

## ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ. ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

## Физические основания нейроэстетики

А. М. Зотов,<sup>1</sup> П. В. Короленко,<sup>1,2,а</sup> А. Ю. Мишин,<sup>1</sup> Ю. В. Рыжикова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра оптики, спектроскопии и физики наносистем. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

<sup>2</sup> Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук. Россия, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинский проспект, д. 53.

Поступила в редакцию 01.08.2019, после доработки 09.09.2019, принята к публикации 16.09.2019.

Рассмотрен раздел нейроэстетики, в рамках которого на основе физических и когнитивных представлений дано объяснение феномена красоты фракталов. Приведены аргументы в пользу концепции селекции пространственных частот изображения фрактала в коре головного мозга. Особое внимание уделено проблеме устойчивости соотношений скейлинговых характеристик фрактального объекта и его фурье-образа. Обнаруженная стабильность скейлинга фурье-образов указывает на возможность осуществления ускоренной обработки оптических сигналов в специализированных участках мозга. Быстрая фурье-обработка зрительных сигналов создает ощущение комфорта и вызывает при созерцании фрактального объекта чувство красоты. Полученные результаты позволяют обосновать с физической точки зрения эффективность использования в медицине визуальной арттерапии, а также дать физическую интерпретацию некоторым положениям современной эстетики.

**Ключевые слова:** оптические сигналы, нейроэстетика, красота фракталов, фурье-образы изображений, скейлинг, структурное самоподобие, природоподобные объекты, арттерапия, междисциплинарность.

УДК: 535.015, 535.8. PACS: 42.30.-d, 42.30.Kq, 42.25.Fx, 07.05.Tr.

## ВВЕДЕНИЕ

Проблематику новой области нейропсихологии — нейроэстетики — составляют процессы, формирующие у человека при восприятии изображений различных объектов чувство эстетического наслаждения. Особое место занимают объекты, структура которых обладает фрактальными признаками [1–5]. Поскольку зрительная информация в коре головного мозга в значительной степени передается посредством сигналов, характеризующих распределение пространственных частот [6–10], важнейшим оказывается вопрос о частотном составе тех изображений, которые вызывают чувство прекрасного. В литературе имеются свидетельства, что эстетическое предпочтение люди отдают изображениям с определенным диапазоном частот [11]. Несмотря на отмечаемую многими исследователями роль особенностей пространственного спектра изображений, вопрос об устойчивости и характере связи структурных характеристик объекта с распределением его пространственных частот остается малоизученным. При решении данного вопроса наиболее существенной является оценка соотношений скейлинговых свойств анализируемых изображений предметов и их фурье-образов. Имеющиеся в литературе сведения [12] указывают на необходимость учета специфики отдельных видов фракталов. Условно их можно разбить на три группы. Фрактальные структуры первой группы характеризуются наличием одного постоянного коэффициента скейлинга как в структуре, так и в фурье-спектрах. Ко второй группе относятся объекты, обладающие внутренней (или скрытой) симметрией самоподобия.

Фракталоподобные структуры этой группы характеризуются наличием фрактальности фурье-спектров с одним значением коэффициента скейлинга. Фракталы третьей группы отличаются от первых двух тем, что им присуще различие коэффициентов скейлинга в геометрии фрактала и его фурье-образе.

Цель данной работы — оценка устойчивости фурье-образов фрактальных структур первой и второй групп как физической первоосновы их эстетических свойств. Помимо изучения физических и когнитивных процессов большое внимание уделено развитию на их основе междисциплинарных и трансдисциплинарных технологий, позволяющих дать обоснование ряду нейропсихологических гипотез и некоторым положениям современной эстетики. Кроме того, будет дано объяснение высокой эффективности приемам фрактальной арттерапии, улучшающей психическое состояние пациентов.

## 1. АНАЛИЗ СКЕЙЛИНГА НА ОСНОВЕ ФУНКЦИЙ ВЕЙЕРШТРАССА

На первом этапе исследований были использованы в качестве производящих модифицированные функции Вейерштрасса [13, 14]. Одномерный вариант этих функций можно задать посредством следующей формулы:

$$W_k = \sqrt{2}\sigma \frac{(1 - b^{2D-4})^{0.5} \sum_{n=0}^N b^{(D-2)n} \sin(2\pi s b^n k + \psi_n)}{(1 - b^{(2D-4)(N+1)})^{0.5}}. \quad (1)$$

Здесь  $\sigma$  — стандартное отклонение,  $N + 1$  — количество гармоник,  $D$  — фрактальная размерность,  $b, s$  — параметры масштабирования,  $k$  — поперечный индекс,  $\psi_n$  — фазы гармоник (в общем случае случайные).

