

АНАЛИЗ ФРАКТАЛЬНЫХ РАЗМЕРНОСТЕЙ БАКТЕРИАЛЬНЫХ КОЛОНИЙ И ПАТОЛОГИЧЕСКИ ИЗМЕНЕННЫХ БИОТКАНЕЙ

© 2010 А.С. Ульянов

Саратовский государственный университет

Поступила в редакцию 11.01.2010

В работе представлены результаты компьютерного моделирования процессов рассеяния лазерного излучения на биологических объектах, обладающих фрактальными свойствами. Проведено сравнение данных, полученных в результате моделирования, с данными, полученными в ходе эксперимента. При экспериментальном изучении были использованы бактериальные колонии *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* и гистологические срезы тканей различными образованиями.

Ключевые слова: фрактальная размерность, ковер Серпинского, биофрактал, фрактальные спеклы

1. ВВЕДЕНИЕ

Как известно, в биомедицинской оптике спекл-поля широко используются в оптической диагностике биотканей [1]. При этом следует отметить, что в большинстве случаев флуктуации развитых спекл-полей подчиняются гауссовому распределению [2]. Однако иногда статистика спеклов может отличаться от гауссовой.

В биологии, медицине и биофизике анализ фрактальной размерности спекл-структур нашел достаточно широкое применение. Как показано в работах [3-5], если объект обладает фрактальными свойствами, то спекл-структуры, образованные при рассеянии света на этих объектах, тоже могут обладать фрактальными свойствами. Существует ряд работ, посвященных исследованию специфического класса, так называемых, “фрактальных спеклов” (см. [6] и библиографию к ней).

Целью данной работы является:

- теоретическое изучение свойств “фрактальных спеклов” в зависимости от характеристик фрактальной структуры (глубины фрактала, его геометрических размеров) на примере ковра Серпинского,

- изучение фрактальных свойств спекл-полей, полученных при облучении гистологических срезов тканей с доброкачественными и злокачественными образованиями.

- экспериментальное изучение свойств спекл-полей, образующихся в результате облучения бактериальных колоний *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* лазерным светом.

2. КОВЕР СЕРПИНСКОГО

Наиболее известным модельным детерминированным фракталом является ковер Серпинского. На рис. 1а – рис. 1г представлена топология ковра Серпинского с различной глубиной фрактальной структуры. Использование именно этой фрактальной структуры при изучении фрактальных свойств спекл-полей было обусловлено несколькими причинами. Одной из них является простота аналитического задания такой структуры. Не менее важным является легкость изменения глубины фрактальной структуры рассеивающего объекта.

3. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе эксперимента использовался He-Ne лазер ГН-5П мощностью 1мВт и длиной волны 633 нм. Коллимированный гауссов пучок диаметром порядка 1 см направлялся на исследуемый образец с помощью зеркала (ME05-M01, Gold, Thorlab, США). Регистрация спекл-структур проводилась с использованием монохромной цифровой CMOS камеры Phoениcs USB Digital camera 1298-M (MuTech, США) с разрешением 1024×1024 пикселей установленной на расстоянии 14 см от рассеивающего объекта. Размер пикселей камеры составлял 5.2 мкм [7].

Обсудим теперь результаты экспериментальных исследований процессов рассеяния света бактериальными колониями.

На рис. 2а, рис. 2б приведены теоретически рассчитанные дифракционные картины, соответствующие структурам, изображенным на рис. 1а, рис. 1б. На рис. 2в, рис. 2г представлены зависимости, определяющие фрактальную раз-

