Стратегия жизни в условиях планетарного экологического кризиса, т. 2, гл. 3.
© А.Г.Пархомов

ФЛИККЕР-ШУМ КАК ПРОЦЕСС, ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ К СЛАБЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

А.Г.Пархомов

Экспериментально установлено, что характер флуктуаций в целом ряде систем может сильно изменяться при весьма слабых воздействиях и даже без видимых причин. Это явление наблюдалось в полупроводниковых устройствах [1,5,6,10,11], в электродных системах [7,14], в различных физико-химических и биологических системах [1,4,5,7,9,14,15]. На первый взгляд, изменение характера флуктуаций (шума) при разнообразных слабых воздействиях выглядит странным, так как обычно шум представляется чем-то вроде совершенно неуправляемого хаотического теплового движения молекул и поэтому на него может повлиять разве что изменение температуры.

Такое суждение справедливо только по отношению к так называемому *белому шуму*. Но в природе широко распространен и принципиально другой вид шума - фликкер-шум (другие названия: *1/f*-шум, избыточный шум, макрофлуктуации) [2,3,6,8,12]. Закономерности белого шума просты - они определяются *статистикой независимых одиночных событий* (например, ударов капель дождя или прохождений носителей заряда). Фликкер-шум - явление значительно более сложное: это *флуктуации параметров, характеризующих ход процессов* в некоторой системе. Например, свойствами фликкер-шума обладает интенсивность осадков - одного из проявлений процессов, происходящих в сложнейшей системе, составными частями которой являются Солнце, атмосфера и гидросфера Земли, рельеф местности и многое другое. Другой пример фликкер-шума – электрические флуктуации в полупроводниках на низких частотах, связанные со сложными процессами взаимодействия носителей заряда с различными дефектами кристаллов.

Характерная особенность фликкер-шума отражена в одном из его названий: спектральная плотность его мощности возрастает с понижением частоты f по закону, близкому к $1/f$, в отличие от белого шума, у которого спектральная плотность от частоты не зависит. Отсюда следует, что фликкер-шум преобладает над белым шумом на достаточно низких частотах. В полупроводниковых приборах, например, преобладание фликкер-шума наблюдается на частотах ниже 1000 *Гц*.

В природе имеется множество очень разных процессов, спектр флуктуаций параметров которых близок к виду *1/f*. Это характерно и для шума различных электронных приборов в области низких и инфранизких частот [3,8,10,11], и для землетрясений [1,16], и для гроз, и для изменений уровня рек, и для ряда проявлений солнечной активности [3,9]. Флуктуируют по закону *1/f* многие параметры, характеризующие ход процессов в физико-химических системах и живых

организмах [1,3,9]. Свойствами фликкер-шума обладают изменения числа особей в популяциях и социальная активность в человеческом сообществе [1,9,14]

Закон *1/f*, в сущности, означает, что в данной системе частота, с которой происходит какое-либо событие, обратно пропорциональна энерговыделению при этом событии. Например, толчков землетрясений с энерговыделением от $1{,}8 \cdot 10^{15}$ *Дж* до $8 \cdot 10^{15}$ *Дж* происходит в среднем 14,9 в год, а с энерговыделением от $1{,}0 \cdot 10^{16}$ Дж до $4{,}4 \cdot 10^{16}$ *Дж* - 3,1 в год [16].

Цель этой работы - показать почему для процессов самой разной природы характерны флуктуации типа фликкер-шума, объяснить неоднозначную реакцию таких процессов на внешние воздействия, в том числе на очень слабые, и обозначить основные свойства этого явления.

1. Сложность и многообразие процессов в системах как источник фликкер шума

Чтобы понять причину схожести характера флуктуаций в столь разных объектах, надо выяснить, что же их объединяет. Это, прежде всего, *сложность* систем, т.е. многочисленность неодинаковых элементов, из которых они состоят, и множество разнообразных связей между этими элементами. Многие из них (активные элементы) способны накапливать энергию (вещество, носители заряда, напряженность взаимосвязей и т.п.) и высвобождать накопленное при достижении некоторого порога. Наглядная модель такой системы: большое число пластин, имеющих разный наклон к горизонту, на которые падает снег. В зависимости от угла наклона частота сползаний накапливающегося на пластинах снега меняется в очень широких пределах, причем масса сползающего снега тем больше, чем меньше частота сползаний (приблизительно так происходит накопление снега и образование снежных лавин в горах). Шорох падающего на пластины снега подобен белому шуму, звук сползающего с пластин снега подобен фликкер-шуму.