<sup>а</sup> E-mail: pykorolenko@rambler.ru

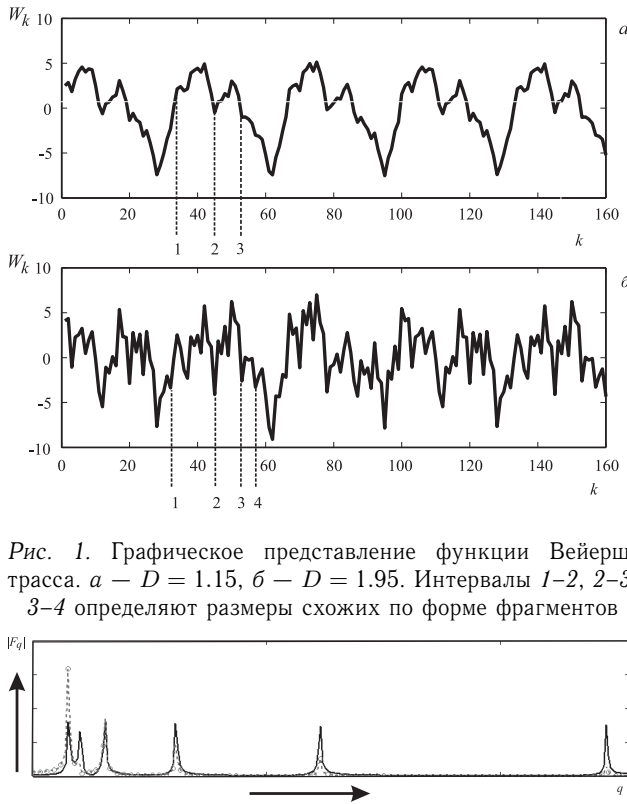


Рис. 1. Графическое представление функции Вейерштасса. *a* —  $D = 1.15$ , *б* —  $D = 1.95$ . Интервалы 1–2, 2–3, 3–4 определяют размеры схожих по форме фрагментов

Рис. 2. Спектральный состав функций Вейерштасса. Непрерывная кривая —  $D = 1.95$ , пунктир —  $D = 1.15$ ;  $q$  — пространственная частота

Существенное преобразование графика приведенной функции несложно осуществить путем изменения величины фрактальной размерности  $D$ . Увеличивая  $D$  в диапазоне от 1 до 2, можно добиться существенного усложнения графического представления функции Вейерштасса. Трансформацию зависимости  $W_k$  демонстрируют рис. 1, *a, б*, где приведены ее графики для разных значений  $D$ . Использовались следующие значения параметров:  $\sigma = 3.3$ ,  $N = 5$ ,  $b = 2$ ,  $s = 0.03$ .

Несмотря на значительное различие графиков, в каждом из них можно обнаружить схожие по форме фрагменты. Отношение их размеров, соответствующих интервалам 1–2, 2–3, 3–4, будет определять коэффициент скейлинга  $\zeta$ . Он оказался равным параметру  $b = 2$  и не зависит от величины  $D$ . Скейлинг с указанным коэффициентом нашел отражение и в фурье-спектрах функции  $W_k$ , которые показаны на рис. 2. Для определения спектров использовался метод быстрого преобразования Фурье (БПФ). Видно, что спектральные пики последовательно сдвигаются относительно друг друга с удвоенными интервалами независимо от значения фрактальной размерности  $D$ .

