

УДК 534.2

## ДИНАМИКА ФЛУКТУАЦИЙ И $1/f$ СПЕКТРЫ ПРИ АКУСТИЧЕСКОЙ КАВИТАЦИИ ЖИДКОСТЕЙ

© 2007 г. В. Н. Скоков, А. В. Решетников, А. В. Виноградов, В. П. Коверда

Институт теплофизики Уральского отделения РАН

E-mail: vnskokov@itp.uran.ru

Поступила в редакцию 12.01.06 г.

Экспериментально исследована динамика акустической кавитации воды и глицерина. Определены спектры мощности и функции распределения флуктуаций. В переходных режимах вблизи ультразвукового излучателя формируются структуры пузырьков, имеющие вид фрактальных кластеров. Спектры мощности имеют  $1/f$  вид, а функции распределения локальных флуктуаций отличаются от гауссовских и проявляют свойства масштабной инвариантности.

PACS: 43.50.+y, 47.55.dp

Распространение в жидкости звуковых волн высокой интенсивности вызывает акустическую кавитацию. Сложный характер взаимодействия образующихся парогазовых пузырей между собой и с акустическим полем может приводить к формированию различных пространственных структур. Структуры из парогазовых пузырьков, напоминающие фрактальные кластеры, обнаружены экспериментально при возникновении стоячих волн в ультразвуковом поле [1]. Такие структуры были названы акустическими фигурами Лихтенберга [1, 2]. В работе [2] предложена теоретическая модель, согласно которой в системе кавитационных пузырьков, находящихся в акустическом поле, возникает неустойчивость, приводящая к пространственной самоорганизации. При размерах ультразвукового излучателя, соизмеримого с длиной звуковой волны, могут формироваться квазидвумерные кластеры пузырьков вблизи поверхности излучателя [3]. Динамика даже одиночных пузырьков носит сложный нелинейный характер [4, 5]. Взаимодействие кавитационных полостей между собой и с акустическими волнами в экспериментальной ячейке могут приводить к формированию бистабильности и к переходам между стационарными состояниями [6, 7].

Образование кавитационных облаков можно рассматривать как неравновесный фазовый переход в сложной системе взаимодействующих кавитационных полостей и акустических волн. В акустическом поле формируется стационарный случайный процесс с неравновесными фазовыми переходами, спектр мощности которых может иметь  $1/f$  вид [8]. Случайные процессы со спектром мощности, обратно пропорциональным частоте, привлекают к себе внимание масштабно инвариантным распределением флуктуаций. Масштабная инвариантность может быть связана с

критическим поведением или самоорганизацией в сложных системах [9]. Имеется много попыток объяснить возможный механизм генерации масштабно-инвариантных флуктуаций на основе концепции самоорганизованной критичности, которая применяется для описания сложных систем с развитыми флуктуациями.

Исследования случайных процессов в кризисных режимах кипения жидкости показали, что флуктуации с  $1/f$  спектром и самоорганизация критического состояния могут возникать в результате взаимодействия докритического и за-критического неравновесных фазовых переходов в присутствии белого шума [10–13]. Растянутое критическое поведение флуктуаций в этом случае характеризуется самоподобным распределением плотности вероятности, не изменяющимся во времени.

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования флуктуаций при кавитации жидкостей в ультразвуковом поле. В качестве исследуемых жидкостей использовались вода и глицерин. Эксперименты проводили с использованием магнитострикционного источника ультразвуковых колебаний с частотой 22 кГц. Излучатель помещался в оптическую кювету с исследуемой жидкостью. С увеличением мощности излучателя возникала кавитация. При изменении интенсивности излучения в кювете наблюдались резонансные явления, приводящие к изменению картины, создаваемой взаимодействующими кавитационными пузырьками.

