

# **Гипотеза об излучении неклассического света при импульсе рака-щелкуна: постановка и предварительный анализ**

Макушевич И.В. [ajir@ro.ru](mailto:ajir@ro.ru) Акустический институт имени академика Н.Н. Андреева

## **Аннотация**

Недавно опубликованы данные о том, что свет, излучаемый при сонолюминесценции, — неклассический. Это является существенным результатом, накладывающим значимые ограничения на гипотезы о еще недостаточно изученном механизме сонолюминесценции. Известно, что при импульсе клешни рака-щелкуна происходит кавитация, которая сопровождается сонолюминесценцией. Можно предположить, что раки-щелкуны являются природным источником неклассического света. Намечены пути проверки данной гипотезы.

**Ключевые слова:** акустическая кавитация, неклассический свет, раки-щелкуны, сонолюминесценция, эффект Казимира.

В данной статье кратко рассмотрены сведения о раках-щелкунах, сонолюминесценции и неклассическом свете, с целью формулирования заявленной гипотезы. Намечены пути ее проверки.

## **Раки-щелкуны**

Раки-щелкуны являются интересным и важным объектом исследования. Для настоящей статьи важно, в первую очередь, то, что рак, «как будто неплохо зная физику», при щелчке определенным образом устроенной клешней рождает очень быструю струю воды, которая рождает пузырек, при кавитационном схлопывании которого рождается мощный звук. Небольшие раки (сантиметры, они скорее креветки) являются одним из основных источников шумов океана, «конкурируя» с огромными китообразными.

Кавитационное схлопывание пузырька сопровождается сонолюминесценцией. Первая или одна из первых работ, в которой показано, что в пузырьке при импульсе рака-щелкуна создается микроскопическое количество плазмы с температурой, близкой к температуре поверхности Солнца [Lohse, Schmitz, Versluis, 2001]. И если гидродинамические механизмы генерации пузырька и звука в общем ясны, то механизм сонолюминесценции, происходящей при кавитации — не изучен в достаточной степени.

Стоит отметить, что на Всероссийской акустической конференции 2020 года были представлены некоторые интересные сведения о нелинейных эффектах при кавитации [Кедринский, Журавлева, 2020] (позже была по итогам доклада на конференции статья в «Акустическом журнале» [Кедринский, Большакова, 2021]).

Интерес представляет и предположение Н.Г. Бибики, что, находясь под действием мощных нелинейных импульсов, планктон может потерять плавучесть, что альфеусы используют, чтобы им питаться ([Бибиков, 2022] в частной беседе).

## **Неклассический свет**

Кратко определим, что такое «неклассический свет». В неформальном определении, это свет, свойства которого могут быть познаны лишь в рамках последовательной квантовой теории. Клышко в обзоре [Клышко, 1996] приводит следующее определение: «Под НКС понимается свет, наблюдаемые свойства которого нельзя описать с помощью наглядных, привычных представлений, рассматривая пучок света как совокупность волн. Иначе говоря, НКС вызывает эффекты, не имеющие классических аналогов».

В данном обзоре и во многих других сформулированы конкретные математические критерии НКС. Упомянем как пример: «Согласно одному из наиболее часто используемых определений неклассический свет не может быть описан положительно определенной функцией Р-распределения Глаубера–Сударшана» [Лебедев, Парахонский, Деменев, 2015].

Это определение, которое дано со ссылкой на вышеупомянутый обзор [Клышко, 1996].

Оговорим, что под «светом» в нашей статье, как и во всех цитируемых источниках понимается весь оптический диапазон, а не только видимый человеком свет.

### **Сонолюминесценция**

Основными базовыми гипотезами сонолюминесценции являются тепловая и электрическая. Тепловая состоит в том, что при сжатии пузырька небольшое количество воздуха сжимается до очень высокой температуры. Электрическая — в каких-то электрических процессах, происходящих при сжатии пузырька.

Среди неклассических гипотез сонолюминесценции отметим следующую. Джулиан Швингер предложил (вероятно, впервые в работе [Schwinger, 1994]) экзотический механизм сонолюминесценции, основанный на свойствах физического вакуума и «родственный» эффекту Казимира. Он обсуждался реже двух основных гипотез, но все же обсуждался. Вышеупомянутая работа Швингера имеет (на 17.06.2022) 83 цитирование по данным гугле-академии и 61 по данным Scopus. Отметим, что хотя любые формальные параметры «наукометрии» очень сомнительны, косвенно то, что большинство вообще существующих цитирований работы Швингера входит и в Scopus, может считаться аргументом за ее классичность и значимость. Отметим, что в статье в «Успехах физических наук» [Воронов, 2001], где приведена информация о конференции «Квантование, калибровочные теории и струны» памяти Ефима Самойловича Фрадкина, упоминается доклад Милтона<sup>1</sup>, в котором обсуждалась гипотеза Швингера. Также в обзоре по сонолюминесценции [Маргулис, 2000, с. 282-283] (тоже опубликованном в «Успехах Физических наук») гипотеза Швингера подробно разбирается, исходно называется «интересной», но делается итоговый негативный вывод: «Таким образом, теория квантовой вакуумной радиации, если она вообще окажется жизнеспособной, требует коренной переработки».

Рассмотрим некоторые работы, посвященные сонолюминесценции, опубликованные на русском языке. Такой известный акустик, как М.Г. Сиротюк, писал в посмертно опубликованной рукописи [Сиротюк, 2008], что большинство фактов укладывается в тепловую гипотезу, но не все ясно. Однако подготовку этой рукописи автор закончил<sup>2</sup> в 1987 году. Имеются по крайней мере два обзора ([Маргулис, 2000], [Борисёнок, 2015]) полностью посвященные сонолюминесценции. В обзоре М.А. Маргулиса высказано мнение, что механизм однопузырьковой сонолюминесценции — тепловой. В.А. Борисёнок же считает, что наиболее адекватная гипотеза — поляризационная (разновидность электрической).

