

УДК 550.3; 550.8; 550.334; 534.222

О СВЯЗИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ С МЕДЛЕННЫМИ УЕДИНЁННЫМИ УПРУГИМИ ВОЛНАМИ (МУУВ): ЭКСПЕРИМЕНТЫ С РАДИАЦИОННО-ПОВРЕЖДЁННЫМ СТЕКЛОМ В ЖИДКОСТЯХ

В. Н. Колокольцев¹, Е. М. Кудрявцев², М. М. Ляховицкий¹, А. А. Лебедев²

Обнаружена периодичность (до 20 часов) сигналов акустической эмиссии из радиационно-повреждённого стекла, помещаемого в жидкость. Предположено, что она обусловлена возникающими в условиях эксперимента медленными уединёнными упругими волнами (МУУВ), имеющими дискретные скорости (МУУВ были открыты и изучаются в ФИАНе с 1992 г.).

Ключевые слова: акустическая эмиссия, медленные уединённые упругие волны.

Введение. Поводом для настоящей работы послужило наблюдение многократно повторяющихся периодичностей среди импульсов акустической эмиссии (АЭ) в двух длительных сериях экспериментов. Эксперименты относятся к исследованиям проблемы радиационной прочности стекла и эффектов взрывного разрушения в свинцовых стёклах [1–3].

Рассматривались 3- и 2-суточные записи импульсов АЭ, возникающих в предварительно облучённом стекле марки ТФ-1 (которое используется в устройствах атомной энергетики), если его поместить в жидкость (использовались вода и этиловый спирт, соответственно). АЭ суммировалась за время 10 мкс, которое составляет минимальную ширину импульса, а общее количество импульсов в каждой записи было порядка сотни тысяч. На первый взгляд, они появлялись совершенно хаотически, случайно, однако на деле многие из этих импульсов расположены явно периодически и их можно объединить в серии. На отдельных участках записей для спирта в течение нескольких часов можно

¹ Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН.

² Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991, Москва, Ленинский пр-т, 53.

было наблюдать почти исключительно импульсы, входящие в одну-две серии, каждая из десятка импульсов. Периодичность наблюдаемого процесса необычна, так как импульсы в серии отстоят друг от друга иногда на много тысяч секунд (соответствующие интервалы, T , имеют длительность порядка часа, а иногда и до 20 часов).

Целью настоящей работы является систематическое исследование фактов периодичности импульсов АЭ, которые обнаруживаются при испытаниях по проблеме радиационной прочности стекла, и попытка найти объяснение этим фактам.

2. Описание эксперимента. Схема эксперимента проста. Использовались два примерно одинаковых образца стекла ТФ-1 с плотностью $\rho = 3.86 \text{ г/см}^3$, изготовленных из блока толщиной $(4.00 \pm 0.01) \text{ см}$ с поверхностями заводской полировки. Два других размера каждого образца были также около $4 \times 4 \text{ см}^2$. За 1.5 года до указанных экспериментов образцы стекла облучались при температуре 300 К на ускорителе Микротрон СТ ИМЕТ импульсами с частотой 200 Гц при среднем токе 2 мкА и получили дозу $\sim 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Участок радиационного воздействия на образец виден по фигурам Лихтенберга в виде древа разрушения (мелким пузырькам и трещинам, размером в доли мм) и протянут поперёк оси акустических измерений немного ниже середины образца (составляя по высоте около 1 см). Скорость продольного звука, найденная по литературе для ТФ-1, составляет 4.00 км/с. Эти данные относятся к исходному образцу и будут уточнены для образцов, получивших радиационное воздействие.

Образец лежал на резиновом кольце на дне стеклянного сосуда. Сверху на него был положен звукопровод в виде цилиндра диаметром 20 мм и высотой 10 мм, на котором находился акустический детектор (тех же габаритов), ещё выше – небольшой груз ($\sim 400 \text{ г}$) для фиксации получившегося устройства. Перед опытом детектор с предельными чувствительностью 0.5 мкВ и частотой до 5 мГц регистрировал незначительные акустические шумы в течение часа. После этого в сосуд наливалась жидкость, уровень которой приходился на звукопровод (жидкость не должна была попасть на детектор), и начиналась запись эксперимента (в течение 72 часов – для H_2O и 46 часов – для $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$).

3. Анализ экспериментальных данных на периодичность импульсов АЭ.

