

УДК 535.8

## ФРАКТАЛЬНЫЕ СВЕТОВЫЕ СТРУКТУРЫ ДЛЯ СТИМУЛЯЦИОННОЙ ТЕРАПИИ В ОФТАЛЬМОЛОГИИ

© 2022 г. О. М. Вохник<sup>1, \*</sup>, П. В. Короленко<sup>1, 2</sup>, Р. Т. Кубанов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: vokhnik@rambler.ru

Поступила в редакцию 30.06.2022 г.

После доработки 15.07.2022 г.

Принята к публикации 22.07.2022 г.

Рассмотрены возможности применения результатов исследований в области когерентной оптики для усовершенствования методик лечения глазных патологий с использованием воздействия фрактальных световых структур на органы зрения. Разработанные алгоритмы управления световыми потоками позволяют осуществлять многопараметрическую оптимизацию лечебных процедур.

DOI: 10.31857/S0367676522110321

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в медицине для лечения различных патологий активно применяются технологии светостимуляционной терапии [1]. В офтальмологии они включают в себя светостимуляцию сложноструктурированными оптическими полями, в том числе спекловыми. В работах [2, 3] воздействие спеклового лазерного излучения с различными длинами волн обеспечило увеличение положительных результатов лечения по сравнению с традиционными методами, не использующими лазерную стимуляцию. Дальнейшим развитием светотерапии явилось использование в динамическом режиме фрактальных структур оптического излучения [4]. При этом эффективность воздействия световых потоков на сенсорную систему зрительного анализатора в значительной степени зависит от возможности целенаправленного изменения в достаточно больших пределах спектральных, статистических, пространственно-временных и скейлинговых характеристик излучения.

В настоящее время в процессе изучения фрактальных световых структур получен ряд важных результатов, обладающих как общенаучной, так и практической значимостью. Использование этих результатов в офтальмологии является актуальной задачей.

Цель данной работы состоит в применении результатов исследований в области когерентной оптики для усовершенствования методик лечения глазных патологий с использованием воздействия фрактальных световых структур на органы

зрения. В ней сделан акцент на разработку специализированных алгоритмов управления световыми потоками, которые позволят осуществлять многопараметрическую оптимизацию лечебных процедур; в частности, находить нужное для лечения определенной патологии сочетание пространственных и временных фрактальных характеристик используемого излучения.

Весьма эффективным с точки зрения применения в офтальмологии может оказаться метод генерации фрактальных световых структур, который основан на использовании в качестве математических алгоритмов модифицированных функций Вейерштрасса [5, 6]. Построенные с помощью этих функций распределения интенсивности и фазы световых пучков могут непосредственно наблюдаться на экране монитора, с их помощью можно программным образом влиять на профиль пропускания пространственных модуляторов света или фрактальных фильтров. Функции Вейерштрасса включают набор параметров, позволяющих в широких пределах варьировать фрактальную размерность распределений, коэффициент скейлинга, размеры рабочего поля и (при стохастизации распределений) размеры спеклов, их контрастность, а также вероятность обнаружения спеклов с определенной интенсивностью. Простые программные средства дают возможность менять цветовую палитру генерируемых структур, задавать закон вариации интенсивности и различных характеристик от времени.

СХЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Используемая для моделирования фрактальных световых полей функция Вейерштрасса, имела вид

$$W_{x,y,t} = \sigma \left[ \sum_{\nu=0}^V \sum_{n=0}^N \left[ b^{(D-2)n} \times \cos \left[ 2\pi s b^n \left[ \left( x - \frac{K+1}{2} - \eta(t) \right) \cos(\alpha\nu) + \left( y - \frac{K+1}{2} - \mu(t) \right) \sin(\alpha\nu) \right] + \psi_n k_1 + \psi_\nu k_2 \right] \right] - A(t). \quad (1)$$

Величина  $W$  определяет амплитуду поля, дискретные поперечные координаты  $0 \leq x, y \leq K - 1$  ( $K$  – целое число),  $D$  характеризует фрактальную размерность,  $s$  – масштабирующий параметр,  $b$  – коэффициент скейлинга;  $\sigma$  – нормировочный множитель;  $n$  – номер гармоники;  $\nu$  – азимутальный индекс;  $\psi_n, \nu$  – фазы, зависящие от  $n$  и  $\nu$  (считались в одних случаях детерминированными, в других – случайными);  $t$  – дискретное время, от которого зависели величины  $\eta, \mu, A$ . Первые из них  $\eta(t)$  и  $\mu(t)$  влияли на положение “центров тяжести” изображений световых пучков, третья –  $A(t)$  – определяла амплитуду дополнительной плоской волны. Для того, чтобы зависимость указанных величин от времени носила фрактальный характер, для них использовались выражения

$$\eta(t) = \zeta Y(t), \quad \mu(t) = \zeta Y(t), \quad A(t) = \xi Y(t). \quad (2)$$