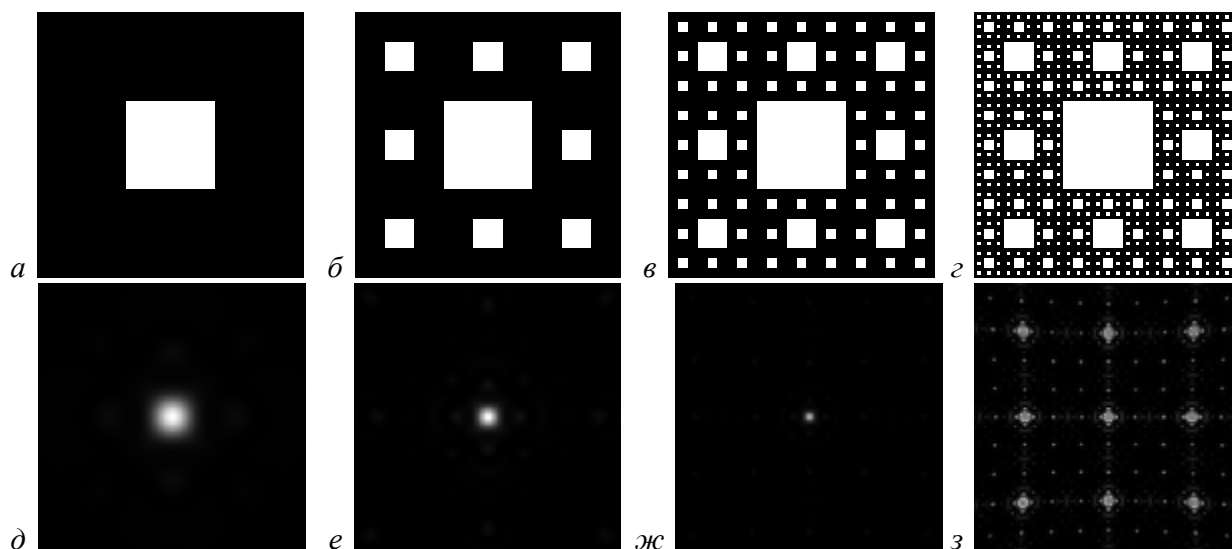


Рис. 1. Изображение топологии фрактальной структуры “ковер Серпинского” с различным числом итераций: а – одна, б – две, в – три, г – четыре; дифракционные картины, сформированные при облучении фрактальной структуры различного поперечного размера: д – 10мкм, е – 20мкм, ж – 40мкм, з – 80мкм