Аналогичная связь между функцией и ее фурье-образом имеет место и при переходе к двумерному варианту функции Вейерштасса следующего вида:

$$W_{k,m} = \sqrt{2}\sigma \frac{(1 - b^{2D-4})^{0.5} \sum_{\nu=0}^V \sum_{n=0}^N b^{(D-2)n} \times \sin(2\pi s b^n (k \cos(\alpha\nu) + m \sin(\alpha\nu)) + \psi_n)}{(1 - b^{(2D-4)(N+1)})^{0.5}}. \quad (2)$$

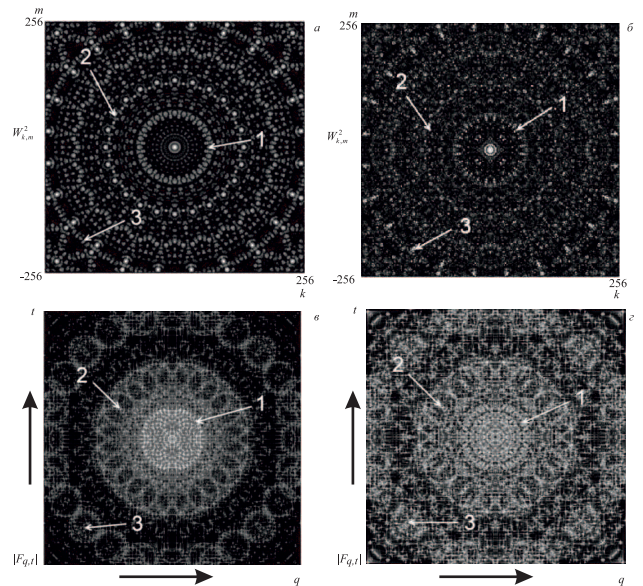


Рис. 3. Двумерные функции Вейерштасса и их фурье-образы. *a, б* — функции Вейерштасса; *в, г* — фурье-образы; *a, в* —  $D = 1.15$ ; *б, г* —  $D = 1.95$ .  $q, t$  — пространственные частоты

Формула (2) получается путем вращения системы координат, в которой задана одномерная образующая функция (1). Здесь  $\alpha$  — угол одного поворота,  $V$  — число вращений,  $k, m$  — поперечные индексы, соответствующие взаимно перпендикулярным координатам. Графическое представление функций  $W_{k,m}^2$  для разных значений  $D$  и их фурье-образы  $|F_{q,t}|$ , построенные методом БПФ, приведено на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что наиболее интенсивные максимумы на изображениях и фурье-образах лежат на окружностях, помеченных цифрами 1, 2, 3. Отношение радиусов этих окружностей, определяющее коэффициент скейлинга  $\zeta$ , по-прежнему равно параметру  $b = 2$ . Важно отметить, что заметное усложнение изображения при увеличении значения  $D$ , хотя и приводит к определенному повышению интенсивности паразитных пиков, не меняет общую морфологию фурье-образа, благодаря которой сохраняются скейлинговые характеристики. Как и в случае одномерных функций Вейерштасса, их двумерным распределениям не свойственно быстрое уменьшение интенсивности высоких гармоник с увеличением  $D$ . Это подтверждает, что обработка более сложных сигналов, характерных для больших  $D$ , является трудоемким процессом.

## 2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕШЕЧАТЫХ СТРУКТУР

Устойчивость фурье-образов была продемонстрирована при расчете структуры и оптических свойств решетчатых объектов, представляющих двумерную систему рассеивающих центров. Их чередование по поперечным координатам часто задается на основе числовых последовательностей Кантора, Фибоначчи, Морса—Туэ и двойного периода  $P_j$  [15]. Решетчатые системы формировались на основе матричных преобразований с использованием структурных мат-