3.1. Вода. На рис. 1 представлены данные по АЭ из радиационно-повреждённого стекла ТФ-1, помещённого на 72 часа в H_2O . Здесь видны только наиболее мощные импульсы АЭ и их “сопровождение” – более слабые импульсы, которые повторяются через постоянные промежутки времени. Формат краткого сообщения не позволяет нам привести более подробные детали всей этой записи, за исключением её первой, 5-часовой

части, которая представлена на рис. 2. Как уже отмечалось, полное число импульсов за 72 часа составляет около сотни тысяч и их анализ на принадлежность к эквидистантным сериям потребует применения специальной компьютерной программы. Однако для качественной оценки ситуации можно обойтись и более простым анализом, измерив положения нескольких десятков импульсов, в порядке понижения их амплитуды.

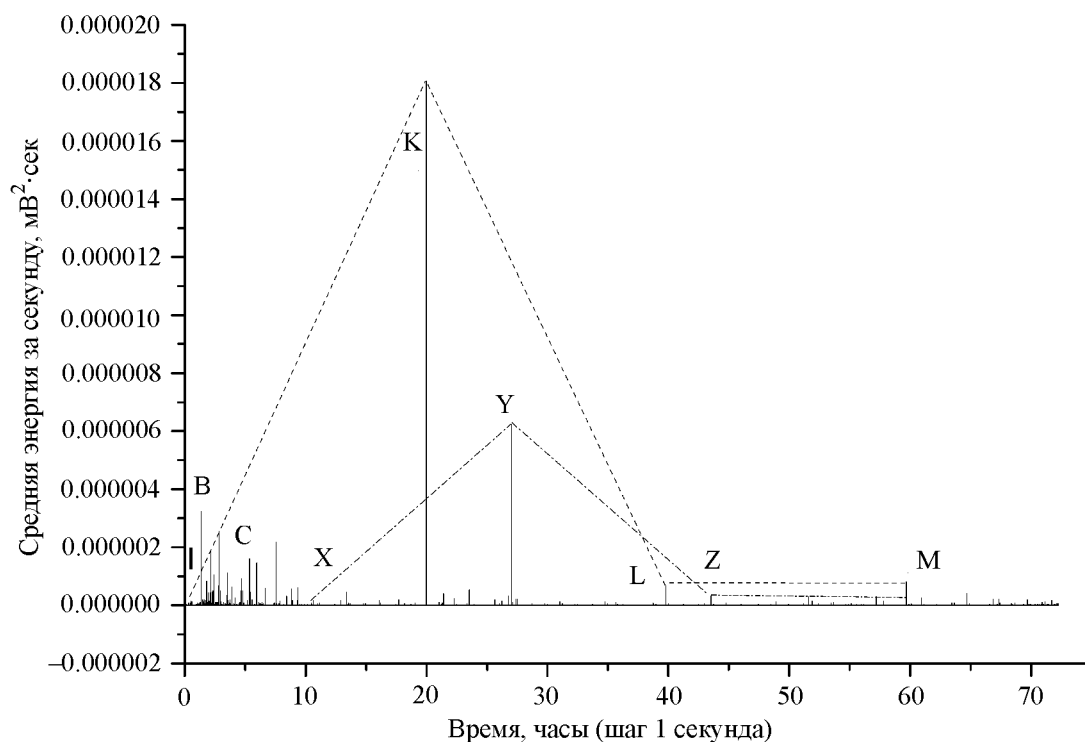


Рис. 1: Акустическая эмиссия из радиационно-поврежденного стекла ТФ-1, помещенного в воду (запись в течение 72 часов).

Как видно, уже два самые мощные импульса являются членами эквидистантных серий IKLM и XYZM, имеющих примерно подобные распределения средних энергий вдоль серии (для наглядности максимумы одной серии соединены соответствующими линиями). Первый пик, I, серии IKLM отстоит от начала опыта всего на 19 минут. Превышающий его по амплитуде в 225 раз главный максимум возникает через 19.6 ч, следующие, L, M – через 19.7 и 19.8 ч (увеличение периода T на 0.6% и 0.8%, уменьшение амплитуды в 27^x и 22^x , соответственно). Для серии XYZM первый пик отстоит от начала опыта на 10.6 ч, пик Y больше его в 37 раз и расстояния между импульсами составляют 16.4; 16.4 и 16.5 ч (увеличение T на 0.7%, уменьшение амплитуды в 18^x и 157^x , соответственно).

На рис. 2 представлено начало той же записи, что и на рис. 1, причём масштаб по оси ординат в 6.5 раз, а по оси времени в 14 раз более подробный, чем на рис. 1. Здесь также легко увидеть 3 серии почти эквидистантных АЭ-импульсов: ABC''D, C'C''C'''C''', abcd. Их величина T близка к 1 часу и составляет, соответственно, 1.04; 1.11; 0.995 ч.