Здесь  $\zeta, \xi$  – параметры,  $Y(t)$  – фрактальная зависимость, задаваемая одномерной функцией Вейерштрасса

$$Y(t) = \sum_{n=0}^N b^{(D-2)n} \sin(2\pi s b^n t + \psi_n). \quad (3)$$

График этой функции, построенный для параметров  $D = 1.3, b = 2, s = 0.04, N = 6, \psi_n = \pi/2n, 0 \leq t \leq K - 1$ , показан на рис. 1. Форма задания пространственно-временной структуры излучения на основе выражения (1) в лечебной практике может быть реализована путем создания серии анимаций, предъявляемых пациентам с экрана компьютера.

АНАЛИЗ ГЕНЕРИРУЕМЫХ СТРУКТУР

В ходе анализа структуры световых полей на основе функции (1) было установлено, что поперечное распределение интенсивности  $I_{x,y,t} = |W_{x,y,t}|^2$  в формируемых изображениях существенно зависит от значения и соотношения фаз  $\psi_n$  и  $\psi_\nu$ . При детерминированном задании изменения фаз структура изображений имела регулярный характер, претерпевающий циклические изменения во времени. В качестве примера на рис. 2 приведены

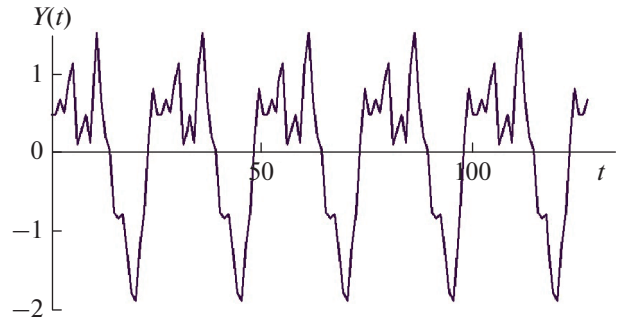


Рис. 1. График вспомогательной функции  $Y(t)$ .

некоторые кадры из анимаций временных изменений. При их создании использовались те же параметры, что и построения функции  $Y(t)$ . При этом считалось, что  $\zeta = 0, \xi = 5, k_1 = 1, k_2 = 0$ .

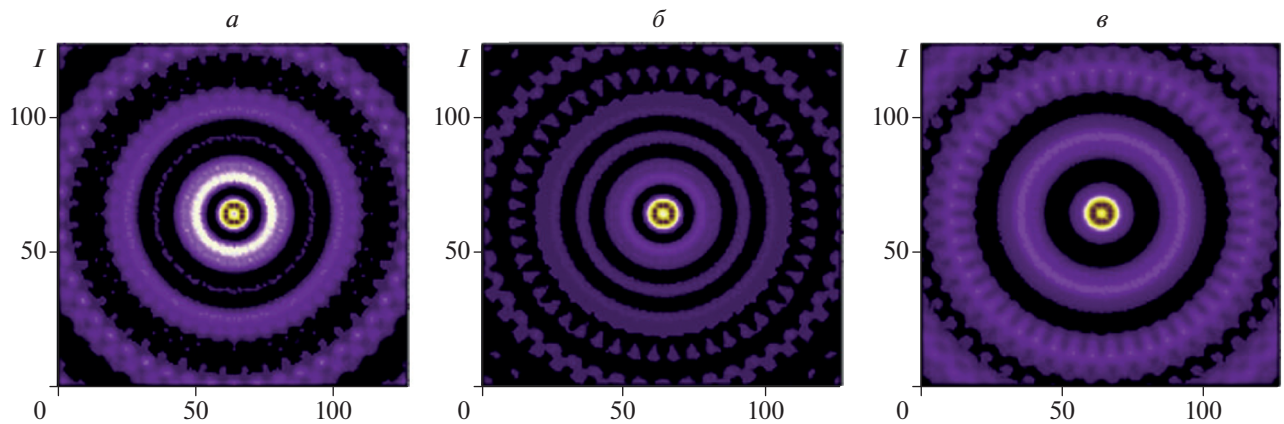
Видно, что с течением времени скейлинговая структура излучения остается неизменной. Присутствующие в изображениях концентрические окружности имеют радиусы, отличающиеся в два раза. Это соответствует задаваемому коэффициенту скейлинга  $b = 2$ .