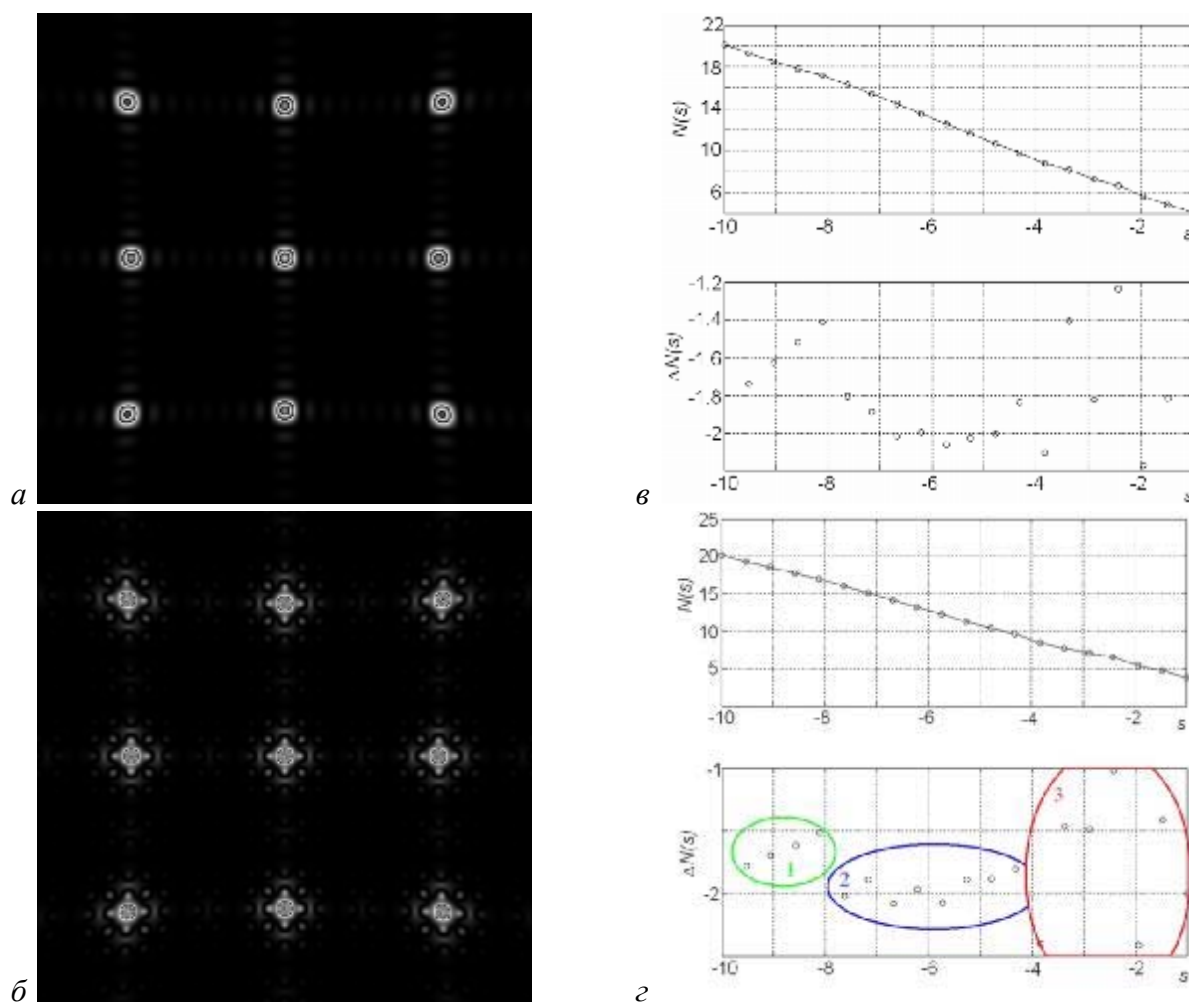


Рис. 2. Дифракционные картины и соответствующие им зависимости, определяющие фрактальную размерность. Отмечены области, соответствующие различным режимам образования фрактальных структур: в областях №1 и №2 наблюдается образование фрактальной структуры, в области №3 образование фрактальной структуры не происходит

мерность полученной дифракционной картины. На указанных рисунках по оси абсцисс отложена величина s , равная \log_2 от размера покрывающих ячеек. По оси ординат на верхних графиках отложена функция $N(s)$, равная от количества покрывающих ячеек, на нижних – приращение функции $\Delta N(s)$. Как видно из графика функции $N(s)$, величина фрактальной размерности превышает 2, что говорит об отсутствии фрактальной структуры. Однако, важно подчеркнуть, что на приведенных графиках функции $N(s)$ можно выделить три характерные области (они показаны на рис. 2е).

Проанализируем поведение графика функции $N(s)$ в каждой из упомянутых областей. В области №1 точки графика функции $\Delta N(s)$ принадлежат прямой, тангенс угла наклона которой стремится к нулю при увеличении числа итераций фрактальной структуры. Иными словами, горизонтально расположенная прямая на графике функции $\Delta N(s)$ означает появление линейного участка на графике функции $N(s)$, что соот-

ветствует наличию фрактальной структуры.

Проведем кривую, аппроксимирующую точки, принадлежащие области №2. При малом числе итераций рассеивающей фрактальной структуры, форма этой кривой близка к параболе. Однако, с увеличением числа итераций вид кривой изменяется. В пределе график функции $\Delta N(s)$ стремится к горизонтально расположенной прямой. Это указывает на то, что в области №2 также начинают проявляться фрактальные свойства.

С увеличением числа итераций фрактальной структуры, точки, принадлежащие области №3, изменяют свое местоположение, но тем не менее фрактальные свойства рассеивающего объекта в этой области не проявляются.

Обсудим теперь результаты проведенных экспериментов. Спекл-поля, образовавшиеся при облучении сфокусированным световым пучком бактериальных колоний *Staphylococcus aureus* и *Escherichia coli* представлены на рис. 3.