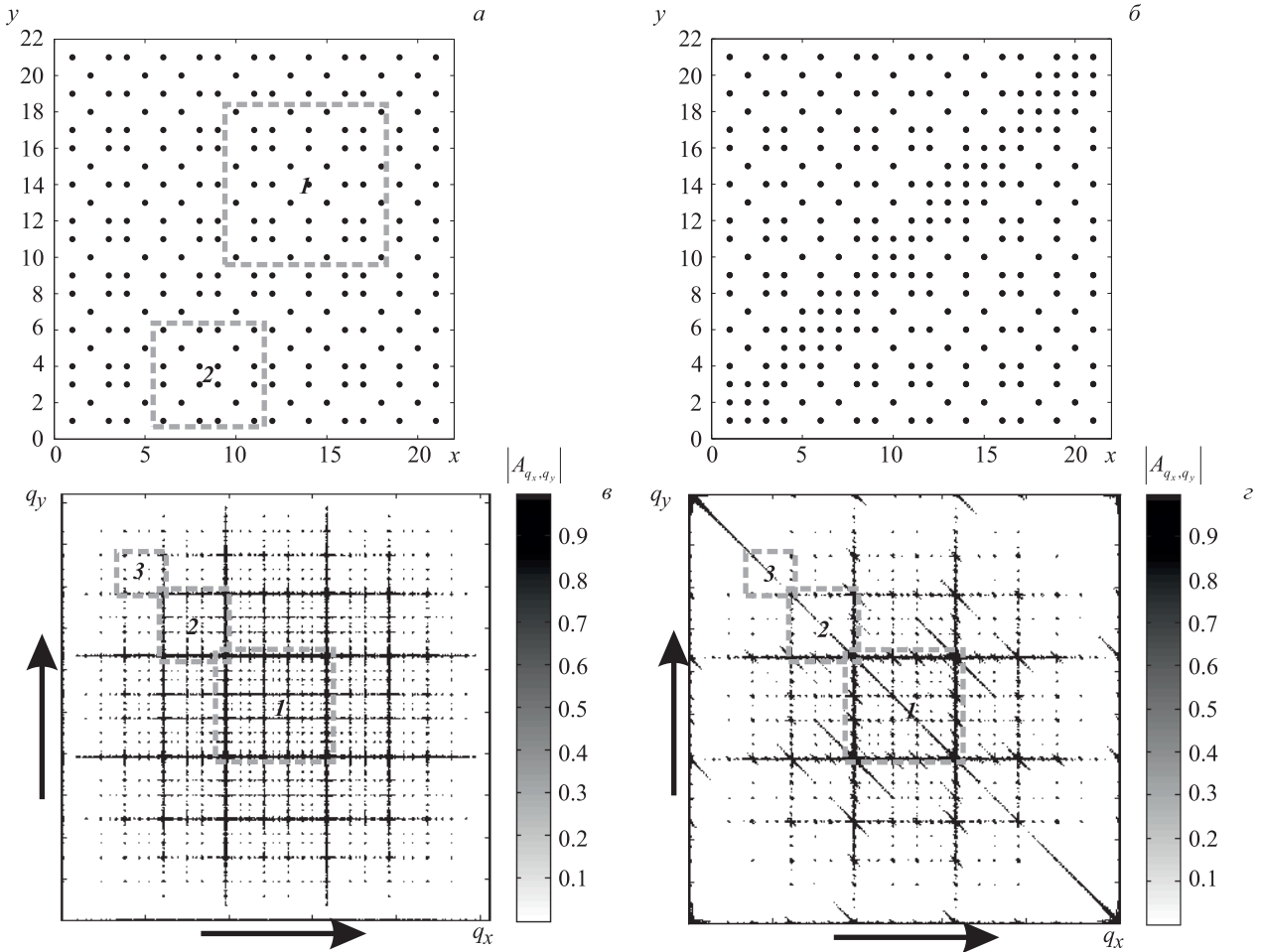


Рис. 4. Фрагменты решетчатых структур и их фурье-образы: *a, в* — невозмущенная решетка Фибоначчи и ее фурье-образ; *б, з* — решетка со структурными изменениями и ее фурье-образ; *x, y* — поперечные координаты в плоскости решетки; *q<sub>x</sub>, q<sub>y</sub>* — пространственные частоты. Цифрами и пунктиром обозначены самоподобные элементы

риц  $C_{mn}$ :

$$C_{mn} = \begin{cases} C_{1n} = C_{m1} = P_j = \{0, 1\}, \\ \{ P_j = \{0 \rightarrow 1, 1 \rightarrow 0\} \quad \forall P_1 \neq C_{m1}, \\ \{ P_j = \{0, 1\} \quad \forall P_1 = C_{m1}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $0 \leq j, m, n \leq J$ ,  $J$  — максимальное значение индексов, определяющее общие размеры структуры.

Формула (3) позволяет задать двумерное пространственное распределение рассеивающих центров в бинарном представлении для любой одномерной начальной числовой последовательности  $P_j$ . В качестве примера приведем 2D-структуру Фибоначчи. На рис. 4, *a* представлен фрагмент 2D-структуры Фибоначчи. На рис. 4, *в* изображен ее фурье-образ. Несмотря на то, что последовательности Фибоначчи в явном виде не фрактальны (для них характерна внутренняя симметрия самоподобия [16, 17]), в рассматриваемой структуре и ее фурье-образе присутствуют выделенные пунктиром квадратные самоподобные элементы. Отношение размеров их сторон — большей к меньшей — определяет коэффициент скейлинга, близкий к коэффициенту золотого сечения  $\Phi = \zeta \approx 1.618$ .