На рис. 1 показаны структуры, образующиеся вблизи излучателя при акустической кавитации воды. При небольшой мощности излучателя на его поверхности возникали отдельные центры кавитации (рис. 1а). В результате взаимного при-

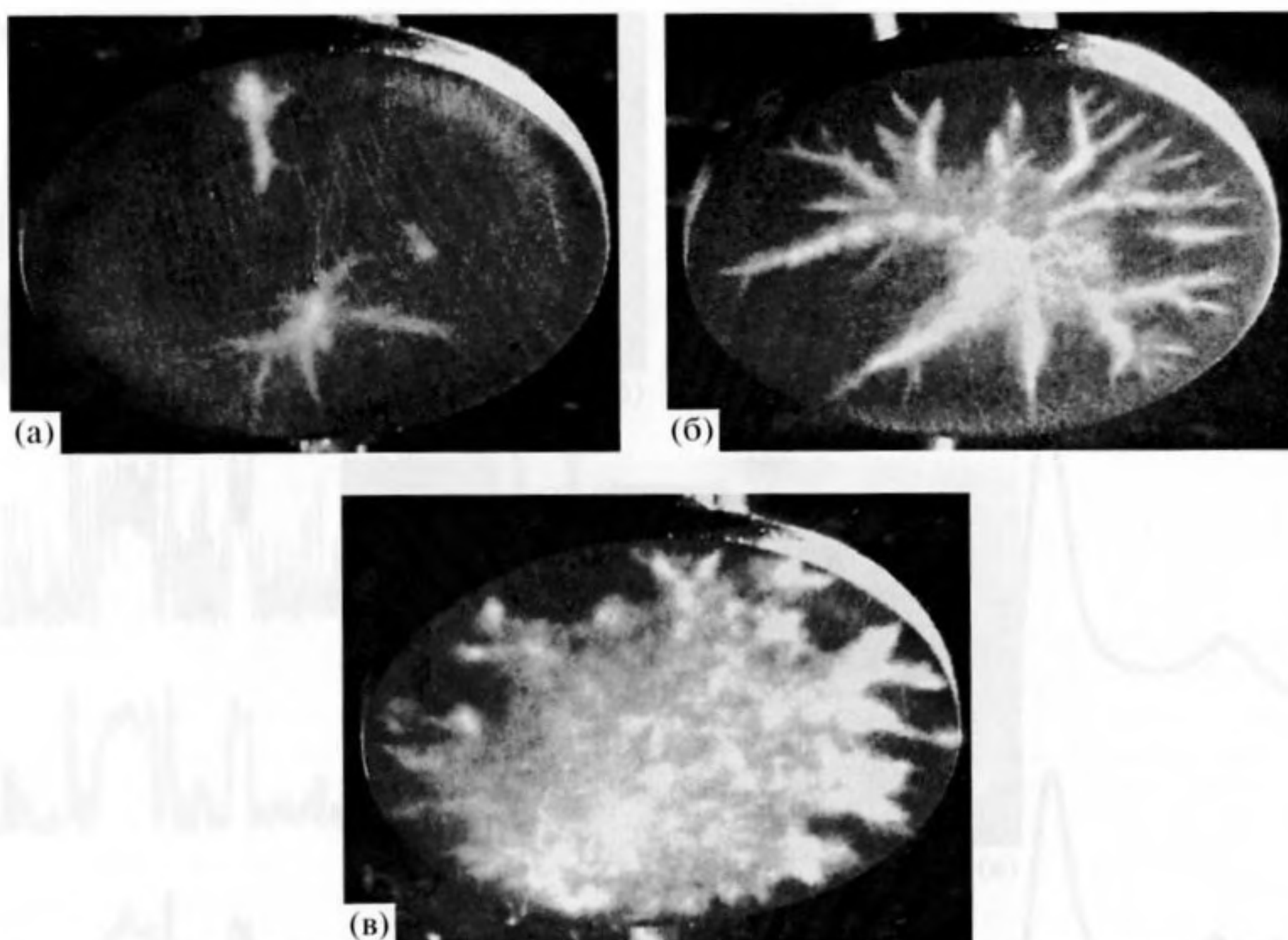


Рис. 1. Фотографии кавитационных областей (вода) на поверхности излучателя при различных интенсивностях ультразвукового поля.

тяжения пузырьки выстраивались в цепочки. С увеличением мощности количество центров кавитации возрастало. В результате кооперативно-го взаимодействия пузырьков вблизи поверхности излучателя формировались агрегаты, напоминающие фрактальные кластеры (рис. 1б). Парогазовый поток был направлен от периферии к центру кластера. Отдельные кластеры могли отрываться от поверхности и переходить в объем жидкости. При дальнейшем увеличении мощности взаимодействующие центры кавитации формировали критически флуктуирующую поверхность (рис. 1в). В опытах с глицерином образующиеся агрегаты были более долгоживущими и имели более контрастный вид. На рис. 2 приведены фотографии пространственных структур на ультразвуковом излучателе при кавитации глицерина при различной интенсивности ультразвукового поля. Рис. 2а, б и в отличаются возрастающей мощностью акустического излучения.