2. Причина высокой чувствительности фликкер-шума к внешним воздействиям

Нетрудно понять, что рассмотренные системы могут обладать высокой чувствительностью к слабым воздействиям. В них часть элементов находится в предпороговом состоянии, когда достаточно небольшого толчка, чтобы накопленная энергия высвободилась. Когда этот толчек происходит, все предпороговые элементы системы сбрасывают свою энергию одномоментно, и энерговыделение в системе многократно превосходит обычное. Усиленное энерговыделение может стимулировать сброс энергии у элементов, более удаленных от порога, что лавинообразно увеличивает величину эффекта.

Это происходит, если система до воздействия смогла "наполнить" свои резервуары, т.е. достаточно долго была без ощутимых внешних воздействий. При наличии же внешних достаточно сильных и частых воздействий сброс энергии элементами происходит далеко от порога, и коллективное высвобождение энергии не происходит. Это и объясняет парадоксальное свойство таких систем: сильный отклик на слабые и редкие воздействия и малозаметный отклик на сильные

и частые воздействия.

В полупроводниковых приборах активными элементами являются дефекты кристаллической структуры, которые, в основном, находятся вблизи поверхности кристаллов. Наибольшее влияние поверхностные явления оказывают на работу сплавных биполярных и МОП-полевых транзисторов, а также приборов из поликристаллических полупроводников (фото- и терморезисторов). Эксперименты показывают, что именно такие полупроводниковые приборы генерируют наиболее сильный фликкер-шум, в изменениях интенсивности которого отчетливо прослеживаются космические ритмы и воздействия необычной природы [1,5,10,11].

Живые организмы - это системы с огромным числом активных элементов. Такими элементами являются не только клетки, но и многие субклеточные образования. Следовательно, высокая чувствительность живых организмов к внешним воздействиям - неизбежное их свойство.

Отметим, что под "энергией" подразумевается *все, что способно накапливаться и высвобождаться*. Это и носители заряда, захватываемые дефектами кристаллической решетки в полупроводниках, и снег на горных склонах, порождающий лавины, и изменения в литосфере, приводящие к землетрясениям, и многое другое. Накапливаться может и социальная напряженность. Рассмотрение человеческого сообщества как системы с множеством накопителей социальной напряженности позволяет понять некоторые парадоксы в социуме, например, почему мощная держава может разрушиться от слабого толчка (она долго была изолирована от внешних воздействий), а слабая власть, свергнуть которую стремятся многие, может существовать много лет (часто происходящие “встряски” не позволяют большинству элементов общества накапливать околопороговые напряжения, что делает невозможным их одномоментное широкомасштабное высвобождение).

Процессы в реальных системах, в которых возникает фликкер-шум (названные в работе [2] “самоорганизованной критичностью”) очень сложны и разнообразны: в них проявляются нелинейность, многочисленность состояний, взаимодействие элементов, возникают цепные и лавинные процессы. Явления, происходящие в неравновесных системах (возникновение упорядоченных структур, колебательные процессы, процессы типа "хищник-жертва" и т.д.), изучает неравновесная термодинамика [13,14]. Математическое описание этих явлений чрезвычайно сложно и специфично для каждой из такого рода систем. Но некоторые общие черты систем с накоплением и пороговым высвобождением энергии можно уяснить из простой модели [12].

3. Простая математическая модель фликкер-шума

Рассмотрим систему, состоящую из N элементов, каждый из которых накапливает энергию и высвобождает ее с частотой f_i после достижения некоторого порога. Значения f_i лежат в пределах от f_1 до f_N . Энергию разряда *i-го* элемента обозначим E_i . Пусть скорость накопления

энергии у всех элементов одинакова, тогда $E_i = a/f_i$, где a - константа. Разряды происходят независимо, интервалы между ними случайны, энерговыделение обратно пропорционально частоте событий: система генерирует фликкер-шум.