Отметим, что наличие золотых пропорций, соответствующих числу  $\Phi$ , является количественным критерием прекрасного для человека и характеризует гармоничность природоподобных систем [17].

В нашем случае эти пропорции определяют скейлинг пространственных спектров. Есть основания полагать, что такая форма скейлинга обеспечивает оптимальный режим обработки зрительных сигналов в коре головного мозга.

Вопрос об устойчивости фурье-образов решетчатых структур решался следующим образом. В структуру решетки вносились дефекты в виде однородной вставки переменной ширины (рис. 4, *б*). При увеличении степени деформации структуры в ее фурье-образе наблюдается повышение интенсивности паразитных пиков. На рис. 4, *з* показан фурье-образ трансформированной решетки, содержащей 32% дефектов (дефект характеризует замену в структурной матрице 0 на 1). Характерные самоподобные элементы фурье-образов выделены пунктиром. Результаты моделирования показали, что даже значительная трансформация структуры, когда количество дефектов достигает 87%, не приводит к сколь-нибудь существенному изменению значения коэффициента скейлинга фурье-образа. Это свидетельствует о высокой степени устойчивости пространственного спектра.

В ходе численного моделирования были рассмотрены характеристики решетчатых объектов, построенных с использованием других аперриодических числовых последовательностей [15]. Все они, как

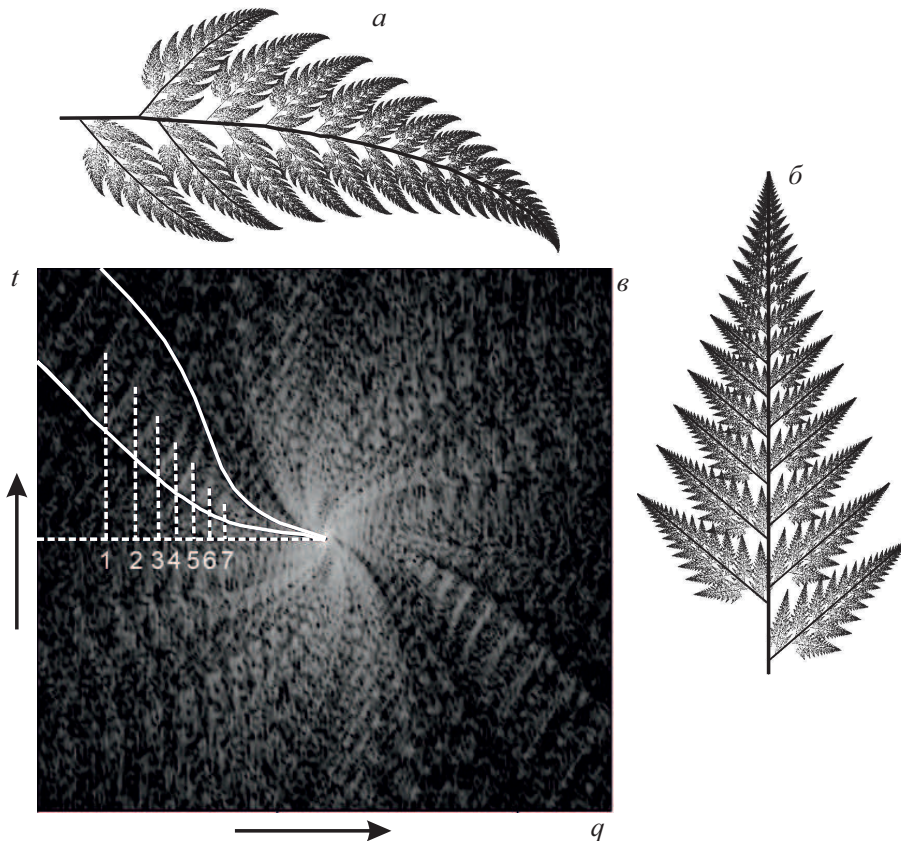


Рис. 5. Изображения листьев папоротника (а, б) и их фурье-образ (в). Белой линией выделен один из самоподобных элементов. Отношение длин отрезков 1–7 определяет коэффициент скейлинга

было установлено, подчиняются сформулированным выше закономерностям. Выполненный расчет решетчатых структур дополняет ранее полученные результаты [18] и указывает на возможность их использования при диагностике самоподобных изображений.