Динамику флуктуаций в кавитационном облаке исследовали методом лазерной фотометрии. Луч лазера пропусклся через оптическую кювету с исследуемой жидкостью. Интенсивность прошедшего лазерного излучения регистрировалась с помощью фотодиода, оцифровывалась и записывалась в компьютере. Для исследования спектров случайного процесса при кавитации луч лазера пропусклся через различные участки кавитационной области. Полученные результаты

слабо зависели от того, в какую часть кавитационного облака направлялся луч. В начальной стадии кавитации спектр мощности флуктуаций фототока, как и спектр акустической эмиссии, в низкочастотной области имел вид спектра белого шума. При увеличении мощности излучателя и некотором варьировании частоты интенсивность флуктуаций резко возрастала, и наблюдались переходы между двумя уровнями колебаний. На рис. 3 приведен спектр мощности флуктуаций в указанном режиме. Из рисунка видно, что  $1/f$  поведение прослеживается на протяжении более четырех порядков изменения мощности.

Во многих экспериментальных работах, посвященных  $1/f$  флуктуациям, наблюдается гауссовский характер функций распределения флуктуаций, который сохраняется при масштабных преобразованиях [14–15]. В модели взаимодействующих неравновесных фазовых переходов функция распределения  $1/f$  флуктуаций для одного источника также близка к гауссовской, но имеет длинные “хвосты” амплитудных выбросов. При масштабных преобразованиях плотность вероятности стохастического процесса с  $1/f$  спектром принимает бимодальный вид и становится масштабно инвариантной [12]. При суперпозиции независимых флуктуаторов функция распределения принимает гауссовский вид, что согласуется с центральной предельной теоремой. При этом со-

