

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИЗУАЛЬНОГО ПРОЯВЛЕНИЯ ОПТОАКУСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В ПЛЕНКАХ НА ВОДЕ

А.А. Мольков

*Институт прикладной физики Российской академии наук,
г. Нижний Новгород, Россия
Волжский государственный университет водного транспорта,
г. Нижний Новгород, Россия
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8550-2418>*

С.А. Ермаков

*Институт прикладной физики Российской академии наук,
г. Нижний Новгород, Россия
Волжский государственный университет водного транспорта,
г. Нижний Новгород, Россия*

И.А. Сергиевская

*Институт прикладной физики Российской академии наук,
г. Нижний Новгород, Россия
Волжский государственный университет водного транспорта,
г. Нижний Новгород, Россия*

Т.Н. Лазарева

*Институт прикладной физики Российской академии наук,
г. Нижний Новгород, Россия*

Г.В. Лещёв

*Институт прикладной физики Российской академии наук,
г. Нижний Новгород, Россия*

Аннотация. Недавно в рамках лабораторного эксперимента был впервые продемонстрирован эффект генерации в воздухе акустических импульсов звуковых частот («треск»), при облучении пленки на поверхности воды непрерывным лазерным излучением с длиной волны 10,5 мкм, в то время как для чистой воды треск не регистрировался. Наличие пленки существенно меняло условия формирования областей локального нагрева в воде и, как результат, излучения акустических волн. Характеристики звука были предварительно исследованы в зависимости от температуры воды, толщины пленки и ее вещества, интенсивности излучения. Однако недостаточная повторяемость эффекта в ряде экспериментов стимулировала дополнительные исследования, наблюдаемого оптоакустического эффекта для получения наглядной информации о процессах, происходящих в зоне облучения с использованием видеосъемки. Результаты этого исследования на примере лабораторного и натурального эксперимента представлены в настоящей работе.

Ключевые слова: оптоакустика, оптоакустический эффект, пленки ПАВ, слики, макросъемка, скоростная съемка

Введение

Разработка методов дистанционного мониторинга поверхностных загрязнений водоемов составляет значительную часть океанологических исследований. Одним из индикаторов антропогенных загрязнений природных водоемов являются слики, в подавляющем большинстве связанные с пленками поверхностно-активных веществ (ПАВ) на водной поверхности [1]. Детектирование сликов, в основном, осуществляется средствами дистанционного зондирования оптического и радиодиапазонов, позволяя получать предварительную информацию об их характеристиках [2]. Однако при необходимости получить более детальную или количественную информацию, существующие методы испытывают трудности [3, 4]. Это, в свою очередь, постоянно подталкивает исследователей к разработке новых методов диагностики пленок ПАВ на морской поверхности (см., например, [5–8]). Среди таковых особенно можно выделить направление, сформированное на стыке двух областей – оптики и акустики. Оптоакустические методы активно используются в дефектоскопии и медицине при диагностике мягких тканей [9, 10]. Применительно к пленкам на воде подобные исследования тоже проводились [11–14], но успешная практическая реализация оптоакустического подхода в океанологии встречается лишь в небольшом количестве работ. В [15] лазерный ультразвуковой метод базировался на идее теплового возбуждения мощным ИК-лазером звуковой волны, распространяющейся вглубь толстой пленки до ее нижней границы, где происходит ее частичное отражение и последующее распространение в обратном направлении. При достижении верхней границы пленки звуковая волна создает локальное возмущение, регистрируемое вторым лазером. В работе [16] авторы использовали импульсный лазер с длиной волны 355 нм для генерации ультразвука и сканирующий

лазерный доплеровский виброметр (Laser Doppler Vibrometer – LDV) для регистрации амплитуды и частоты акустических сигналов на поверхности пленки по ее возмущениям. Еще одна вариация метода была предложена в работе [17], где в лабораторном эксперименте с помощью сверхширокополосного ультразвукового гидрофона был зарегистрирован ультразвук, а по его характеристикам были получены оценки толщин нефтяной пленки. Совершенно новый подход был недавно предложен в работе [18], где в рамках лабораторного эксперимента был впервые продемонстрирован эффект генерации в воздухе акустических импульсов, напоминающих треск, воспринимаемый на слух, при облучении пленки на поверхности воды непрерывным лазерным излучением с длиной волны 10,4 мкм, в то время, как для чистой воды треск не регистрировался. В ходе анализа данных были получены как регулярно повторяющиеся, так и сильно изменчивые результаты при сохранении условий проведения эксперимента. Так, например, отсутствовала однозначная связь между интенсивностью треска и толщиной (концентрацией) пленки, а частота следования щелчков оказалась неоднозначной функцией концентрации поверхностной пленки [19]. В связи с необходимостью разрешения сложившейся ситуации было решено провести дополнительные исследования, направленные на визуализацию процессов, протекающих в зоне облучения пленки, методом скоростной макровидеосъемки. Результаты этого исследования представлены в настоящей работе.