### 3. ПРИРОДОПОДОБНЫЕ ОБЪЕКТЫ

Согласно одному из критериев красоты, который используется при обсуждении эстетических категорий, красивыми считаются объекты, близкие по своей структуре и очертаниям к природным образованиям (рельеф местности, морское побережье, облака, деревья, кусты и т.д.). Рассмотренные выше фрактальные структуры имеют достаточно сложную абстрактную форму. Существует возможность построить другие фрактальные объекты, которые будут иметь природоподобный вид. Примером такого объекта может служить изображение листа папоротника. Его несложно построить, используя известный алгоритм [19]. На рис. 5 показаны два варианта изображения листа, несколько отличающиеся по форме. Фрактальность листа обусловлена схожестью очертаний множества его боковых фрагментов с формой листа как целого.

Структурированность формы показанных листьев можно характеризовать отношением длин боковых отростков на листе папоротника. Это отношение, определяющее коэффициент скейлинга, оказалось равным  $\zeta \approx 1.18 \pm 0.01$ .

С использованием БПФ были рассчитаны фурье-образы изображений листьев папоротника. Анализ

их структуры показал, что она также характеризуется наличием скейлинга. Его присутствие иллюстрирует рис. 5, в, на котором показана структурированность отдельных фрагментов фурье-образа изображения на рис. 5, а. Один из них для удобства восприятия обведен непрерывной линией. Сопоставление длин участков этого фрагмента, помеченных пунктиром и цифрами 1–7, показывает, что отношение длин отрезков 1–2, 2–3, 3–4, 4–5, 5–6, 6–7, как и в случае изображения листа папоротника, оказывается близким к тому же самому коэффициенту скейлинга ( $\zeta \approx 1.2 \pm 0.02$ ). Примечательно, что коэффициент скейлинга в фурье-образах был одинаков для двух вариантов листьев папоротника, показанных на рис. 5, а, б. Это подтверждает устойчивость скейлинговых характеристик в пространственных спектрах по отношению к структурным возмущениям объекта.

Выполненные модельные эксперименты указывают на взаимосвязь фрактальных свойств изображения объекта и его фурье-спектра. С учетом концепции частотной селекции сигналов в коре головного мозга и особенностей пространственных спектров фрактальных структур указанная связь может рассматриваться в качестве причины эстетического и терапевтического воздействия фракталов на состояние человека. Именно самоподобие структуры их пространственных спектров обеспечивает высокую эффективность частотной фильтрации фрактальных изображений при их обработке в коре головного мозга. Предполагается, что зрительная система человека содержит нейронные комплексы, которые

наделены свойствами двумерных пространственно-частотных фильтров Фурье или Габора [11, 20, 21]. Причем существует множество относительно «узких» фильтров, настроенных на восприятие разных пространственных частот. Если в разных спектральных интервалах форма распределения пространственных частот совпадает, то обработка сигнала происходит быстро и с малыми затратами энергии. Благодаря этому у человека формируется чувство комфорта, вызывающее возбуждение в коре головного мозга «центров удовольствия».

Описанная ситуация формирует при созерцании природных объектов и произведений искусства с фрактальными свойствами чувство прекрасного и ощущение эмоционального подъема. Улучшаются, в частности, креативные способности индивидуума. Частотный анализ упрощает узнавание знакомых объектов с увеличенными или уменьшенными размерами. При этом в системе памяти фиксируется в основном гармонический состав. Это делает опознание образа более экономным, не зависящим от реального размера объекта. Опираясь на концепцию частотной селекции и учитывая особенности пространственных спектров фрактальных структур, можно найти причину их эстетического и терапевтического воздействия на состояние человека.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, регистрируемая устойчивость формы фурье-спектров и их скейлинговых свойств во многом объясняет причины эстетической значимости фрактальных изображений. Если учесть, что многочисленные природные объекты обладают фрактальными признаками [15, 22, 23], то полученные результаты позволяют дать интерпретацию одному из основных положений современной эстетики. Согласно этому положению наибольшее эмоциональное воздействие на человека оказывают структуры, близкие по своей геометрии к природным объектам [24]. Одновременно, полученные в ходе оптико-физических исследований результаты позволяют дать рациональное объяснение высокой эффективности фрактальной арт-терапии, которая сейчас находит многочисленные подтверждения в медицинской практике [25–27]. С точки зрения философского осмысления основных принципов междисциплинарности, следует отметить, что они оказываются в большей степени сориентированы на выявление трандисциплинарных связей, описание которых требует дальнейшего совершенствования методологических подходов.