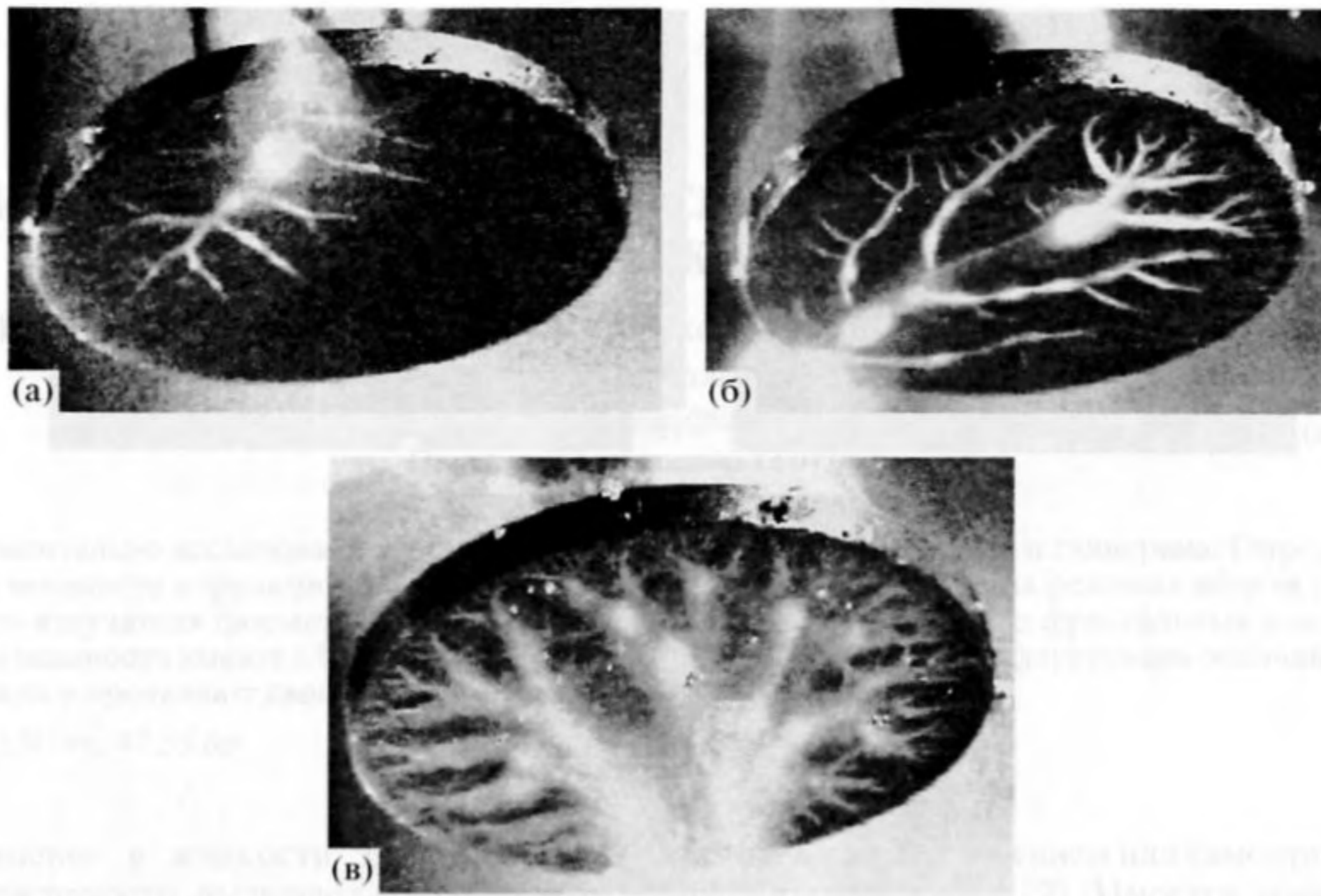


Рис. 2. Фотографии кавитационных областей (глицерин) на поверхности излучателя при различных интенсивностях ультразвукового поля.

храняются масштабно инвариантные свойства флуктуаций.

В экспериментах, как правило, приходится иметь дело с ансамблем независимых источников флуктуаций. Поэтому экспериментально наблюда-