Лабораторный эксперимент

Лабораторный эксперимент проводился в лаборатории ИПФ РАН. На горизонтальной поверхности устанавливалась предварительно протертая спиртом стеклянная кювета размером 258×60×115 мм, заполненная водой до уровня 50 мм. В качестве вещества пленки использовалась уральская нефть. Пленка наносилась калиброванной пипеткой на поверхность воды. Над кюветой размещался источник излучения – 10,5 мкм CO₂ лазер марки CloudRay, мощность которого плавно регулировалась в диапазоне 0–40 Вт. Излучение «заходило» в кювету под прямым углом к поверхности посредством зеркала. Аналоговый микрофон размещался в воздухе вблизи кюветы. Сигнал с него оцифровывался посредством АЦП, после чего проходил спектральную обработку.

Видеосъемка процессов в кювете проводилась с применением камеры Nikon 1 с макрообъективом при скорости съемки 400 кадров в секунду. Фотоаппарат устанавливался на штативе с одной из сторон от кюветы на удалении порядка 300 мм. С зеркальной стороны монтировался полупрозрачный экран, позади которого под наклоном к горизонту устанавливался студийный свет. Таким образом формировалось градиентное освещение.

Натурный эксперимент

Помимо лабораторных работ, исследование оптоакустического эффекта также проводилось в натуральных условиях, в яхт-клубе «Белая речка» на Горьковском водохранилище. С одной стороны, было важно оценить влияние натуральных условий (волнения, посторонних шумов, собственной пленки на водной поверхности и др.) на возможность регистрации оптоакустического эффекта. С другой стороны, использовать естественное смещение пленки за счет течения в верхнем слое, чтобы в каждый последующий момент времени обеспечить облучение участка пленки, не облученного ранее.

В этих работах использовалась та же техника и та же методика выполнения работ, что и в лабораторном эксперименте, с той лишь разницей, что лазер вывешивался над водной поверхностью с пирса. Расстояние до поверхности регулировалось механически. Пленки создавались путем точечного выливания фиксированного объема вещества вблизи центра зоны облучения. Процесс растекания фиксировался на дополнительную веб-камеру с пирса (рис. 1), что позднее позволяло пересчитать объем вылитого вещества через занимаемую им площадь в толщину пленки в каждый момент времени. В качестве поверхностно-активных веществ использовались экологически безвредные растительное масло и олеиновая кислота.

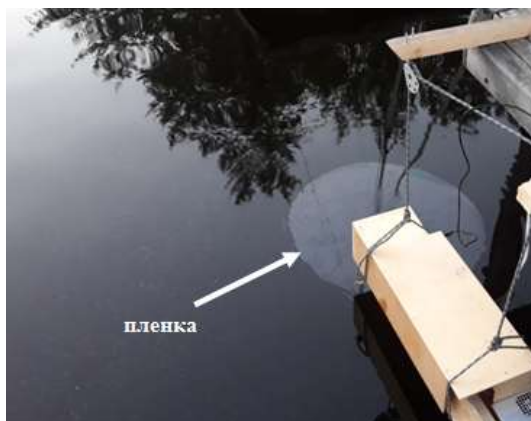


Рис. 1. Фотография постановки натурального эксперимента по регистрации оптоакустического эффекта с пленкой растительного масла на водной поверхности Горьковского водохранилища