Выполненное моделирование показывает, что природоподобным объектам свойственно самоподобие, вызывающее проявление фрактальных признаков в пространственных спектрах. Это во многом и определяет эстетическую ценность окружающей природы. Несмотря на разнообразие рассмотренных систем и процессов, их изучение объединяет применение фрактальных методов анализа. Благодаря их универсальности становится возможным поиск наиболее общих закономерностей, определяющих свойства структур различной природы.

При выполнении данной работы часть вопросов, относящихся к математическому моделирова-

нию изучаемых процессов и объектов, решалась при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-01-00723 а.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пайтген Х.-О., Рихтер П.Х.* Красота фракталов. Образы комплексных динамических систем. М.: Мир, 1993. (*Peitgen H.-O., Richter P.H.* The Beauty of Fractals: Images of Complex Dynamical Systems. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1986.)
2. *Ренчлер И., Херцбергер Б., Эпстайн Д.* и др. Красота и мозг. Биологические аспекты эстетики.: Пер. с англ. / Под ред. И. Ренчлера, Б. Херцбергер, Д. Эпстайна. М.: Мир, 1995. (*Beauty and the Brain: Biological Aspects of Aesthetics.* Ed. by I. Rentschler, B. Herzberger, D. Epstein. Birkhüuser Verlag, Basel, Boston, Berlin, Springer — Basel AG, 1988.)
3. *Боголюбов А.Н., Петухов А.А., Шапкина Н.Е.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2011. № 2. С. 20. (*Bogolyubov A.N., Petukhov A.A., Shapkina N.E.* // *Mosc. Univ. Phys. Bull.* 2011. **66**, N 2. P. 122.)
4. *Ружицкая Д.Д., Рыжиков С.Б., Рыжикова Ю.В.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2018. № 3. С. 69. (*Ruzhitskaya D.D., Ryzhikov S.B., Ryzhikova Yu. V.* // *Mosc. Univ. Phys. Bull.* 2018. **73**, N 3. P. 306.)
5. *Street N.* What have fractals got to do with it? Individual differences in aesthetic responses. University of Liverpool repository. UK. 2015.
6. *Musel B., Bordier C., Dojat M.* et al. // *Journal of Cognitive Neuroscience.* 2013. **25**, N 8. P. 1315.
7. *Kauffman L., Ramanoel S., Peirin C.* // *Front Integr. Neurosci.* 2014. **8**. Article 37. P. 1.
8. *Шошина И.И., Шелепин Ю.Е., Вершинина Е.А., Новикова К.О.* // Физиология человека. 2015. **41**, № 3. С. 29. (*Shoshina I.I., Shelepin Y.E., Verшинina E.A., Novikova K.O.* // *Human Physiology.* 2015. **41**, № 3. P. 251.)
9. *Averchenko A.V., Korolenko P.V., Mishin A.Yu.* // *IEEE Progress in Electromagnetic Research Symposium Proceedings.* 2017. P. 3418.
10. *Jessen S., Grossmann T.* // *Front. Hum. Neurosci.* 2017. **11**. Article 486. P. 1.
11. *Gretchen S.* // *Environment and Planning B Planning and Design.* 2003. **30**, N 2. P. 297.
12. *Гридчина В.В., Короленко П.В., Рыжикова Ю.В.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. **79**, № 12. С. 1691. (*Gridchina V.V., Korolenko P.V., Ryzhikova Yu. V.* // *Bull. of the RAS: Physics.* 2015. **79**. No. 12. P. 1480.)
13. *Вохник О.М., Зотов А.М., Короленко П.В., Рыжикова Ю.В.* Моделирование и обработка стохастических сигналов и структур. М.: МГУ, 2013. (*Vokhnik O.M., Zotov A.M., Korolenko P.V., Ryzhikova Yu. V.* Modeling and processing of stochastic signals and structures. M.: MSU, 2013.)
14. *Потанов А.А.* // Журнал радиоэлектроники. 2010. № 1. С. 1.
15. *Albuquerque E.L., Cottam M.G.* // *Phys. Rep.* 2003. **376**. P. 225.
16. *Короленко П.В., Мишин А.Ю., Рыжикова Ю.В.* // Оптический журнал. 2012. **79**, № 12. С. 11. (*Korolenko P.V., Mishin A.Yu., Ryzhikova Yu. V.* // *Journal of Optical Technology.* 2012. **79**, N 12. P. 754.)
17. *Короленко П.В., Грушина Н.В.* Золотое сечение и самоподобные структуры в оптике. М.: Либроком, 2010.
18. *Korolenko P.V., Ryzhikov S.B., Ryzhikova Yu. V.* // *Physics of Wave Phenomena.* 2013. **21**, N 4. P. 256.
19. *Barnsley M.F.* Fractals Everywhere. New York, Academic Press, 1988.
20. *Westheimer G.* // *Perception.* 2001. **30**, N 5. P. 531.