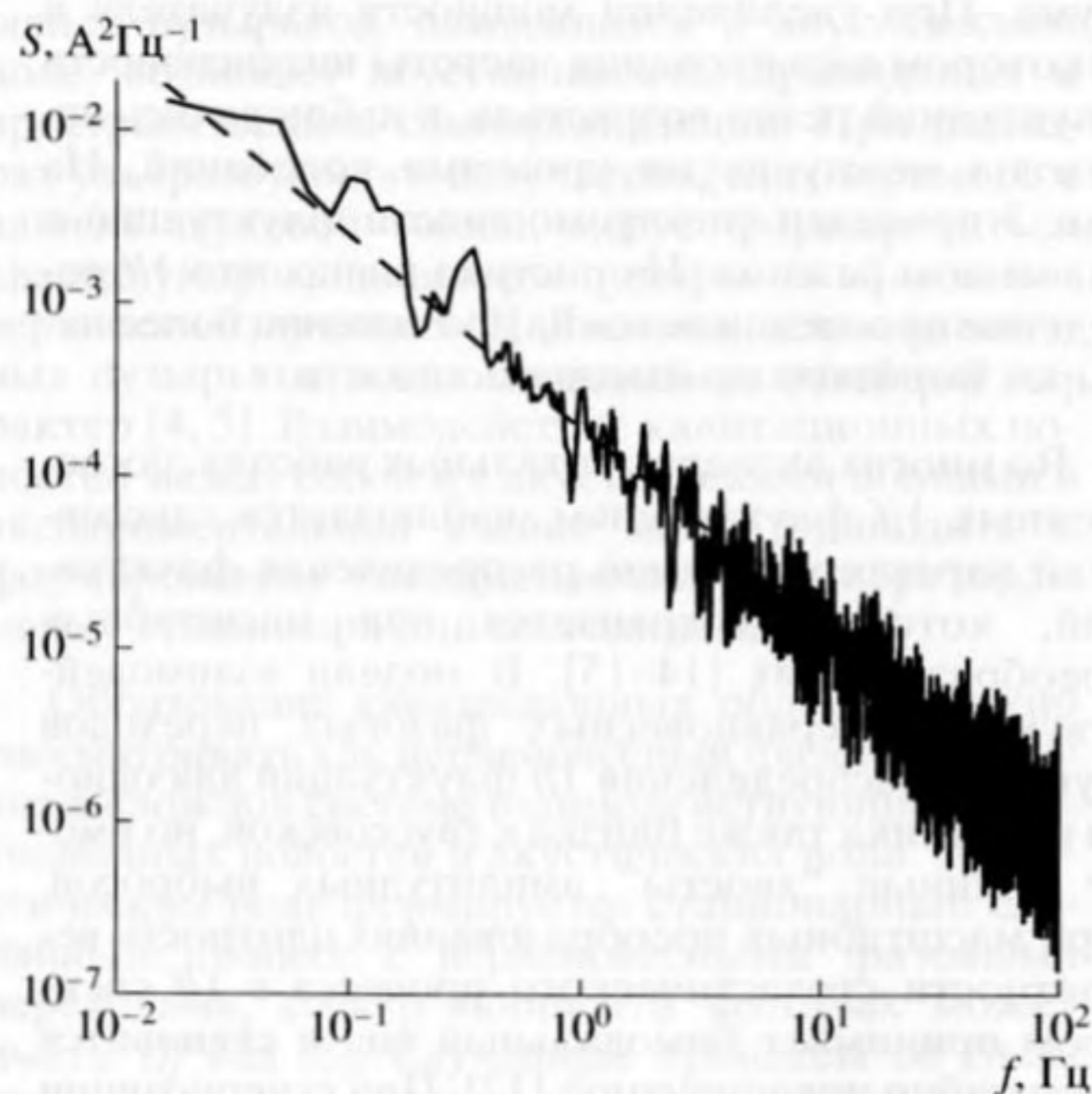


Рис. 3. Спектр мощности флуктуаций фототока при акустической кавитации воды. Штриховая линия – зависимость  $\propto 1/f$ .

емые реализации часто имеют гауссовское распределение. Отличие от нормального распределения может проявиться при локальном зондировании и при проведении масштабных преобразований. Масштабные преобразования функций распределения экспериментально измеренных флуктуаций при неравновесных фазовых переходах различной природы представляют большой интерес с точки зрения возможности выделения единичного источника  $1/f$  и понимания механизмов формирования  $1/f$  спектра.

На рис. 4 (1) приведена экспериментальная реализация, а на рис. 5 (1) функция распределения флуктуаций. При масштабных преобразованиях отчетливо проявлялся бимодальный характер функции распределения флуктуаций. Огрубленные реализации создавались из экспериментально измеренных с помощью усреднения по некоторому масштабу времени  $\tau$  в соответствии с формулой:

$$y_j^{(\tau)} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=\tau j}^{\tau(j+1)-1} x_i, \quad 0 \leq j \leq N/\tau,$$

где в качестве стохастической переменной  $x_i$  выступала интенсивность фототока. Последовательность огрубленных реализаций при различных значениях  $\tau$  и соответствующие функции распределения приведены на рис. 4 (2–4) и на рис. 5 (2–4). Из рисунков видно, что с ростом коэффициента масштабных преобразований огрублен-

