

**БОРИС КРИГЕР**



**ФРАКТАЛЬНА ЛИ  
РЕАЛЬНОСТЬ?**

БОРИС КРИГЕР

# ФРАКТАЛЬНА ЛИ РЕАЛЬНОСТЬ?



© 2025 Boris Kriger

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means electronic or mechanical, including photocopy, recording, or any information storage and retrieval system, without permission in writing from both the copyright owner and the publisher.

Requests for permission to make copies of any part of this work should be e-mailed to [kriegerbruce@gmail.com](mailto:kriegerbruce@gmail.com)

Published in Canada by Altaspera Publishing & Literary Agency Inc.

### *Фрактальна ли реальність?*

В этой книге рассматривается, какую роль играют фракталы в восприятии окружающего мира и как они становятся связующим звеном между человеческим сознанием и сложными природными формами. Хотя принято считать фракталы математическими абстракциями, построенными на принципах самоподобия и повторяющихся структур, в их восприятии обнаруживается нечто большее — они оказываются не просто геометрическими конструкциями, а средствами, при помощи которых разум находит порядок в хаосе.

Автор критически осмыслияет статус фракталов как знания: они не являются подлинной сущностью природы, а скорее выступают как способ интерпретации чувственного опыта, преобразующего неустойчивые и неоднозначные впечатления в чёткие формы. Предлагается рассматривать фрактальность как своего рода «миф, который работает» — полезное, хотя и условное представление, с помощью которого наука может осваивать мир, где строгий математический порядок соседствует с эмпирической непредсказуемостью.

## ФРАКТАЛЬНА ЛИ РЕАЛЬНОСТЬ?

Идея фракталов со временем превратилась в символ стремления найти согласие между хаотичностью природы и врождённым стремлением человеческого разума к упорядоченности. Сформулированные в ясную систему Бенуа Мандельбротом во второй половине XX века, фракталы представляют собой геометрические фигуры, обладающие самоподобием и повторяющейся сложностью на разных масштабах. Эти структуры оказались необычайно полезными при описании таких явлений, как извилистые береговые линии, форма снежинок, сеть кровеносных сосудов и поведение турбулентных потоков — то есть тех форм, которые не вписываются в строгие рамки привычной геометрии.

Однако за пределами математических выкладок фракталы затрагивают куда более глубокие вопросы, связанные с тем, как человек воспринимает реальность и осмысливает сложность мира. Центральная идея этой книги заключается в попытке понять: являются ли фракталы порождением разума, стремящегося к упорядоченности, или же они действительно отражают фундаментальные закономерности самой природы? Хотя с точки зрения математики фракталы — это идеальные конструкции, их частое повторение в реальных природных формах, пусть и в приближённом виде, заставляет задуматься о том, не существует ли определённого соответствия между устройством внешнего мира и тем, как устроено восприятие.

С недавних пор достижения в области когнитивных наук и эволюционной психологии пролили свет на механизмы, с помощью которых мозг различает повторяющиеся узоры, особенно симметричные и вложенные друг в друга. Эти структуры, как выяснилось, не просто фиксируются вниманием — они вызывают эмоциональный отклик, вызывая эстетическое удовольствие и внутренний резонанс. Подобное притяжение к сложным, но узнаваемым формам может иметь глубокие корни: в далёком прошлом такие предпочтения помогали выживать, а со временем были перенесены в области, не связанные напрямую с инстинктами, такие как изобразительное искусство, научные модели или философские построения.

Несмотря на их наглядную привлекательность и практическую эффективность в описании сложных систем, фракталы остаются, по сути, инструментами восприятия, а не подлинными отражениями устройства мира. Они скорее напоминают карты, чем местность, которую изображают. Исследование подчёркивает двойственную природу этих форм: с одной стороны, они действительно отражают закономерности, встречающиеся в природе, а с другой — представляют собой конструкции сознания, в которых отражаются не только наблюдаемые явления, но и особенности самого наблюдателя.