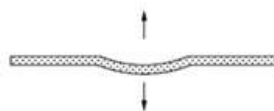
Результаты и их обсуждение

Результаты лабораторных исследований представлены на примере одной из видеозаписей, когда на поверхности воды было создано нефтяное пятно около 15 мм в диаметре и толщиной в несколько долей миллиметра (рис. 2). Это толстая темная пленка, изображение которой на фоне светлой поверхности воды оказалось достаточно контрастным, чтобы в деталях рассмотреть процессы, сопутствующие оптоакустическому эффекту. Процесс начинался с того, что в начальный момент времени ($t = 0$) включался лазер. Через 40 мс зона облучения диаметром около 3 мм (порядка диаметра пучка) приходила в колебательное движение. В данном эксперименте удалось зарегистрировать 3 колебания за счет изменения яркости поверхности, вызванного изменением ее локального уклона. Периоды колебаний были различны: 50 мс; 20 мс; 12 мс. По окончании колебаний, спустя 10 мс, стало заметным высветление зоны облучения, вероятно связанное с уменьшением толщины пленки вследствие прожигания. В момент времени $t = 139$ мс произошел «взрыв» малой амплитуды, сопровождаемый разрывом пленки, высвобождением пара, расширением области разрыва и формированием расходящейся поверхностной волны (рис. 2–4 и 2–5). Последние два процесса наблюдались на поверхности в течение 46 мс, после чего картина поверхности не менялась в течение еще 18 мс.

1. $t=0$, включение лазера



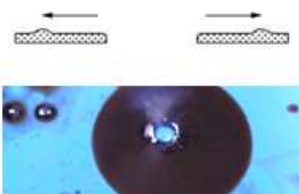
2. $t_1=40$ мс, возникновение периодические колебаний



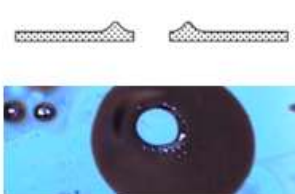
3. $t_3=138$ мс, прожигание пленки



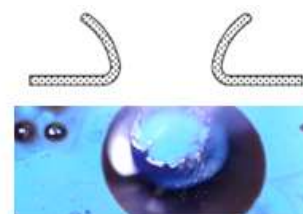
4. $t_4=139$ мс, момент «малого взрыва»



5. $t_5=185$ мс, поверхностных процессов не наблюдается



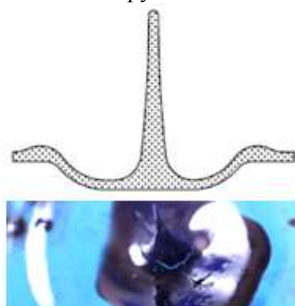
6. $t_6=203$ мс, «большой взрыв»



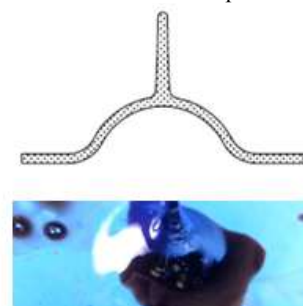
7. $t_7=211$ мс, проявление полусферической каверны



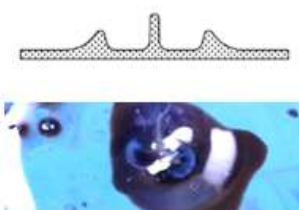
8. $t_8=215$ мс, формирование кумулятивной струи



9. $t_9=220$ мс, возникновение колебательных процессов



10. $t_{10}=222$ мс, исчезновение струи и каверны



11. $t_{11}=236$ мс, исчезновение расходящейся волны, выглаживание поверхности



12. $t_{12}=250$ мс, повторение процесса, начиная с пункта №1



Рис. 2. Визуализация оптоакустического эффекта в толстой нефтяной пленке на водной поверхности

В это время под пленкой за счет интенсивного нагрева формировалась воздушная каверна (см. рис. 3). В момент времени $t = 203$ мс последовал «большой взрыв», сопровождаемый разрывом пленки, выделением пара и выбросом брызг с рваной границы пленки – венца, возвышающегося над поверхностью жидкости (рис. 2–9). Спустя несколько миллисекунд в области разрыва стала различима полу- сферическая каверна, ко дну которой стекала пленка (рис. 2–10).

В последующие 4 мс времени каверна расширялась, ее дно устремилось вверх с образованием кумулятивной струи, а кромка каверны – сглаженный за счет поверхностного натяжения венец, трансформировался в расходящуюся поверхностную волну (рис. 2–11). Колебания каверны с распадом кумулятивной струи, наблюдаемые в последующие 14 мс, являлись финальным этапом гидродинамических процессов, после чего весь процесс повторялся. Статистический анализ представленного на рис. 2 и других видеорядов, позволил сделать следующие выводы:

1. Установлены два потенциальных источника излучения звуковых волн: «большие» и «малые» взрывы воздушной каверны под пленкой. Процессы, следующие после «большого взрыва» схожи с последствиями от падения капли на невозмущенную поверхность жидкости [20]. «Малые взрывы» напоминают кипение, сопровождаемое выделением пара и мелких брызг.