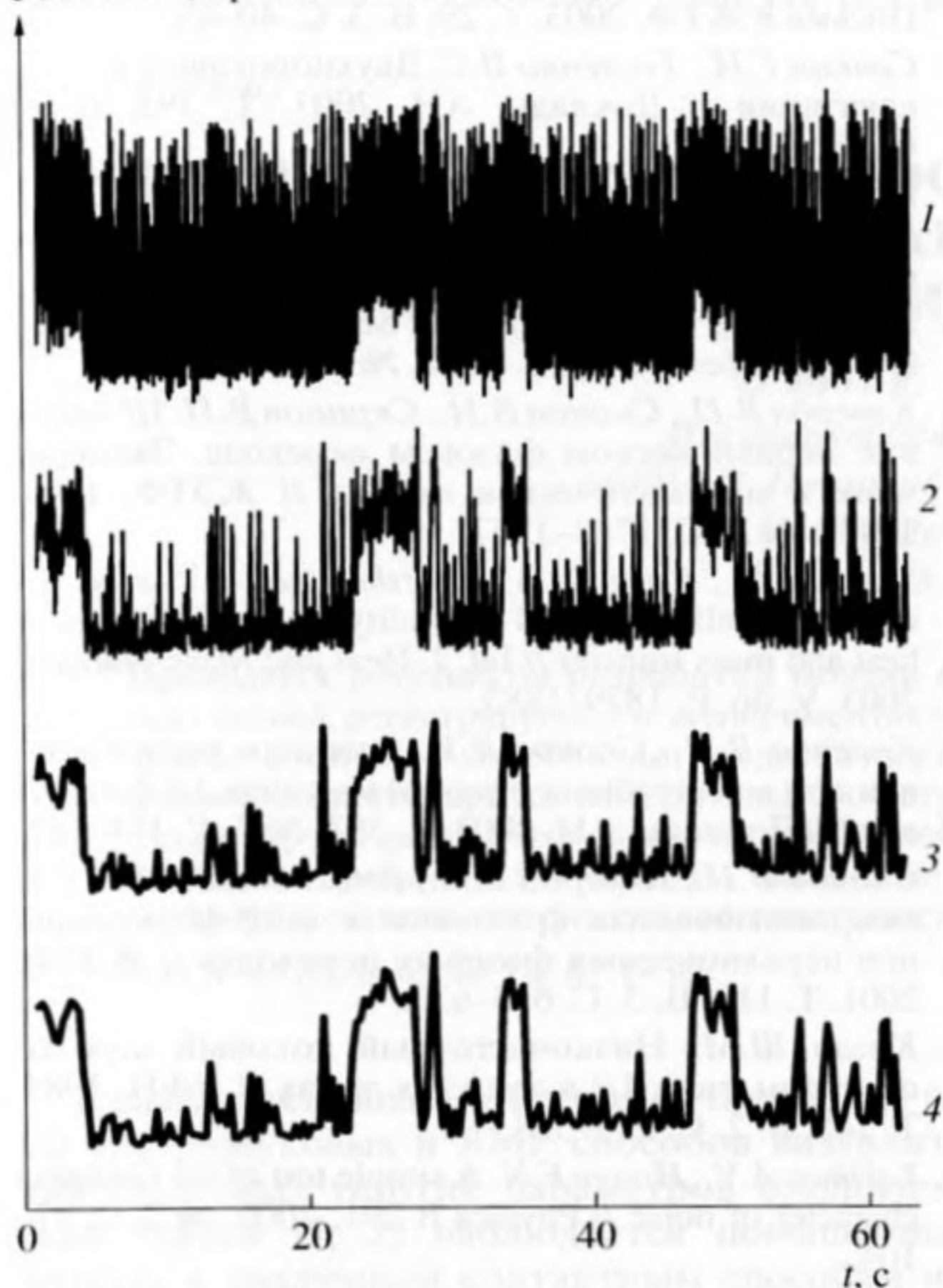
Фототок  $x$ , произвольные единицы

Рис. 4. Исходная (1) и огрубленные (2–4) экспериментальные реализации флуктуаций фототока при акустической кавитации воды при коэффициенте масштабного преобразования  $\tau$ : 1 – 1, 2 – 30, 3 – 100, 4 – 200.

ные реализации и их функции распределения становятся одинаковыми (перестают зависеть от  $\tau$ ). Иными словами, распределение флуктуаций становится масштабно-инвариантным. Следует отметить, что само по себе наличие коротковолновых высокоамплитудных выбросов не оказывает влияния на масштабную инвариантность и  $1/f$  поведение спектров мощности, т.к. с ними связана очень малая энергия. Для того чтобы пронаблюдать большее количество источников, использовалось увеличение размера зондируемой области с помощью рассеивающей и собирающей линз (так, чтобы интегральная интенсивность луча сохранялась). В этом случае наблюдалось уменьшение амплитуды флуктуаций при сохранении  $1/f$  поведения спектра. Бимодальный характер функции распределения при увеличении площади сечения лазерного луча был выражен значительно слабее. Это связано с тем, что с увеличением диаметра луча в него попадают несколько единичных источников  $1/f$  флуктуаций.