Возникает необходимость рассматривать фракталы не только с позиций точных наук, но и с точки зрения теории познания. Автор предлагает взглянуть на фрактальные формы как на промежуточные,

приближённые образы, возникающие на стыке между склонностью мозга к распознаванию структур и непредсказуемым характером окружающей действительности. Такой подход ставит под сомнение привычную веру в то, что математическая изящность обязательно совпадает с глубинной природой вещей, предлагая вместо этого более гибкое понимание фрактальности — как выразительной, пусть и неполной, формы связи между сознанием и реальностью.

В этой книге рассматривается, какую роль играют фракталы в восприятии окружающего мира и как они становятся связующим звеном между человеческим сознанием и сложными природными формами. Хотя принято считать фракталы математическими абстракциями, построенными на принципах самоподобия и повторяющихся структур, в их восприятии обнаруживается нечто большее — они оказываются не просто геометрическими конструкциями, а средствами, при помощи которых разум находит порядок в хаосе.

Книга критически осмысливает статус фракталов как знания: они не являются подлинной сущностью природы, а скорее выступают как способ интерпретации чувственного опыта, преобразующего неустойчивые и неоднозначные впечатления в чёткие формы. Предлагается рассматривать фрактальность как своего рода «миф, который работает» — полезное, хотя и условное представление, с помощью которого наука может осваивать мир, где строгий математический порядок соседствует с эмпирической непредсказуемостью.

Несмотря на то что в природе идеальные фракталы не встречаются из-за физических ограничений масштаба и материалов, человеческий мозг легко распознаёт фрактальные мотивы в окружающем мире. Это свидетельствует о глубоком взаимодействии между врождёнными особенностями восприятия и свойствами внешней среды. Основываясь на данных из разных областей — от математики до эволюционной психологии и когнитивных наук — анализ подчёркивает, что фракталы следует понимать не как отражение объективной реальности, а как умственные конструкции, которые позволяют воспринимать сложные явления более упорядоченно.

Предпочтение симметрии, укоренившееся в процессе эволюции, становится фундаментом эстетических оценок, постепенно перетекая в более абстрактные сферы, такие как наука и искусство. Эта сформированная восприятием склонность способствует тому, что фрактальные модели воспринимаются как удобные способы описания таких сторон реальности, которые не поддаются традиционным линейным и евклидовым схемам.

Исследование выходит за пределы чисто научного анализа, поднимая вопрос о том, как фракталы служат посредниками между мышлением и неустроенным, а порой и вовсе непознаваемым основанием действительности. Возникает новая перспектива: фракталы — это не истинные отражения реального мира, а мысленные опоры, благодаря которым становится возможным понимание и моделирование сложности.

Философия самоподобия пронизывает человеческое мышление с глубокой древности, проявляясь в интуитивных попытках осмыслить мир через повторение форм, перекличку частей и целого, в перекрывающихся масштабах бытия. Идея того, что малое повторяет великое, что структура атома напоминает устройство Солнечной системы, а движение души отражается в ритмах космоса, стала лейтмотивом множества метафизических и натурфилософских систем. Эта связь между микрокосмом и макрокосмом — между внутренним человеком и внешним универсумом — восходит к самым ранним школам философии, оказываясь вновь и вновь в центре внимания в разные исторические эпохи.

В античности, особенно в традиции пифагорейцев и неоплатоников, идея самоподобия носила одновременно космологический и этический характер. Мир мыслился как иерархическая структура, где всё связано числовыми и геометрическими соотношениями. Восхождение души к высшему знанию предполагало распознавание этих повторяющихся паттернов в разных слоях реальности. Платон, говоря о мире идей и их отражениях в вещественном мире, уже закладывал основу для понимания формы как многократно отражённой сущности, проявляющейся через аналогии и соразмерности.