Рассмотрим поведение графика функции $N(s)$ соответствующей спекл-полю, образо-

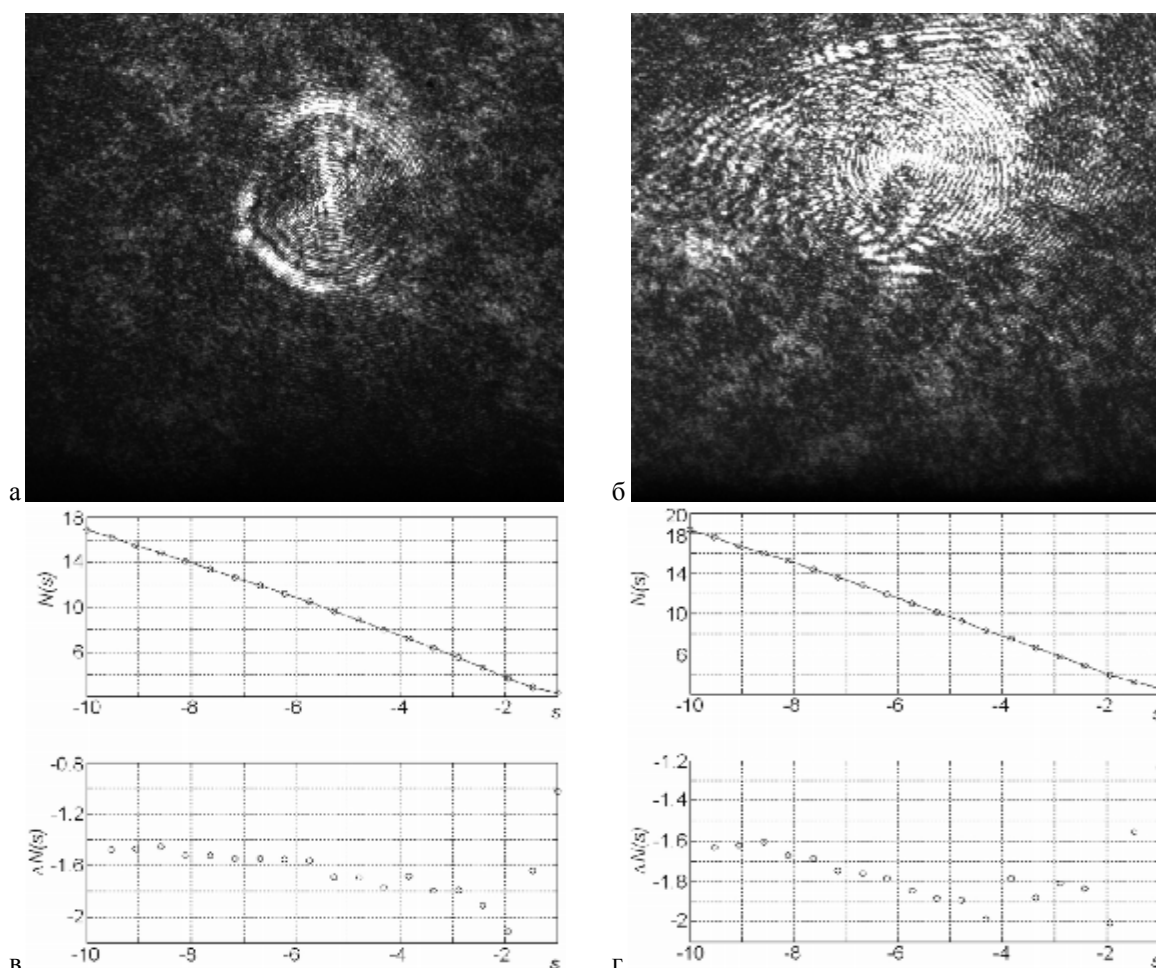


Рис. 3. Спекл-структура, формирующаяся при облучении сфокусированным световым пучком бактериальных колоний:
 а – *Staphylococcus aureus*, б – *Escherichia coli*;
 Зависимость, определяющая фрактальную размерность спекл-поля, образовавшегося при облучении колоний:
 в – *Staphylococcus aureus*, г – *Escherichia coli*

вавшемся при облучении бактериальных колоний *Staphylococcus aureus* (см. рис. 3в). Видно наличие линейного тренда в зависимости $N(s)$ в диапазоне величин s принадлежащих интервалу $[-8; -6]$. Теперь рассмотрим поведение графика функции $N(s)$ соответствующей спекл-полю,

образовавшемуся при облучении бактериальных колоний *Escherichia coli* сфокусированным световым пучком (см. рис. 3г). Как видно, на указанном графике линейный участок отсутствует.

Можно считать, что данные теоретического моделирования находятся в достаточно хорошем соответствии с результатами экспериментов. Область наблюдения фрактальных структур в реальных спекл-полях совпадает с областями, выявленных при компьютерном моделировании.

Проведем анализ графиков зависимостей, определяющих фрактальные размерности (рис. 4а. и рис. 4в.) спекл-структур, полученных при облучении гистологических срезов тканей с различными образованиями. Методика проведения эксперимента [7] и анализа фрактальной структуры спекл-полей аналогична случаю облучения бактериальных колоний. Линейный участок на рис. 5а и рис. 5в соответствует размерам покрывающих ячеек, при котором наблюдается фрактальная структура. Как показывают результаты экспериментальных исследований [7], наблюдаются два режима поведения фрактальной размерности: плавное увеличение приращения и увеличение резким скачком. Плавное увеличение соответствует тканям со злокачественными образованиями, а скачкооб-

разный переход является признаком доброкачественных образований в тканях.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описаны данные, полученные при компьютерном моделировании дифракционных картин, образующихся при облучении лазерным светом объектов, обладающих фрактальной структурой. Также представлены результаты анализа фрактальных размерностей экспериментально полученных спекл-структур, образующихся при облучении лазерным светом гистологических срезов тканей с доброкачественными и злокачественными образованиями и бактериальных колоний *Escherichia coli* и *Staphylococcus aureus*.