2. «Малые взрывы» регистрируются в количестве 0-5 штук между «большими взрывами», причем, как правило, они наблюдаются как на дне каверны, так и на пике кумулятивной струи.

3. Если толстая нефтяная пленка относится в сторону от области облучения, то «малые взрывы» практически полностью пропадают и наблюдаются только «большие взрывы» под оставшейся тонкой пленкой (рис. 4).

4. Установлена средняя продолжительность процесса, описанного на рис. 2, равная 0.25 с.

5. Считая, что регулярно наблюдаемыми являются только «большие взрывы» (см. п. 2), предположительно являющиеся основным источником излучения звуковых волн (щелчков), была подсчитана функция распределения количества щелчков в зависимости от частоты их следования (рис. 5) Согласно этой функции, наиболее часты щелчки с периодом следования 0,025 с. Полученный результат согласуется с результатами спектральной обработки аудиозаписей «треска» [18].



Рис. 3. Момент формирования воздушной каверны под пленкой при ее интенсивном облучении (фронтальный разрез).

В натуральных условиях оптоакустический эффект также удалось зарегистрировать при одновременной регистрации его визуального проявления. Все процессы оказались аналогичны тем, что наблюдались в лаборатории, хотя количественные оценки характеристик звука еще не получены до конца. Несмотря на это, проведенный эксперимент позволил получить несколько полезных результатов:

1. Наличие собственной квазимономолекулярной пленки на поверхности водоема, приводящей к редким щелчкам, не ограничило возможности уверенно детектировать присутствие исследуемой пленки. Поиск оптимального звукового порога между треском собственной и исследуемой пленки связан с подбором высоты размещения оптической системы над поверхностью воды или ее мощностью.



а)

б)

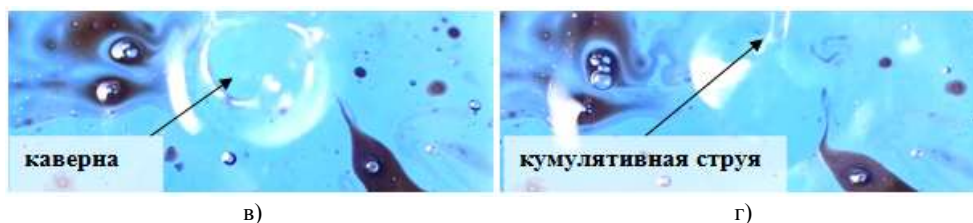


Рис. 4. Фоторяд «большого взрыва» на тонкой нефтяной пленке: а) – невозмущенная поверхность перед «взрывом», б) – момент взрыва, в) проявление каверны, г) формирование кумулятивной струи

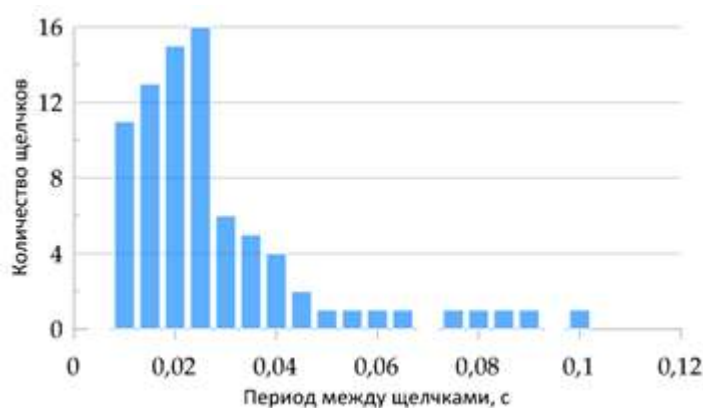


Рис. 5. Функция распределения количества щелчков («больших взрывов») в зависимости от частоты их следования

2. Волнение приводит к модуляции аудиосигнала, что может быть использовано для разработки метода оценки характеристик волнения.

3. Применение лазерной системы без фокусирующей линзы позволяет регистрировать оптоакустический эффект даже с высот порядка 1 м над водной поверхностью, что создает предпосылки к использованию предложенного подхода с борта движущегося судна в реальных морских условиях. При этом вариации интенсивности аудиосигнала будут содержать информацию о волнении, а структура сигнала будет определяться характеристиками пленки на водной поверхности.