В Средние века понятие микро- и макрокосма приобрело богословское наполнение. Человек стал восприниматься как образ мира, вместилище всех стихий и начал, созданное по подобию Творца. Эту идею развивали как

христианские мистики, так и исламские и еврейские мыслители: например, в герметической традиции и каббале самоподобие мира понималось как сакральный язык, через который Бог раскрывает Своё присутствие в каждом фрагменте творения.

Эпоха Возрождения вновь обратилась к этой теме, вдохновлённая как античным наследием, так и алхимическими представлениями о структурной рифме между телом и вселенной. Фигуры, подобные Джордано Бруно, Марсилио Фичино и Джон Ди, размышляли о едином законе, связывающем малое и великое. Архитектура, живопись, музыка этого периода стремились выразить ту же гармонию форм, основанную на соразмерности и повторении.

В философии Нового времени идея самоподобия стала постепенно вытесняться механистическими и аналитическими моделями. Однако она не исчезла: философы-романтики вновь вернулись к ней, теперь уже с акцентом на органическое, живое повторение. Шеллинг, развивая натурфилософию, рассматривал природу как становящийся разум, в котором каждый уровень организации повторяет и трансформирует предыдущий. У Гегеля диалектическая спираль — форма движения духа и материи — напоминает фрактальную рекурсию: развитие идёт по линии, где каждая ступень разворачивает содержательно тот же процесс, что уже был, но на ином уровне.

В восточных философских традициях подобная мысль

не просто присутствует — она фундаментальна. В даосизме целостность мира и непрерывная взаимосвязь всех его частей выражаются в образах, напоминающих самоподобие. Книга Перемен (И цзин) описывает динамику изменений через повторяющиеся, ритмические конфигурации, где малое несёт в себе отпечаток большого, а перемена одного элемента влечёт преобразование всего целого. В индуистской и буддийской философии также можно увидеть аналогичную структуру: например, концепция «индринет» в буддизме описывает вселенную как сеть, в каждой точке которой отражается вся остальная сеть.

Современная наука, не зная того, пришла к подобным образом с другой стороны. С развитием теории систем, нелинейной динамики и фрактальной геометрии философская интуиция самоподобия получила новую поддержку. Идея о том, что сложные структуры природы — от распределения галактик до ветвления сосудов — могут быть описаны через повторяющиеся паттерны, вошла в лексикон научного мышления. Мандельброт, открывая фракталы как универсальные формы нерегулярности, фактически предложил новое основание для древней идеи: порядок не исчезает в хаосе, он просто меняет масштаб.

И здесь философия вновь вступает в дело. Переосмысление фрактальности как не только математической, но и эпистемологической модели требует обращения к тем школам, что занимались вопросом формы, соразмерности, множественного отражения. Структуралистские и постструктураллистские

подходы — от Лотмана до Делёза — дают ключ к пониманию культуры как системы вложенных смыслов, каждый из которых повторяет весь ансамбль на своём уровне. То же можно сказать о феноменологии, где восприятие мира строится через повторение актов сознания, каждый из которых несёт в себе структуру целого опыта.

Самоподобие, таким образом, перестаёт быть лишь геометрическим принципом. Оно оказывается глубинным способом организации мышления, способом, которым разум находит смысл в различии, узнавая знакомое в чуждом, малое в большом, единое — во множественном. Это не просто структура природы, но и структура самой мысли о природе.

Надо сказать, что в качестве подготовки к написанию этой книги, автор занялся новым переводом введения к основной книге Бенуа Мандельброта, "Фрактальная геометрия природы" (в оригинале — *The Fractal Geometry of Nature*), стремясь не просто глубже понять его идеи, но и погрузиться в то, как он сам воспринимал и формулировал своё открытие. Этот труд стал способом вчитаться в саму интонацию автора, почувствовать ход его мысли и по-настоящему разобраться, каким образом он подводил читателя к понятию фрактала — не как к отвлечённой математической конструкции, а как к универсальной форме, сквозь которую он смотрел на природу, экономику, язык и искусство. Перевод доступен в открытых источниках, в том числе и там, где вы нашли эту книгу, с которой вы знакомитесь в данный момент.

