ультразвук воздействует на изменение интенсивности спектральных ионных и атомарных линий марганца в водном растворе MnCl_2 (на длинах волн 344, 347 и 403 nm) аналогично воздействию на линии кислорода и калия и его воздействие существенно различно при разных временах развития оптического пробоя. Таким образом, можно констатировать, что воздействие ультразвука на интенсивность линий химических элементов различается в зависимости от времени эволюции лазерного пробоя. Поэтому важно выбрать характерное время задержки от начала пробоя, и тогда эффект воздействия ультразвука будет проявляться в максимальной степени, что проиллюстрировано на рис. 1. Причину данного эффекта предположительно следует искать в разном характере возникновения зародышевых пузырьков в стоячей волне при воздействии ультразвука на жидкость при оптическом пробое.

В целом выявлена существенная зависимость интенсивности спектральных линий различных химических элементов (калия, кислорода) при оптическом пробое

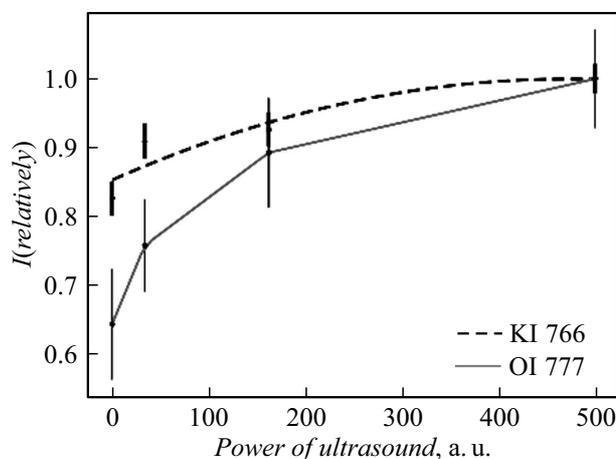


Рис. 2. Зависимость относительной интенсивности спектральных линий калия KI 766 (766.4 nm) и кислорода OI 777 (777 nm) от мощности ультразвука при оптическом пробое в жидкости.

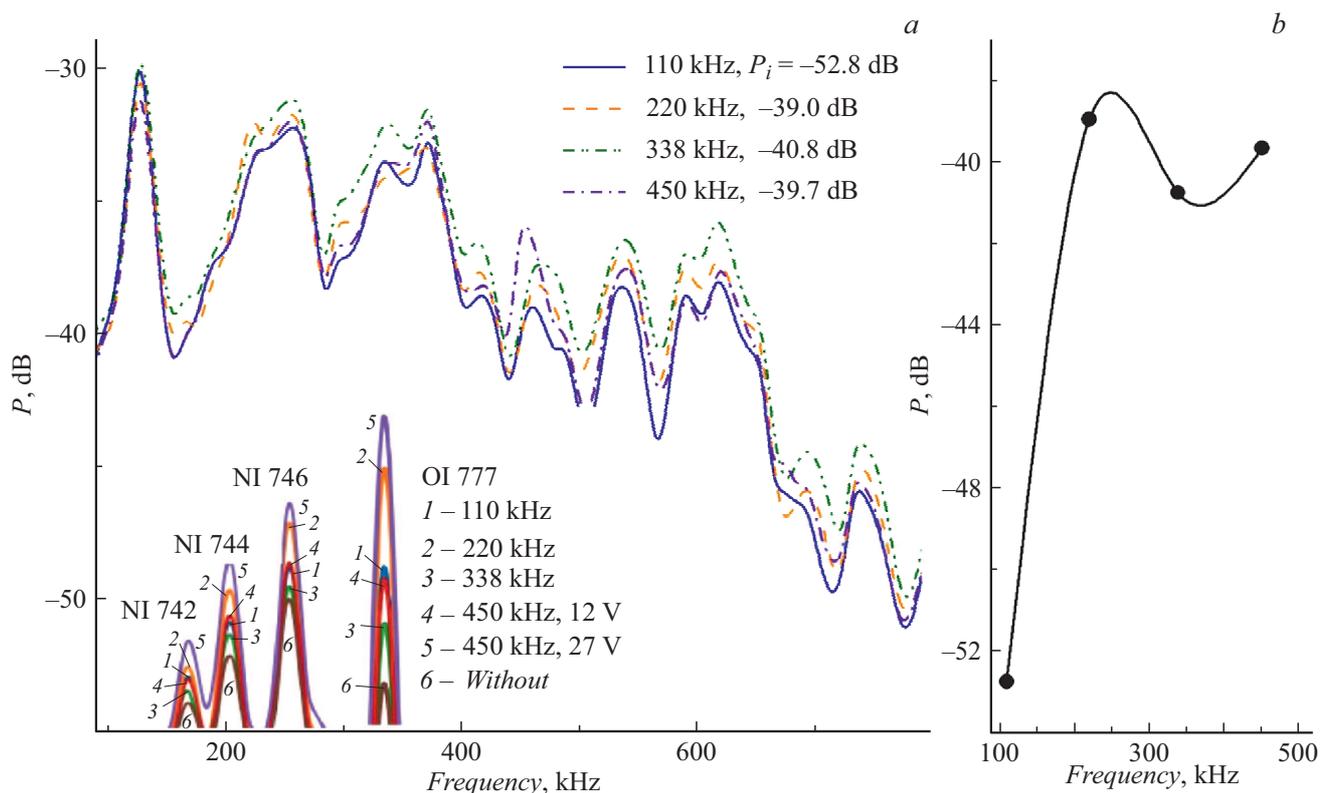


Рис. 3. Влияние частоты ультразвука на спектральный состав (а) и интегральную амплитуду акустической эмиссии (б). Под кривыми состава спектральной эмиссии на части а представлены спектральные линии азота NI 742, NI 744, NI 746 и кислорода OI 777 в относительных единицах при различных частотах ультразвука.