Экспериментально подтверждены теоретические результаты, полученные для случая облучения колоний сфокусированным лазерным пучком. Отмечены различия в поведении графиков функций определяющих фрактальную размерность спекл-полей, образующихся при облучении бактериальных колоний *Staphylococcus aureus* и *Escherichia coli*.

Аналогичным образом отмечены различия в поведении графиков функций определяющих фрактальную размерность спекл-полей, образующихся при облучении гистологических срезов тканей с доброкачественными и злокачественными образованиями.

Полученные результаты могут быть полезными с точки зрения применения метода анализа фрактальных размерностей при исследовании биотканей и бактериальных колоний.

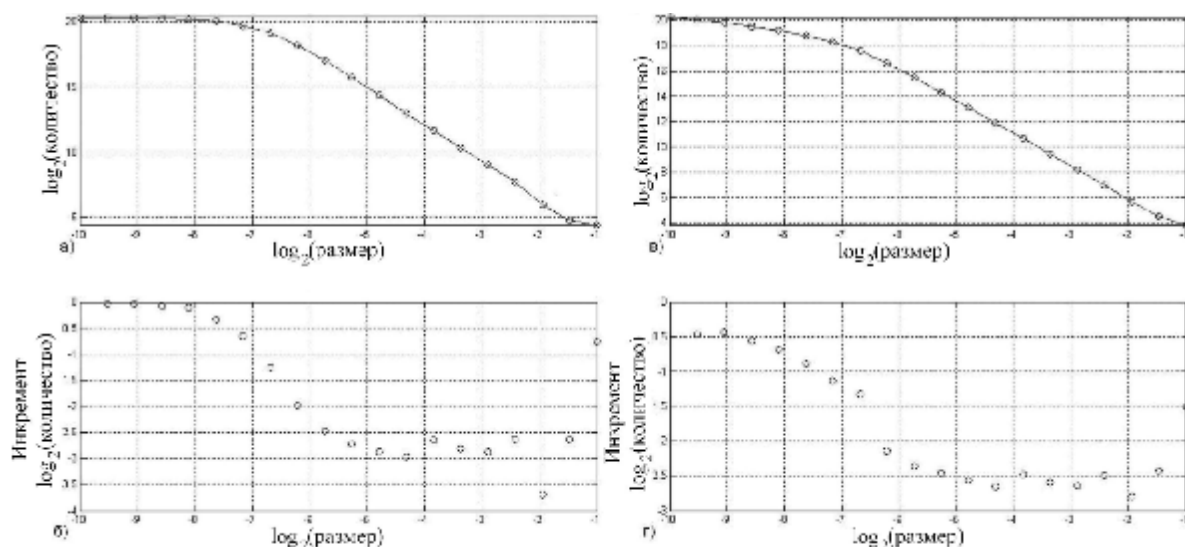


Рис. 4. а, б – графики зависимостей, определяющих фрактальную размерность, соответствующую злокачественной опухоли; в, г – графики зависимостей, определяющих фрактальную размерность, соответствующую доброкачественной опухоли

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тучин В.В. Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1998, 384 с.
2. Dainty J.C. Topics in Applied Physics, V. 9. Berlin: Springer-Verlag, 1975.
3. Ishii K., Asakura T. Correlation Properties of Light Backscattered Multiply from Fractal Aggregates of Particles Under Brownian Motion // Journal of Biomedical Optics, 1999, V.4, No.2. P. 230
4. Dogariu A., Uozumi J., Asakura T. Ballistic propagation of light through fractal gels // Waves in Random Media, 1994. No. 4, Issue 1. P. 1-6.
5. Wada N., Uozumi J., Asakura T. Effects of random noise on bispectra of fractal objects // Pure Appl. Opt., 1995, No 4, P. 857
6. Funamizu H., Uozumi J. Generation of fractal speckles by means of a spatial light modulator // Optics Express, 2007. V.15. No. 12. P. 7415
7. Ульянов А.С. Использование лазерных спеклов при идентификации патологически измененных биотканей // Квантовая электроника. 2008. Т. 38. № 6, С. 557-562.

**ANALYSYS OF FRACTAL DIMENSION OF BACTERIAL COLONIES
AND BIOTISSUES WITH PATHOLOGICAL CHANGES**

© 2010 A.S. Ulyanov

Saratov State University

Results of computer simulation of processes of dispersion of laser light in biological objects with fractal structure are described in this article. Experimental results were compared with data obtained after computer simulation. In experiments bacterial colonies *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* and histological section with tissues with different types of new growths were used in experiments.

Key words: fractal dimension, Sierpinski set, biofractals, fractal speckles