21. *Velichkovsky B. M.* Cognitive Science: Foundations of Epistemic Psychology. M., Academia, 2006.
22. *Мандельброт Б.* Фрактальная геометрия природы. М.: «Институт компьютерных исследований», 2002. (*Mandelbrot B. B.* The fractal geometry of nature. New York, W. H. Freeman and Company, 1977.)
23. *Spehar B., Clifford C. W. G., Newell B. R., Taylor R. P.* // Chaos & Graphics. 2003. **37**. P. 813.
24. *Пьянкова С. Д.* // Психологические исследования. 2016. **9**. № 46. С. 12.
25. *Капитанов А. А., Короленко П. В., Мишин А. Ю.* // Журнал научных статей «Здоровье и образование в 21 веке». 2017. **19**. № 2. С. 90.
26. *Taylor R. P.* // *Leonardo*. 2006. **39**. N 3. P. 245.
27. *Garousi M.* // *Leonardo*. 2012. **45**. N 1. P. 26.

### Physical Basics of Neuroaesthetics

**A. M. Zotov<sup>1</sup>, P. V. Korolenko<sup>1,2,a</sup>, A. Yu. Mishin<sup>1</sup>, Yu. V. Ryzhikova<sup>1</sup>.**

<sup>1</sup>*Department of optics, spectroscopy and nanosystems physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.*

<sup>2</sup>*Lebedev Physics Institute, Russian Academy of Sciences. Moscow 119991, Russia.*

*E-mail: <sup>a</sup>[pvkorolenko@rambler.ru](mailto:pvkorolenko@rambler.ru).*

The field of neuroaesthetics, which allows description of the beauty of fractals, has been considered in this work. The arguments for the concept of selection of the spatial frequencies of fractal images in the brain cortex have been discussed. Special attention has been paid to the stability of the scaling parameter of a fractal and its Fourier transform, indicating the ability for rapid optical signal processing in particular brain sites. Rapid Fourier processing of visual signals makes one feel comfortable and causes the sense of beauty when contemplating a fractal object. The results of this study enable one to explain the efficiency of visual art therapy in medicine from the physical viewpoint, as well as to give a physical interpretation to some statements of modern aesthetics.

*Keywords:* optical signals, neuroaesthetics, beauty of fractals, Fourier images, scaling, structural self-similarity, nature-like objects, art therapy, interdisciplinarity.

PACS: 42.30.-d, 42.30.Kq, 42.25.Fx, 07.05.Tr.

*Received 01 August 2019.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2019. **74**, No. 6. Pp. 625–630.

### Сведения об авторах

1. Зотов Алексей Михайлович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-57-40, e-mail: [a.zotov@physics.msu.ru](mailto:a.zotov@physics.msu.ru).
2. Короленко Павел Васильевич — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-57-40, e-mail: [pvkorolenko@rambler.ru](mailto:pvkorolenko@rambler.ru).
3. Мишин Алексей Юрьевич — инженер; тел.: (495) 939-57-40, e-mail: [physic\\_tx@list.ru](mailto:physic_tx@list.ru).
4. Рыжикова Юлия Владимировна — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-57-40, e-mail: [ryzhikovaju@physics.msu.ru](mailto:ryzhikovaju@physics.msu.ru).