Заключение

В работе представлены результаты исследования визуального проявления оптоакустического эффекта в пленках на водной поверхности. На примере толстой нефтяной пленки с использованием скоростной макровидеосъемки продемонстрированы основные фазы динамических процессов, возникающих и протекающих в жидкости под действием интенсивного лазерного излучения дальнего ИК-диапазона. Анализ полученных видеозаписей позволил установить два потенциальных источника излучения звуковых волн: «большие» и «малые» взрывы воздушных каверн различных масштабов, формирующихся под пленкой в процессе ее нагрева и верхнего водного слоя. В обоих случаях наступал разрыв пленки, но сопровождался он разными гидродинамическими процессами. Так при «малых взрывах» последующее поведение области облучения напоминало кипение жидкости с выделением пара и мелких брызг. Процессы, следующие после «большого взрыва» оказались схожи с последствиями от падения капли на невозмущенную поверхность жидкости. При этом «малые взрывы» регистрировались не регулярно, в количестве 0–5 штук между «большими взрывами», а для «больших взрывов», как наиболее вероятного источника звука, была построена функция распределения количества щелчков в зависимости от частоты их следования. Согласно этой функции, чаще всего встречались щелчки с периодом следования 0.025 с, что согласуется с полученными ранее результатами спектральной обработки аудиозаписей «треска».

В натуральных условиях оптоакустический эффект также удалось зарегистрировать. Наличие собственной квазимономолекулярной пленки на поверхности водоема не оказало ограничительного воздействия на детектирование исследуемой пленки, а влияние волнения проявилось в модуляции аудиосигнала, что в дальнейшем может быть использовано при разработке сопутствующего метода оценки характеристик волнения.

Авторы статьи выражают благодарность Богатову Н.А. за организацию видеосъемки.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-35-20054.

Список литературы:

1. Fingas M., Handbook of oil spill science and technology /Fingas M.-Wiley, 2015. -682 p.

2. Дистанционные методы определения толщин пленок нефти и нефтепродуктов на морской поверхности /А.А. Мольков, И.А. Капустин, А.В. Ермошкин, С.А. Ермаков// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса- 2020. -Т. 17. -№3. -С. 9–27. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-9-27
3. Fingas M., The challenges of remotely measuring oil slick thickness / M. Fingas // Remote sensing – 2018. – Vol. 10. – Is. 2. – Pp. 319-337. <https://doi.org/10.3390/rs10020319>
4. Leifer I. State of the art satellite and airborne marine oil spill remote sensing: Application to the BP Deepwater Horizon oil spill / I. Leifer, W.J. Lehr, D. Simecek-Beatty, E. Bradley, R. Clark, P. Dennison, J. Wozencraft // Remote Sensing of Environment. – 2012. – Vol. 124. – Pp. 185–209. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.03.024>
5. Kolokoussis P., Oil Spill Detection and Mapping Using Sentinel 2 Imagery/ Kolokoussis P., Karathanassi V.// J. Mar. Sci. Eng. -2018.-Vol 6(1) – Is 4.
6. Thickness measurement and three-dimensional structure imaging of oil slick on water by optical coherence tomography / F. Yana, H. Ru, Z. Li, J. Shi, N. Luo, C. Xie, Y. Zhang, W. Zhang, X. He, Z. Chen // Optik. – 2019.-Vol. 180, Pp. 1036-1042.
7. Study on the hyperspectral polarized reflection characteristics of oil slicks on sea surfaces / Z.Sun, Y. Zhao, G. Yan, S. Li //Chinese Science Bulletin. – 2011. – Vol. 56. – №. 15. – Pp. 1596-1602.
8. Remote Sensing of Organic Films on the Water Surface Using Dual Co-Polarized Ship-Based X-/C-/S-Band Radar and TerraSAR-X / S.A. Ermakov, I.A. Sergievskaya, J. C.B. Da Silva, I.A. Kapustin, O.V. Shomina, A.V. Kupaev, A.A. Molkov // Remote Sens. – 2018 - Vol 10-Is 7, Pp. 1097; <https://doi.org/10.3390/rs10071097>
9. Wang L., Grueneisen Relaxation Photoacoustic Microscopy / L. Wang, C. Zhang, L.V Wang // Phys. Rev. Lett.- 2014. - Vol.113.- Pp.1–5.
10. Биомедицинский оптико-акустический томограф на основе цилиндрической фокусирующей антенны из поливинилиденфлюорида / П.В. Субочев., А.С. Постникова, А.В. Ковальчук, И.В. Турчин // Изв. вузов. Радиофизика. - 2017. -Т. 60.- № 3. -С. 260–267
11. Ахманов С.А., Параметрический лазерный излучатель ультразвука. / С.А. Ахманов, О.В. Руденко //Письма в «Журнал технической физики». -1975. -Т. 1. -№ 15. -С. 725–728.
12. Излучение звука движущим со сверхзвуковой скоростью тепловым источником / И.Б. Есипов // Научная сессия Объединенного научного совета АН СССР по комплексной проблеме «Физическая и техническая акустика» Акуст. журн.- 1977. Т. 23.- Вып. 1 – С. 155.
13. Егеров С.В., Есипов И.Б., Лямшев Л.М., Наугольных К.А. Генерация звука длинными лазерными импульсами. Акуст. журн. 1979. Т.25. Вып. 2. С. 220–226.
14. Генерация мощных звуковых импульсов при лазерном нагреве поверхности. Вычислительные методы и программирование./ А.А. Карабутов, Е.А. Лапшин, Г.П. Панасенко, О.В. Руденко // Изд. МГУ Москва. -1979. -Т. 31. -С. 174–183.
15. Brown C.E. The LURSOT sensor: providing absolute measurement of oil slick thickness / C.E. Brown, M.F. Fingas, R.H. Goodman, M. Choquet, A. Blouin, D. Drolet, J.-P. Monchalain, C.D. Hardwick // In: Proceedings of the Fourth Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, MI, USA. - 1997- Vol. 1.- Pp.-393–397.
16. Li Y. Experimental Study on Thickness Measuring Method of Oil-on-Water Using Laser-Ultrasonic Technique/ Y. Li, X. Qi, H. Wang // Nami Jishu yu Jingmi Gongcheng/Nanotechnol. Precis. Eng. – 2017. – Vol. 15. – P. 159–167.
17. Underwater photoacoustic detection and characterization of oil films: laboratory study. / P. Subochev, R. Belyaev, M.Prudnikov, V. Vorobyev, I. Turchin, A.Bugrov, A. Pyanova, A. Ermoshkin, I. Kapustin, A. Molkov // Books of abstracts. The 20th International on Photoacoustic and photothermal phenomena: Russia, Moscow, 7-12 July 2019. – 2019. – BP 026. – P. 279.
18. An effect of sound generation due to surfactant films on the water surface illuminated by intensive IR radiation / A.A. Molkov, I.A. Kapustin, S.A. Ermakov, T.N. Lazareva, G.V. Leshchev, I.A. Sergievskaya // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2019, -111501K- (14 October 2019)- Vol. 11150; <https://doi.org/10.1117/12.2533156>
19. Эффект генерации звука мощным излучением ИК-диапазона при облучении воды, покрытой пленкой поверхностно-активного вещества / А.А.Мольков, И.А. Капустин, С.А. Ермаков, Т.Н. Лазарева, Г.В. Лещев, И.А. Сергиевская// Тезисы конференции: «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». -2019 г.- С. 307.
20. Ильиных А.Ю., Гидродинамика контакта падающей капли со свободной поверхностью жидкости/ А.Ю. Ильиных, Ю.Д. Чашечкин // Известия Российской Академии наук. Механика жидкости и газа -2016. -№2. -С. 3–12.

THE VISUAL MANIFESTATION OF THE OPTOACOUSTIC EFFECT IN FILMS ON WATER

Alexander A. Molkov

*Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia
Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

Stanislav A. Ermakov

*Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia
Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

Irina A. Sergievskaya

*Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia
Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

Tatyana N. Lazareva

Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia

George V. Leshchev

Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Recently, in the laboratory experiments we have presented effect of sound generation in air seems like «crackling» when a film on the water surface was irradiated by IR- laser radiation with a wavelength of 10.5 μm . For clean water surface, no crackling was detected. It means, that film presence significantly changed the conditions for the formation of local heating areas in water and acoustic waves emission. The sound characteristics were preliminarily investigated depending on the water temperature, the film thickness and its substance, as well as the radiation intensity. However, the effect insufficient repeatability in some experiments stimulated additional studies of the observed optoacoustic effect in order to obtain visual information about the processes occurring in the irradiated area using video recording. This study results are presented in this paper on the example of a laboratory and field experiments.