в жидкости от мощности акустического излучения. Ультразвук оказывает сильное влияние на интенсивность спектральных линий, при этом его воздействие растет с мощностью. Было зарегистрировано увеличение интенсивности спектральных линий калия и кислорода в зависимости от амплитуды ультразвука при оптическом пробое с применением ультразвука частотой 220 kHz. Данный эффект показан на рис. 2, где приведена зависимость относительной интенсивности (т.е. нормированной на максимальное в экспериментах значение интенсивности линии) под действием ультразвука от мощности акустического излучения. Вместе с тем следует отметить, что существует определенная грань, за которой, согласно данным рис. 2, влияние увеличения мощности ультразвука затормаживается и наступает насыщение.

Наряду с оптическими спектрами была изучена акустическая эмиссия, сопровождающая пульсации кавитационного пузырька, образованного на поздних стадиях пробоя жидкости под действием лазерного излучения и при воздействии внешнего источника ультразвука [9]. Было показано, что акустическая эмиссия существенно различается при разных параметрах ультразвука. Влияние ультразвука на различных частотах на спектральную акустическую эмиссию при пробое показано на рис. 3. Из этого рисунка можно видеть, что исполь-

зование источника ультразвука в определенной полосе частот выше 200 kHz практически не влияет на изменение спектральной плотности акустической эмиссии при пробое.

Выявлен рост интенсивностей спектральных линий дублета атомарного калия на длинах волн 766.4 и 769.8 nm в зависимости от мощности и частоты ультразвука. Аналогичный результат получен для спектральной эмиссионной линии атомарного кислорода на длине волны 777 nm и линии триплета азота на длинах волн 742, 744 и 746 nm. Воздействие акустического поля на изменение интенсивности спектральных ионных и атомарных линий марганца (на длинах волн 344, 347 и 403 nm) в общих чертах происходит по аналогичному сценарию, но оно различается при разных временах развития оптического пробоя.

Таким образом, выявлена существенная зависимость интенсивности спектральных линий различных химических элементов (калия, кислорода) при оптическом пробое в жидкости от мощности и частоты ультразвука.

Показано, что на высоких частотах (выше 200 kHz) и при высоких мощностях ультразвука наблюдается эффект насыщения, когда рост интенсивности спектральных линий резко замедляется, что свидетельствует о возможности применения сравнительно небольших мощностей ультразвука для реализации выявленных опто-

акустических эффектов и спектроскопических свойств среды при лазерном пробое в жидкости.

Таким образом, продемонстрирована возможность повышения чувствительности стандартного метода лазерной искровой спектроскопии (ЛИС) при использовании комбинированного метода ультразвуковой ЛИС в определенных диапазонах частот и мощности ультразвука. Полученный результат имеет определенное прикладное значение, так как повышение чувствительности метода ЛИС за счет применения ультразвука могло бы позволить более широко использовать этот метод при оперативных спектроскопических исследованиях.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 17-02-00561 а, 16-02-00841 а в части работ по анализу оптической и акустической эмиссии лазерного пробоя и проект № 18-32-20146 мол_а_вед в части спектроскопических исследований оптических эффектов пробоя).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Lauterborn W., Kurz T.* // Rep. Prog. Phys. 2010. V. 73. P. 106501 (1–88).
- [2] *Roy R., Farny C.H., Wu T., Holt R.G., Murray T.W.* // J. Acoust. Soc. Am. 2018. V. 143. N 3. P. 1835.
- [3] *Cremers D.A., Radziemski L.J.* Handbook of laser-induced breakdown spectroscopy. 2nd ed. Chicester: John Wiley&Sons, 2013. 432 p.
- [4] *Буланов А.В., Нагорный И.Г., Соседко Е.В.* // ЖТФ. 2013. Т. 83. В. 8. С. 117–120.
- [5] *Padilla-Martinez J.P., Berrospe-Rodriguez C., Aguilar G., Ramirez-San-Juan J.C., Ramos-Garcia R.* // Phys. Fluids. 2014. V. 26. N 12. P. 122007. <https://doi.org/10.1063/1.4904718>
- [6] *Michel A.P.M., Lawrence-Snyder M., Angel S.M., Chave A.D.* // Appl. Spectr. 2007. V. 61. N 2. P. 171–176.
- [7] *Буланов А.В., Нагорный И.Г.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2014. Т. 78. № 2. С. 241–244.
- [8] *Буланов А.В., Нагорный И.Г., Соседко Е.В.* // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. В. 16. С. 55–60.
- [9] *Акуличев В.А., Буланов В.А.* Акустические исследования мелкомасштабных неоднородностей в морской среде. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2017. 414 с.