Итак, фрактал представляет собой особую математическую конструкцию, в основе которой лежит принцип самоподобия, проявляющийся на множестве уровней масштабирования. Такие формы отличаются дробной, а не целой размерностью и обладают сложной, повторяющейся внутренней структурой. Хотя идеальные фракталы существуют исключительно в теоретических моделях, многие природные формы приближаются к ним по своему устройству. Самоподобие — это свойство, при котором один и тот же узор сохраняется при увеличении или уменьшении масштаба. В математике оно может быть абсолютно точным, тогда как в природе чаще встречается статистическая разновидность, при которой схожесть сохраняется в общих чертах, но не в деталях. Сознание в таком контексте рассматривается как совокупность внутренних процессов, через которые человек осмысливает, переживает и воспринимает внешний мир, наделяя его смыслом. Оно действует как внутренняя система, создающая образы на основе ощущений, мыслей и воспоминаний. Математическая абстракция здесь служит инструментом, позволяющим упростить сложное, переводя запутанные природные явления в строгий язык формул и моделей, тем самым делая их доступными для анализа и обобщения. Симметрия, в свою очередь, означает упорядоченность и зеркальность, часто выступающую в культуре как признак красоты и гармонии, что, по мнению эволюционной психологии, связано с глубинными биологическими предпочтениями и воспринимается как маркер здоровья и генетической устойчивости. Восприятие формируется в результате обработки поступающей от органов чувств информации

и превращения её в устойчивую картину мира. Этот процесс не только биологичен, но и культурно обусловлен, изменяясь под влиянием воспитания, среды и опыта. Хаос в научном понимании — это не просто беспорядок, а особый тип поведения систем, кажущийся случайнм, но подчинённый строгим законам, при этом чрезвычайно чувствительный к малейшим изменениям начальных условий. На границе между хаосом и порядком часто возникают фрактальные структуры, в которых можно проследить переход от очевидной структуры к кажущейся случайности. Когнитивным интерфейсом можно назвать тот невидимый слой, через который сознание взаимодействует с внешней реальностью. Именно в этом качестве фракталы рассматриваются как своего рода посредники, позволяющие разуму упорядочивать хаотичное и делать сложное обозримым.

В центре нашего исследования встаёт вопрос: насколько фракталы являются отражением объективных свойств окружающего мира, а в какой степени они — продукт человеческой психики, стремящейся навести порядок в чувственном опыте. Возникает интерес к тому, как врождённая способность мозга распознавать узоры, особенно симметричные и повторяющиеся, влияет на то, как интерпретируются природные фракталоподобные формы. Есть ли основания считать фракталы не истинной сутью реальности, а всего лишь удобными инструментами, с помощью которых человек описывает непостижимое, и какие выводы из этого следуют для научного познания. Исследование касается также влияния эволюции на формирование вкуса и

эстетического отклика: возможно, предпочтение фрактальных форм связано не только с культурой, но и с древними механизмами отбора, перешедшими из биологических в абстрактные сферы, включая математику, философию и искусство. Наконец, ставится вопрос об ограничениях: до какой степени можно полагаться на фракталы как на модели описания природных явлений, не попадая в ловушку проекции собственных когнитивных структур на внешний мир, который может быть устроен совершенно иначе, чем его представляют мысленные схемы.

Появление фрактальной геометрии в XX веке стало важной вехой, ознаменовавшей отход от господствовавшей в течение многих столетий евклидовой традиции. Классическая геометрия, основанная на точках, прямых линиях и регулярных фигурах, оказалась неспособной адекватно описывать формы, которые в изобилии встречаются в природе. Изрезанные горные хребты, сложные сосудистые системы или клубящиеся облака не укладывались в рамки гладких, упрощённых очертаний. Эти природные образования демонстрируют многоуровневую сложность, сопротивляясь линейному описанию и выходя за пределы привычных понятий о симметрии и порядке.