Keywords: *optoacoustic, surfactant films, slicks, macro photography, high-speed shooting*

References:

1. Fingas M. Handbook of oil spill science and technology. Wiley. 2015. 682p.
2. Molkov A.A., Kapustin I.A., Ermoshkin A.V. Ermakov S.A. «Distancionnye metody opredeleniya tolshchin plenok nefi i nefteproduktov na morskoy poverhnosti» (Remote sensing methods for measuring the thickness of oil/oil product films on the sea surface) *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*.17.3 (2020): 9–27.
3. Fingas M., «The challenges of remotely measuring oil slick thickness» *Remote sensing* 10. 2 (2018): 319-337 <https://doi.org/10.3390/rs10020319>
4. Leifer I., Lehr W.J., Simecek-Beatty D., Bradley E., Clark R., Dennison P., J. «Wozencraft State of the art satellite and airborne marine oil spill remote sensing: Application to the BP Deepwater Horizon oil spill» *Remote Sensing of Environment* 124(2012): 185-209. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.03.024>
5. Kolokoussis P., Karathanassi V., «Oil Spill Detection and Mapping Using Sentinel 2 Imagery» *J. Mar. Sci. Eng.* 6.4 (2018)
6. Yana F., Ru H., Li Z., Shi J., Luo N., Xie C., Zhang Y., Zhang W., He X., Chen Z. «Thickness measurement and three-dimensional structure imaging of oil slick on water by optical coherence tomography» // *Optik*. 180(2019): 1036-1042
7. Sun Z., Zhao Y., Yan G., Li S., «Study on the hyperspectral polarized reflection characteristics of oil slicks on sea surfaces» *Chinese Science Bulletin* 56.15 (2011): 1596-1602
8. Ermakov S.A., Sergievskaya I. A., Da Silva J. C.B., Kapustin I.A., Shomina O.V., Kupaev A.V., Molkov A.A. «Remote Sensing of Organic Films on the Water Surface Using Dual Co-Polarized Ship-Based X-/C-/S-Band Radar and TerraSAR-X» *Remote Sens* 10/7 (2018):1097 <https://doi.org/10.3390/rs10071097>
9. Wang L., Zhang C., Wang L.V. «Grüneisen Relaxation Photoacoustic Microscopy» *Phys. Rev. Lett.* 113 (2014): 1-5.
10. Subochev P.V., Postnikova A.S., Kovalchuk A.V., Turchin I.V. «Biomedicinskij optiko-akusticheskij tomograf na osnove cilindricheskoj fokusiruyushchej anteny iz polivinilidenflyuorida» (Biomedical optoacoustic tomograph based on a cylindrical focusing PVDF antenna) *Izvestiya vuzov. Radiofizika* 60.3 (2017): 260-267
11. Ahmanov S.A., Rudenko O.V. «Parametricheskij lazernyj izluchatel ultrazvuka» *Pisma v «Zhurnal tekhnicheskoy fiziki»* 1.15 (1975): 725-728
12. Esipov I.B. «Izluchenie zvuka dvizhushchim so sverhzvukovoj skorost'yu teplovym istochnikom. *Akust. zhurn.* 23.1 (1977): 155
13. Egerev S.V., Esipov I.B., Lyamshev L.M., Naugolnyh K.A. «Generaciya zvuka dlinnymi lazernymi impulsami» *Akust. zhurn* 25.2 (1979): 220-226
14. Karabutov A.A., Lapshin E.A., Panasenko G.P., Rudenko O.V. «Generaciya moshchnyh zvukovyh impulsov pri lazernom nagreve poverhnosti. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye*», Izd. MGU Moskva 31(1979): 174-183
15. Brown C.E., Fingas M.F., Goodman R.H. Choquet M., Blouin A., Drolet D., Monchalain J.P., Hardwick C.D. «The LURSOT sensor: providing absolute measurement of oil slick thickness» *Proceedings of the Fourth Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments*, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, MI, USA. 1(1997): 393–397.
16. Li Y., Qi X., Wang H., «Experimental Study on Thickness Measuring Method of Oil-on-Water Using Laser-Ultrasonic Technique» *Nami Jishu yu Jingmi Gongcheng/Nanotechnol. Precis. Eng.* 15 (2017): 159–167.
17. Subochev P., Belyaev R., Prudnikov M., Vorobyev V., Turchin I., Bugrov A., Pyanova A., Ermoshkin A., Kapustin I., Molkov A. Underwater optocoustic detection and characterization of oil films: laboratory study. *Books of abstracts. The 20th International on Photoacoustic and photothermal phenomena: Russia, Moscow, (7-12 July 2019)*: 279
18. Molkov A.A., Kapustin I.A., Ermakov S.A., Lazareva T.N., Leshchev G.V., Sergievskaya I.A., «An effect of sound generation due to surfactant films on the water surface illuminated by intensive IR radiation», *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2019*, 11150 (14 October 2019); <https://doi.org/10.1117/12.2533156>
19. Molkov A.A., Kapustin I.A., Ermakov S.A., Lazareva T.N., Leshchev G.V., Sergievskaya I.A. «Effekt generacii zvuka moshchnym izlucheniem IK-diapazona pri obluchenii vody, pokrytoj plenok poverhnostno-aktivnogo veshchestva» *Tezisy konferencii: «Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa»* (2019):307
20. Ilinykh A.Y., Chashechkin Y.D. «Gidrodinamika kontakta padayushchej kapli so svobodnoj po-verhnostyu zhidkosti» *Izvestiya Rossijskoj Akademii nauk. Mekhanika zhidkosti i gaza* 2(2016): 3-12