Отметим, что Маргулис в 2000 году выносил в аннотацию, что: «Механизм ряда эффектов в однопузырьковых системах пока остается неясным». И в обзоре Борисёнка (более позднем по времени) оговаривается, что «полной ясности нет»: «Приемлемого объяснения эффекту возрастания световых выходов при переходе от ОПСЛ к ОПСЛ-РД в литературе сегодня нет». [Борисёнок, 2015, С. 343.] «Наиболее удовлетворительно критерию тестирования соответствует поляризационная модель. Но объяснения результатов экспериментов в рамках ПМ сегодня носят качественный характер. Нужна верификация модели. Таким образом, приходится констатировать, что в проблеме СЛ задача образования излучающей зоны сегодня не решена». [там же, С. 356.] И исходно в аннотации обзора декларируется: «Показано, что наиболее удовлетворительно всю совокупность экспериментальных данных качественно объясняет поляризационная модель».

Значительное событие в изучении сонолюминесценции произошло недавно. 21 марта 2022 года был опубликован препринт [Rezaee, Zhang, Harden, Karimi, 2022]. В нем приводятся экспериментальные доказательства того, что свет, излучаемый при однопузырьковой сонолюминесценции — неклассический. 9 апреля 2022 года была опубликована информация о препринте на русском языке [Хамадеев, 2022]. Представляется,

<sup>1</sup> Сведения о докладе Милтона имеются на сайте конференции:  
<https://www.tamm.lpi.ru/confs/esfconf/proceedings.html>

<sup>2</sup> Сведения из редакторского предисловия к книге.

что результаты этого эксперимента накладывают существенные ограничения на возможные теории сонолюминесценции, и, в частности, служит серьезным аргументом в пользу того, что при однозурьковой сонолюминесценции действительно задействован механизм, предложенный Швингером.

### **К итогу**

Выдвигается гипотеза, что свет, излучаемый при импульсе рака-щелкуна — неклассический. Она нуждается в подтверждении.

Измерить и проанализировать в необходимом ключе свет сонолюминесценции при импульсе рака-щелкуна гораздо труднее, чем воспроизвести то, что сделано в работе [Rezaee, Zhang, Harden, Karimi, 2022]. Во-первых, излучение слабее. Во-вторых, рак генерирует щелчки далеко не непрерывно, нужно «подловить момент».

Возможным экспериментальным решением была бы «разведка вопроса» на бионной модели клешни рака-щелкуна. Такая модель была создана недавно [Tang, Staack, 2019].

### **Список литературы**

1. Schwinger J. Casimir light: field pressure // PNAS. 1994. V. 91. N. 14. P. 6473-6475. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.91.14.6473>
2. Клышко Д. Н. Неклассический свет // Успехи физических наук. 1996. № 6. С. 613–638. DOI: <https://doi.org/10.3367/UfNr.0166.199606b.0613>
3. Маргулис М. А. Сонолюминесценция // Успехи физических наук. 2000. Т. 170. № 3. С. 263-287. DOI: <https://doi.org/10.3367/UfNr.0170.200003c.0263>
4. Lohse D., Schmitz B., Versluis M. Snapping shrimp make flashing bubbles // Nature. 2001. V. 413. N. 6855. P. 477–478. DOI: <https://doi.org/10.1038/35097152>
5. Воронов Б. Л. О Международной конференции «Квантование, калибровочные теории и струны» // Воронов Б. Л., Гинзбург В. Л., Фейнберг Е. Л. Международная конференция «Квантование, калибровочные теории и струны», посвященная памяти Ефима Самойловича Фрадкина (Москва, 5-10 июня 2000 г.) // Успехи физических наук. 2001. Т. 171. № 8. С. 869–874. DOI: <https://doi.org/10.3367/UfNr.0171.200108k.0869>
6. Акустическая кавитация // Сиротюк М. Г.; ответственный редактор Акуличев В. А., Гаврилов Л. Р.; Тихоокеанский океанологический институт имени Ильичева В. И. ДВО РАН. М.: Наука, 2008. 271 с.
7. Лебедев М. В., Парахонский А. Л., Деменев А. А. Генерация неклассического света при резонансном возбуждении полупроводникового микрорезонатора // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики. 2015. Т. 102. № 7-8. С. 571-576.
8. Борисёнок В. А. Сонолюминесценция: эксперименты и модели (обзор) // Акустический журнал. 2015. Т. 61. № 3. С. 333-360.
9. Tang X., Staack D. Bioinspired mechanical device generates plasma in water via cavitation // Science Advances. 2019. V. 5. N. 3. eaau7765. DOI: <https://dx.doi.org/10.1126%2Fsciadv.aau7765>
10. Кедринский В. К., Журавлева Е. С. Структура сходящейся волны разрежения и развитие кавитации за ее фронтом в цилиндрическом слое многофазной жидкости // Труды Всероссийской акустической конференции. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. С. 423-42.
11. Кедринский В. К., Большакова Е. С. Структура сходящейся волны разрежения и развитие кавитации за ее фронтом в многофазной жидкости. // Акустический журнал. 2021. Т. 67. № 3. С. 260-264.
12. Rezaee M., Zhang Y., Harden J. L., Karimi E. Observation of Nonclassical Photon Statistics in Single-Bubble Sonoluminescence // 21 Mar 2022 arXiv:2203.11337 [quant-ph] DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.11337>
13. Хамадеев М. Свет лопающихся пузырьков оказался неклассическим // 09 апреля 2022 N + 1 Интернет-издание URL: <https://nplus1.ru/news/2022/04/09/sono-bubble>