Элементы этой системы находятся во "взведенном", неравновесном состоянии, причем некоторая часть их находится на подходе к критической точке, после достижения которой происходит "разряд". Для этих элементов достаточно очень слабого толчка, чтобы разряд произошел преждевременно. "Стимулированные" разряды имеют почти такие же параметры, как и разряды "самопроизвольные", и выделить каждый из них на общем фоне практически невозможно. Однако, если толчек испытывает *вся* система, на него одновременно откликнется *много* элементов, находящихся на подходе к критической точке, и в короткое время в системе произойдет выделение энергии, значительно превосходящее обычное.

Оценим, при каких условиях суммарный стимулированный импульс можно выделить на фоне обычных флуктуаций. Обозначим через δ долю периода T цикла накопление-разряд, когда *i-й* элемент достаточно чувствителен, чтобы разрядиться под действием некоторого внешнего воздействия. Чем меньше величина δ, тем на более слабые воздействия способен отреагировать элемент. Всего в результате воздействия разрядится δN элементов, в которых, в среднем, выделяется энергия

$$\overline{E} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{a}{f_i} = \frac{a}{f_N - f_1}\ln\frac{f_N}{f_1} \qquad (1)$$

Суммарная энергия стимулированного импульса:

$$E_{st} = \delta N\overline{E} = \frac{\delta N a}{f_N - f_1}\ln\frac{f_N}{f_1} \qquad (2)$$

Пусть к системе подключено регистрирующее устройство, отклик которого пропорционален энергии разряда: $U_i = kE_i$. Откликом регистратора на стимулированный импульс будет, в соответствии с (1) и (2),

$$U_{st} = kE_{st} = \frac{k\delta N a}{f_N - f_1}\ln\frac{f_N}{f_1} \qquad (3)$$

Наряду со стимулированными импульсами будут регистрироваться и самопроизвольные разряды, отклик на которые U_{sam} лежит в пределах от ka/f_N до ka/f_1. Так как величина f_1 может быть малой, амплитуда некоторых самопроизвольных импульсов может быть значительной. Для надежного выделения стимулированных импульсов на фоне самопроизвольных необходимо выполнение условия

$$\frac{U_{st}}{U_{sam}} = \frac{\delta N f_1}{f_N - f_1}\ln\frac{f_N}{f_1} >> 1 \qquad (4)$$

или

$$N \gg \frac{f_N - f_1}{\delta f_1 \ln(f_N / f_1)} \qquad (5)$$

Оценим величину N, считая δ=0,01 и f_N=1000 *Гц* (примерная частота, ниже которой фликкер-шум преобладает над белым шумом в полупроводниковых приборах). Величина f_1 , как показывают эксперименты, ~10^{-7} *Гц* [3,4,8]. Подставив эти значения в (5), получим $N >> 4 \cdot 10^{10}$. Если продолжительность опыта не очень большая (обычно не более 1000 секунд), вероятность появления импульсов, соответствующих $f \sim 10^{-5}$ *Гц* и менее, невелика. Положив $f_1 = 10^{-5}$ *Гц*, получим $N >> 5 \cdot 10^{8}$.

Таким образом, рассмотрение даже простейшей системы независимых "накопителей" энергии, показывает, что *она является генератором фликкер-шума*. Необходимым условием для того, чтобы такая система имела высокую чувствительность к внешним воздействиям, является *достаточно большое число активных элементов.*

4. Фликкер-шум как универсальный детектор слабых воздействий

Зная свойства систем, генерирующих фликкер-шум, можно понять сложный и неоднозначный характер их отклика на внешние воздействия, а также условия, при которых подобные устройства дают результаты, поддающиеся анализу. Это позволяет использовать такие системы качестве своеобразного детектора слабых воздействий, если их тщательно изолировать от посторонних воздействий. До начала исследуемых воздействий должно пройти время, достаточное для угасания переходных процессов и для записи "фонового" шумового сигнала. Сами воздействия должны быть кратковременными, интервал между ними должен быть достаточным для угасания последействия. Эксперименты с использованием таких детекторов подтвердили возможность их применения для регистрации разнообразных слабых воздействий [1,5,10,11].