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Мольков Александр Андреевич, к.ф.-м.н., научный сотрудник отдела радиофизических методов в гидрофизике, Институт прикладной физики Российской академии наук (ФГБНУ «ИПФ РАН»), 603950, г. Нижний Новгород, БОКС -120, ул. Ульянова, 46, старший научный сотрудник кафедры

Aleksandr A. Molkov, Ph.D., Researcher of the Department of Radiophysical Methods in Hydrophysics, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, 46, Ulyanova st, Novgorod, 603950, Senior researcher of the Department of Hydrodynamics, Vessel Theory and Ecological Safety, Volga State University of Water

гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»),
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5,
e-mail: a.molkov@inbox.ru

Ермаков Станислав Александрович, д.ф.-м.н., зав. отделом радиофизических методов в гидрофизике, Институт прикладной физики Российской академии наук (ФГБНУ «ИПФ РАН»),

603950, г. Нижний Новгород, БОКС- 120, ул. Ульянова, 46,

Зав. кафедрой гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»),

603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5,
e-mail: stas.ermakov8@gmail.com

Сергиевская Ирина Андреевна, к.ф.-м.н., зав. лабораторией оптических методов, Институт прикладной физики Российской академии наук (ФГБНУ «ИПФ РАН»),

603950, г. Нижний Новгород, БОКС -120, ул. Ульянова, 46,

старший научный сотрудник кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»),

603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5,
e-mail: onw2009@mail.ru

Лазарева Татьяна Николаевна, ведущий программист отдела радиофизических методов в гидрофизике, Институт прикладной физики Российской академии наук (ФГБНУ «ИПФ РАН»),

603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46, e-mail: lazareva@ipfran.ru

Лещёв Георгий Владимирович, инженер отдела радиофизических методов в гидрофизике, Институт прикладной физики Российской академии наук (ФГБНУ «ИПФ РАН»),

603950, г. Нижний Новгород, БОКС – 120, ул. Ульянова, 46,

e-mail: georgeleshev@gmail.com

Transport,

5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951,

Stanislav A. Ermakov, Ph.D., Head of the Department of Radiophysical Methods in Hydrophysics, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,

46, Ulyanova st, Novgorod, 603950,

Head of the Department of Hydrodynamics, Vessel Theory and Ecological Safety, Volga State University of Water Transport,

5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951,

Irina A. Sergievskaya, Ph.D., Head of the Optical method laboratory, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,

46, Ulyanova st, Novgorod, 603950,

Senior researcher of the Department of Hydrodynamics, Vessel Theory and Ecological Safety, Volga State University of Water Transport,

5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951,

Tatyana N. Lazareva, Leading Programmer of the Department of Radiophysical Methods in Hydrophysics, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,

46, Ulyanova st, Novgorod, 603950,

George V. Leshchev, Engineer of the Department of Radiophysical Methods in Hydrophysics, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,

46, Ulyanova st, Novgorod, 603950,