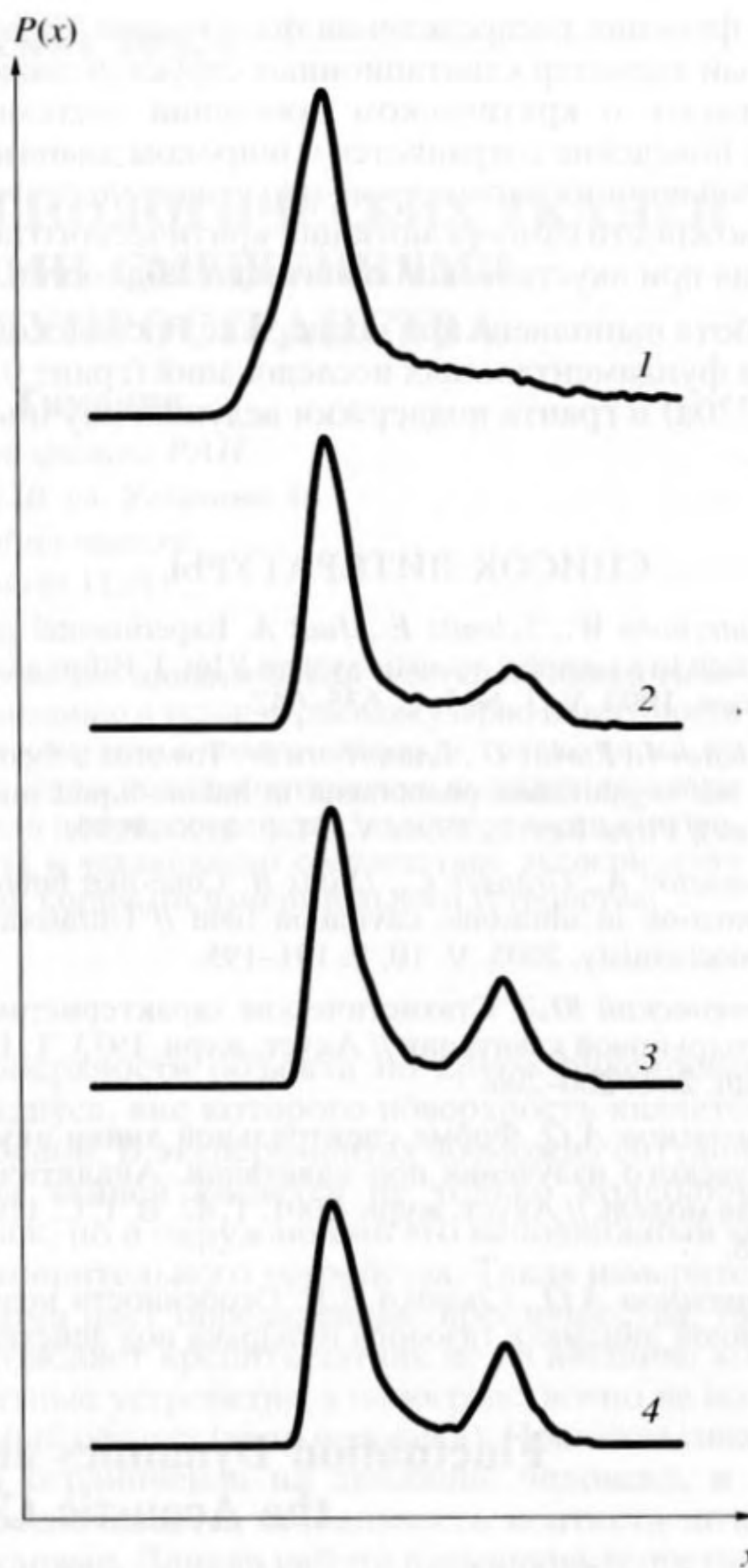


Рис. 5. Функции распределения флуктуаций фототока при акустической кавитации воды при коэффициенте масштабного преобразования  $\tau$ : 1 – 1, 2 – 30, 3 – 100, 4 – 200.

Следует заметить, что поведение функции распределения при неравновесных фазовых переходах отличается от поведения функции распределения турбулентных пульсаций, при которых огрубление реализаций приводит к гауссовскому характеру распределения (см., например, [16]).