Используя зависимости  $\eta(t) = \zeta Y(t)$  или  $\mu(t) = \zeta Y(t)$  можно было обеспечить фрактальные циклические смещения изображений в горизонтальном и вертикальном направлениях. Такие смещения могли сочетаться со структурными изменениями, обусловленные изменением амплитуды дополнительной волны  $A(t)$ .

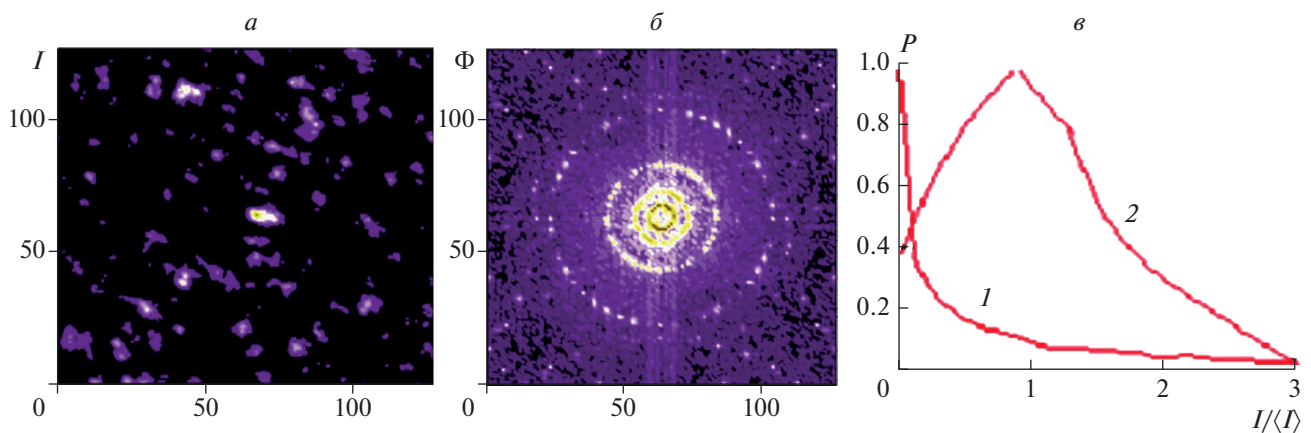
Качественные изменения в распределении интенсивности изображений происходили при рандомизации значений фаз  $\psi_n$  и  $\psi_\nu$ . Использовалось соотношение

$$\Psi_{n,\nu} = \frac{2\pi r n d(n, \nu)}{(n, \nu + 1)} \quad (4)$$

при значениях  $k_1 = k_2 = 1$ . На рис. 3а показано спеклоподобное распределение интенсивности при рандомизированных фазах. Важно отметить, что, несмотря на случайный хаотический характер распределения интенсивности, определенный методом быстрого преобразования Фурье пространственный спектр имел регулярный фрактальный вид (рис. 3б). Как и в структуре регулярных изображений (рис. 2), в его графическом представлении наблюдается система окружностей, размеры которых соответствовали коэффициенту скейлинга  $b = 2$ . Пространственный спектр, как показали дополнительные расчеты, весьма устойчив к влиянию вносимых в изначальные поля амплитудно-фазовых искажений. Применительно к задачам офтальмологии это означает, что помутнение прозрачных сред глаза не будет серьезным образом его искажать.



**Рис. 2.** Динамика изменения структуры фрактальных изображений.  $t = 0$  (а), 9 (б), 18 (в). По осям отложено количество значащих точек.



**Рис. 3.** Характеристики спеклоподобного поля. Распределение интенсивности (а); структура пространственного спектра ( $\xi = 0$ ) (б); по осям отложены нормированные пространственные частоты; графики плотности вероятности для  $\xi = 0$  (1), 5 (2) (в).

Используемый алгоритм позволял вносить целенаправленные изменения в распределения плотности вероятности обнаружения определенной интенсивности (рис. 3в). Экспоненциальное снижение плотности вероятности (кривая 1), свойственное развитым спеклам в отсутствие дополнительной волны, не всегда удобно для офтальмологических процедур, поскольку нулевая интенсивность оказывается наиболее вероятной. Статистику распределения интенсивности можно существенно скорректировать, путем наложения на спекловое поле плоской однородной волны (кривая 2). Этот прием дает возможность повысить наиболее вероятное значение интенсивности.

### ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФРАКТАЛЬНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Наконец, следует сказать о том, что анализ особенностей структуры фракталов позволяет

дать объяснение наблюдаемому в результате воздействия фрактального излучения на органы зрения улучшению наряду с лечебными показателями психологического и эмоционального настроения пациентов. Такого рода комплексный по своему характеру спекл-стимулирующий эффект заслуживает внимания и, видимо, нуждается в дополнительной проверке. При его интерпретации и использовании следует учитывать опыт, накопленный в так называемой арт-терапии [5], когда для улучшения психического состояния пациентов, им показывают изображения фрактальных объектов. Ключ к объяснению такого способа лечения можно найти, если учесть особенности пространственного спектра фрактальных структур. Как при регулярных, так и при стохастических распределениях интенсивности они в силу скейлинга на разных масштабах подчиняются одной и той же закономерности, то есть обладают самоподобием. Если исходить из того, что при обработке и хранении оптической информации, по-

ступающей в мозг, она препарируется в виде пространственных спектров (фурье-образов) рассматриваемых объектов, то их фиксация в силу самоподобия происходит очень быстро и с высокой степенью эффективности. Повышенная интенсивность процессов в коре головного мозга, развивающихся при воздействии фрактального излучения, подтверждается повышением биоэлектрической активности мозга [1, 7]. Указанные процессы формируют у человека чувство комфорта и удовольствия, улучшающее его психическое состояние. Есть основания полагать, что ускорение процессов обработки оптической информации в коре головного мозга будет эффективным средством лечения некоторых глазных патологий (например, амблиопии), не связанных с каким-либо заболеванием глаз, а обусловленных изменениями в области зрительной коры головного мозга.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ литературных данных показывает, что в офтальмологии сложилось направление, которое использует при терапии глазных болезней воздействие фрактального излучения на органы зрения. Оно нуждается в дополнительном методическом обеспечении, позволяющем связать наблюдаемые положительные результаты лечения с оптико-физическими свойствами фрактальных световых структур. Предложенные алгоритмы генерации фрактальных полей, использующие свойства двумерных функций Вейерштрасса, позволяют существенно расширить диапазоны вариации параметров излучения и обеспечить возможность его многопараметрической оптимизации применительно к улучшению определенных медицинских показателей. Проведенное моделирование фрактальных световых полей показало, что алгоритмы позволяют генерировать как регулярные, так и

стохастические структуры при одном и том же распределении пространственных спектральных компонент. При проведении лечебных процедур могут найти применение опции, позволяющие изменять распределение вероятностей формирования спеклов с определенной интенсивностью и одновременно реализовывать пространственно-временную фрактальность.

Проведенное исследование дает объяснение наблюдаемому в результате воздействия фрактального излучения на органы зрения улучшению наряду с лечебными показателями психологического и эмоционального настроения пациентов. Несложный дружественный интерфейс программы построения фрактальных изображений, реализованный на персональном компьютере, может быть использован широким кругом практикующих офтальмологов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зуева М.В. // Физиол. человека. 2018. Т. 44. № 3. С. 62; Zueva M.V. // Human Physiology. 2018. V. 44. No. 3. P. 289.
2. Кащенко Т.П., Корнюшина Т.А., Базарбаева А.Р. и др. // Вестн. офтальмологии. 2014. Т. 130. № 5. С. 48.
3. Матросова Ю.В., Фабрикантов О.Л. // Офтальмология. 2018. Т. 15(2S). С. 52.
4. Зуева М.В., Ковалевская М.А., Донкарева О.В. и др. // Офтальмология. 2019. Т. 16. № 3. С. 317.
5. Зотов А.М., Короленко П.В., Мишин А.Ю., Рыжикова Ю.В. // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физ. и астрон. 2019. № 6. С. 52; Zotov A.M., Korolenko P.V., Mishin A.Y., Ryzhikova Y.V. // Moscow Univ. Phys. Bull. 2019. V. 74. No. 6. P. 625.
6. Короленко П.В., Кубанов Р.Т., Мишин А.Ю. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 1. С. 68; Korolenko P.V., Kubanov R.T., Mishin A.Y. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 1. P. 53.
7. Прокопенко В.Т., Матвеев Н.В., Олейник Р.В. и др. // Светотехника. 2021. № 4. С. 50.

## Fractal light structures for stimulation therapy in ophthalmology

O. M. Vokhnik<sup>a, \*</sup>, P. V. Korolenko<sup>a, b</sup>, R. T. Kubanov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

<sup>b</sup>Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

\*e-mail: vokhnik@rambler.ru

The possibilities of applying the results of research in the field of coherent optics to improve the methods of treatment of eye pathologies using the effects of fractal light structures on the organs of vision are considered. The developed algorithms for controlling light flows allow multiparametric optimization of medical procedures.