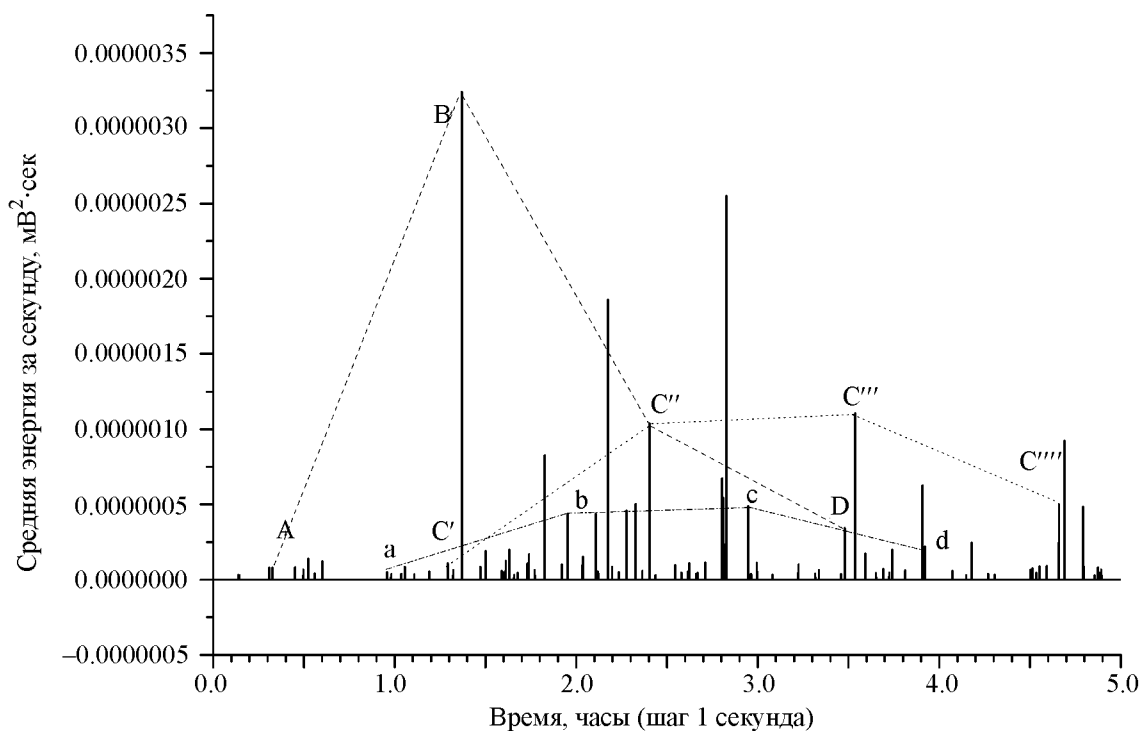


Рис. 2: Акустическая эмиссия из радиационно-повреждённого стекла ТФ-1, помещённого в воду (часть записи рис. 1 за первые 5 часов).

3.2. Этиловый спирт. Картина импульсов АЭ из аналогичного образца радиационно-повреждённого стекла ТФ-1, помещённого в спирт, в общем, близка по структуре к рассмотренной на рис. 1 и 2, хотя общим отличием является снижение средней энергии импульсов, примерно на порядок. Мы приведём подробный анализ этой (и предыдущей) записи с рисунками в специальном выпуске Препринта ФИАН, а здесь ограничимся перечислением некоторых из 9 серий с их параметрами, которые были обнаружены в опытах с воздействием спирта.

В этих экспериментах также выделялись два мощных пика (через 3 ч и 38 ч от начала). Они, как и на рис. 1, 2, также входят в 2 серии с подобным распределением энергии и с T , составляющим, соответственно, 3.6 и 4.5 ч. Кроме этих двух, есть 2 серии с $T \sim 2.3$ и 2.8 ч; далее 4 серии с $T \sim 1.2$; 1.15 ч (целых 11 импульсов!), 1.15 ч

(тоже из 10 импульсов, идущих с небольшим запаздыванием по отношению к импульсам предыдущей серии) и 0.98 ч; ещё в одной серии из 5 импульсов величина T составила ~ 0.49 ч.

4. Интерпретация полученных данных о периодичности АЭ.