Итак, системы с множеством накапливающих энергию элементов обладают следующими свойствами:

- зависимостью величины эффекта от частоты их повторения типа *1/f*: "слабые" события происходят часто, а "сильные" - редко;

- высокой чувствительностью к внешним воздействиям при условии, что таких воздействий перед этим не было достаточно долго. Геофизические и космические воздействия - редкие и слабые, и неудивительно, что они проявляются в таких системах, если они достаточно хорошо защищены от иных воздействий;

- последействием: продолжительность *отклика* на внешнее воздействие может превышать продолжительность воздействия, после чего наступает "затишье" с пониженным уровнем флуктуаций и пониженной чувствительностью к воздействиям. В это время происходит заполнение опустошенных резервуаров;

-"обратной" зависимостью *силы отклика* на повторяющиеся воздействия от *силы*

воздействия. Чем сильнее воздействие, тем продолжительнее "затишье", поэтому *повторные* сильные воздействия могут вызвать сильную ответную реакцию только после достаточно продолжительной паузы. Если период повторения сильных воздействий меньше необходимой паузы, отклик на сильные воздействия может быть слабее, чем отклик системы на повторяющиеся с той же периодичностью более слабые воздействия;

- неодинаковостью отклика одинаково устроенных систем на одинаковые воздействия. Это свойство фликкер-шума связано с различными предысториями систем, в которых он возникает, и возможностью реализации различных направлений процессов в сложных системах.

Вышеописанный подход позволяет в общих чертах объяснить все особенности отклика сложных систем на слабые внешние воздействия. Но *детальный* анализ процессов, происходящих в *конкретной* системе, позволяющий делать достоверные прогнозы, очень труден из-за сложности систем и неразработанности неравновесной термодинамики.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов.* Том 2. М.: Научный мир, 1998. -430 с.
2. Бак П., Чен К. Самоорганизованная критичность // В мире науки. 1991. №3. С. 16-24
3. Букингем М. Шумы в электронных приборах и системах. Пер. с англ. - М.: Мир, 1986.- 399 с.
4. Гуртовой Г.К., Казначеев В.П. и др. Метод биоиндикации в экологических взаимосвязях// Бюл. сибирского отделения АМН СССР. 1988. Т.4. С.3-18
5. Гуртовой Г.К., Пархомов А.Г. Экспериментальные исследования дистанционного воздействия на физические и биологические системы// Парапсихология и психофизика. 1992. 4(6). С. 31-51
6. Денда В. Шум как источник информации. Пер. с нем. - М.: Мир, 1993. -192 с.
7. Информационные взаимодействия в биологии. Материалы Всесоюзных семинаров. Кара-Даг, ноябрь 1986, октябрь 1988. Тбилиси, 1987, 116 с.; Тбилиси, 1990, 194 с.
8. Коган Ш.М. Низкочастотный токовый шум со спектром типа *1/f* в твердых телах// УФН. 1985. Т.145. В.2. С.285-328
9. Корреляции биологических, и физико-химических процессов с солнечной активностью и другими факторами окружающей среды. Тезисы докладов международных симпозиумов. Пущино, 1993. -262 с. Пущино, 1996. -176 с.
10. Пархомов А.Г. Экспериментальные исследования инфранизкочастототных флуктуаций в полупроводниках. Закономерности. Космические ритмы. -М.: МНТЦ ВЕНТ, 1991. 24 с.
11. Пархомов А.Г.. Инфранизкочастотные флуктуации в полупроводниках. В этой книге, Т.2, гл.3
12. Пархомов А.Г. Низкочастотный шум - универсальный детектор слабых воздействий. *В сб.: Исследования проблем энергоинформационного обмена в Природе. СНИО СССР*, 1989, т.1, часть 1, с.81-87

13. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. Пер. с англ. - М.: Прогресс, 1986. 432 с.
14. Современные проблемы изучения и сохранения биосферы. Ред. Красногорская С.-Пб.: Гидрометеоиздат, 1992. Т.1, 288 с., Т.2, 440 с.
15. Удальцова Н.В., Коломбет В.А. Шноль С.Е. Возможная космофизическая обусловленность макроскопических флуктуаций в процессах разной природы. -Пущино: ОНТИ НЦТИ АН СССР, 1987. 96 с.
16. Эйби Дж. Землетрясения.- Пер. с англ. М.: Недра, 1982. С.249