Таким образом, акустическая кавитация жидкостей сопровождается образованием различных пространственных структур, низкочастотной расходимостью спектров мощности. Функция распределения флуктуаций при огрублении реализаций проявляет масштабно-инвариантные свойства. Обратная пропорциональная зависимость спектров мощности от частоты, масштабная инвариант-

ность функций распределения флуктуаций, фрактальный характер кавитационных структур свидетельствуют о критическом поведении системы. Такое поведение сохраняется в широком диапазоне управляющих параметров, что свидетельствует о возможности самоорганизации критического поведения при акустической кавитации жидкостей.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 05-08-01320а) и гранта поддержки ведущих научных школ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lauterborn W., Schmitz E., Judt A.* Experimental approach to a complex acoustic system // *Int. J. Bifurcation Chaos*. 1993. V. 3. № 3. С. 635–642.
2. *Akhatov I., Parlitz U., Lauterborn W.* Towards a theory of self-organization phenomena in bubble-liquid mixtures // *Phys. Rev. E*. 1996. V. 54. P. 4990–4999.
3. *Mousatov A., Granger C., Dubis B.* Cone-like bubble formation in ultrasonic cavitation field // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2003. V. 10. P. 191–195.
4. *Левковский Ю.Л.* Статистические характеристики пузырьковой кавитации // *Акуст. журн.* 1973. Т. 19. Вып. 2. С. 200–206.
5. *Максимов А.О.* Форма спектральной линии акустического излучения при кавитации. Аналитическая модель // *Акуст. журн.* 2001. Т. 47. В. 1. С. 110–118.
6. *Максимов А.О., Соседко Е.В.* Особенности нелинейной динамики газового пузырька под действием резонансного и шумового акустических полей // *Письма в ЖТФ*. 2003. Т. 29. В. 3. С. 40–45.
7. *Санкин Г.Н., Тесленко В.С.* Двухпороговый режим кавитации // *Доклады АН*. 2003. Т. 393. В. 6. С. 762–765.
8. *Коверда В.П., Скоков В.Н., Решетников А.В., Виноградов А.В.*  $1/f$  спектр при акустической кавитации // *Письма в ЖТФ*. 2004. Т. 30. В. 22. С. 31–36.
9. *Bak P., Tang C., Wiesenfeld K.* Self-organized criticality // *Phys. Rev. A*. 1988. V. 38. № 1. P. 364–374.
10. *Коверда В.П., Скоков В.Н., Скрипов В.П.*  $1/f$ -шум при неравновесном фазовом переходе. Эксперимент и математическая модель // *ЖЭТФ*. 1998. Т. 113. № 5. С. 1748–1757.
11. *Skokov V.N., Koverda A.V., Reshetnikov A.V. et al.*  $1/f$  noise and self-organized criticality in crisis regimes of heat and mass transfer // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2003. V. 46. P. 1879–1883.
12. *Коверда В.П., Скоков В.Н.* Функции распределения при масштабных преобразованиях  $1/f$  флуктуаций // *Доклады АН*. 2003. Т. 393. № 2. С. 184–187.
13. *Скоков В.Н., Коверда В.П., Решетников А.В.* Самоорганизованная критичность в  $1/f$ -флуктуации при неравновесных фазовых переходах // *ЖЭТФ*. 2001. Т. 119. В. 3. С. 613–620.
14. *Коган Ш.М.* Низкочастотный токовый шум со спектром типа  $1/f$  в твердых телах // *УФН*. 1985. Т. 145. В. 2. С. 285–328.
15. *Yakimov A.V., Hooge F.N.* A simple test of the Gaussian character of noise // *Physica B* 291. 2000. № 2. С. 97–104.
16. *Carbone V., Cavazzana R., Antoni V. et al.* To what extent can dynamical models describe features of turbulent flows? // *Europhysics Lett*. 2002. V. 58. P. 349–355.

## Fluctuation Dynamics and $1/f$ Spectra Characterizing the Acoustic Cavitation of Liquids

V. N Skokov, A. V. Reshetnikov, A. V. Vinogradov, and V. P. Koverda

*Institute of Thermal Physics, Ural Division, Russian Academy of Sciences,  
ul. Pervomaïskaya 91, Yekaterinburg, 620219 Russia  
e-mail: vnskokov@itp.uran.ru*

**Abstract**—The dynamics of acoustic cavitation in water and glycerin is studied experimentally. The power spectra and distribution functions of fluctuations are determined. In transient regimes, bubble structures in the form of fractal clusters are formed near the ultrasonic radiator. The power spectra have the  $1/f$  form, and the distribution functions of local fluctuations differ from the Gaussian ones and exhibit the scale invariance property of.