4.1. Как нам кажется, установленная необычная картина периодичности импульсов АЭ может быть объяснена *связью* АЭ с долгоживущими медленными уединёнными упругими волнами (МУУВ) [4]. Аналогичная периодичность АЭ в металлах и сплавах при структурных превращениях уже отмечалась, и даже предлагалось использовать её как метод регистрации МУУВ [5]. Такие волны могут образоваться в описываемых опытах в результате воздействия жидкости на радиационно-повреждённое стекло. После этого они будут распространяться по образцу с дискретными скоростями, величина которых может меняться в очень широком диапазоне от км/с до мкм/с и менее [4]. Подобно тому, как аналогичные волны – компоненты МУУВ обеспечивают вспышки механолюминесценции [6, 7], они могут обеспечивать возникновение импульсов АЭ. В работах [6, 7] предполагалось, что при распространении в образцах из кристаллического кварца [6] или красной меди [7], компоненты МУУВ, благодаря создаваемым ими градиентам плотности и температуры, собирают по пути и переносят соответствующие дефекты. Последние, выходя на поверхность, рекомбинируют с испусканием энергии, которая может выделяться в виде АЭ. Такого типа процесс может обеспечить указанные непривычно большие периоды проявления АЭ. Например, при длине образца порядка см и времени прохода по нему волны за 1 час скорость волны составит ~ 3 мкм/с. Сравнимые по величине скорости волны исследуются в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН, начиная с 1992 г.; они были обнаружены экспериментально в различных твердых и жидких конденсированных средах. В недавней работе [8] рассматривалась возможность объяснения, согласно модели Ш. Губермана, крупнейших землетрясений – движением по коре Земли компонентов МУУВ, имеющих скорости ~ 0.5 мкм/с. Кора Земли близка по составу к стеклу (она на 60% состоит из SiO_2).

4.2. Нельзя не сказать об одном затруднении, которое возникает в связи с предлагаемой интерпретацией. При указанных выше скоростях \sim мкм/с, требуемых для согласия с измеренными T , волна за время импульса АЭ, имеющего длительность 10 мкс, переместится всего на 10^{-5} мкм. Тогда такого же размера должна быть “ловушка дефектов”, переносимая волной. Но размер волны составляет обычно порядка 1 мм, что в 10^8 раз превышает размер ловушки. В нашем случае волна МУУВ является волной разрежения и имеет форму, по-видимому, близкую к форме солитона с минимумом в центре [9], где,

можно предположить, и располагается ловушка, но вершину его трудно предположить такой острой... Тем интереснее будет исследовать обнаруженный эффект.

Выводы. Обнаружена периодичность импульсов АЭ и высказано предположение о связи обнаруженной периодичности АЭ с процессом движения компонентов МУУВ по образцу. Оно подтверждается следующими аргументами:

(1) Большая величина периода T становится вполне объяснимой в связи с малой скоростью волн МУУВ. Нам неизвестны другие волны с подобными скоростями.

(2) В соответствии с дискретностью скоростей волн типа МУУВ, которые отличаются примерно в 2 раза, обнаруженные значения T также относятся друг к другу в пропорции 1:2:4:8:16 с ошибкой меньше 20%.

(3) Абсолютные значения величин T и указанное их соотношение, с учётом величины ошибки $\sim 20\%$, совпадают, как и следовало ожидать, для двух примерно одинаково облучённых образцов из стекла ТФ-1, хотя были использованы разные жидкости.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 10-08-01003(а). Авторы благодарят В. В. Рощупкина за проявленный интерес к физическим экспериментам с МУУВ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Effects of space conditions on materials* (ed. by A.I. Akinshin) (Hantington, NY, 2001).
- [2] П. А. Ребиндер, Е. Д. Шукин, УФН **108**(1), 3 (1972).
- [3] С. М. Бреховских, Ю. Н. Викторова, Л. М. Ланда, *Радиационные эффекты в стёклах* (М., Энергоиздат, 1982).
- [4] Е. М. Кудрявцев, в: Сб. трудов XIII сессии РАО, т. 1, Физическая акустика (М., ГЕОС, 2003), стр. 204; <http://rao.akin.ru/rao/sess13/sect1f.htm>, pp. 165-168.
- [5] Е. М. Кудрявцев, С. Д. Зотов, А. А. Лебедев, М. М. Ляховицкий, В. В. Рощупкин, Сб. матер: 3-rd Int. Conf. Deform & Fracture of Mater and Nanomater DFMN3-2009, vol. II (М., Интерконтакт-Наука, 2009), p. 238.
- [6] К. В. Abramova, S. D. Zotov, E. M. Kudriavtsev, A. A. Lebedev, I. P. Scherbakov, Сб. матер: 3-rd Int. Conf. Deform & Fracture of Mater and Nanomater DFMN3-2009, vol. II (М., Интерконтакт-Наука, 2009), p. 128.
- [7] Е. М. Kudriavtsev, К. В. Abramova, I. P. Scherbakov, Proc. SPIE **4679**, 167 (2002).

- [8] Е. М. Кудрявцев, Е. Ф. Макляев, С. Д. Зотов, А. А. Лебедев, Краткие сообщения по физике ФИАН, **36**(9), 40 (2009).
- [9] Е. М. Кудрявцев, С. Д. Зотов, А. А. Лебедев, Квантовая электроника (направлено в печать).

Поступила в редакцию 2 августа 2010 г.