В 1975 году Бенуа Мандельброт предложил использовать термин «фрактал» для обозначения геометрических структур, обладающих дробной

размерностью и свойством самоподобия. Опираясь на более ранние работы таких учёных, как Гастон Жюлия и Хельге фон Кох, он переосмыслил фракталы, представив их не просто как математические диковинки, а как реальные инструменты, способные уловить закономерности в природной неупорядоченности. Его подход открыл новые исследовательские горизонты во множестве дисциплин — от гидродинамики до биологии популяций, от экономики до метеорологии.

Значение фракталов, однако, выходит далеко за рамки чисел и уравнений. Параллельно с развитием теории хаоса и нелинейной динамики фрактальные структуры начали рассматриваться как выражение сложности, где локальная непредсказуемость сочетается с глобальной согласованностью. Благодаря своей рекурсивной природе фракталы предложили совершенно иной язык для описания таких явлений, в которых порядок и беспорядок не противостоят друг другу, а существуют одновременно, переплетаясь в едином ритме. Именно это сочетание хаотического и структурного оказалось центральным для понимания множества систем, от турбулентных потоков до роста живых тканей.

С философской точки зрения фракталы становятся символом напряжённого баланса между случайностью и детерминизмом, между непредсказуемостью и стремлением к объяснимости. Эта двойственность очень близка к тому, как устроено человеческое восприятие — постоянно пытающееся уловить смысл в беспорядке, выстроить закономерности там, где господствует мозаика ощущений. Фракталы тем самым становятся

своего рода интеллектуальным мостом между физическим миром, полным сложностей и отклонений, и разумом, стремящимся к упорядоченности. Их появление в науке отражает не только методологический сдвиг, но и перемену в самой структуре познания — признание того, что природа не всегда подчиняется линейным, редукционистским моделям.

Дополняя научный интерес, фракталы нашли отклик и в области психологии, и в эстетике. Исследования показали, что определённые фрактальные формы способны вызывать положительные эмоциональные реакции и ощущение визуального комфорта, особенно если они обладают средней степенью сложности, измеряемой фрактальной размерностью. Такая склонность, как предполагается, может иметь глубокие эволюционные корни: структуры, в которых сочетаются предсказуемость и сложность, оптимальны для восприятия, они облегчают обработку информации и принятие решений, экономя усилия мозга и повышая эффективность реагирования.

Фракталы, таким образом, обретают значение, далеко выходящее за пределы сугубо математического. Они становятся выражением современной идеи сложности, соединяют когнитивные науки с наблюдением за природой, побуждают к философским размышлениям о том, как устроено человеческое восприятие и каким образом формируется представление о реальности. Выступая и как научные модели, и как культурные метафоры, фракталы продолжают влиять на понимание соотношения порядка и беспорядка, раскрывая при этом

особую роль наблюдателя в интерпретации мира.

Несмотря на своё абстрактное происхождение, фракталы давно вышли за пределы чистой математики и нашли практическое применение во множестве областей. Их способность к самоподобию и рекурсивной структуре позволяет точно моделировать явления, где масштаб, сложность и нелинейность играют решающую роль. В естественных науках фрактальные принципы оказались особенно востребованными при описании сложных, разветвлённых и кажущихся хаотичными форм. Так, в геологии и географии именно фракталы позволяют воспроизвести изломанные контуры береговых линий, горных хребтов или речных систем, выявляя при этом закономерности, устойчивые на разных уровнях масштаба. Благодаря этому стало возможным точнее моделировать эрозионные процессы и формировать реалистичные цифровые рельефы. В метеорологии фрактальная динамика помогает объяснять формирование облаков, структуру молний и поведение атмосферной турбулентности, внося вклад в развитие более точных климатических моделей и прогнозов погоды. В экологии фрактальные методы позволяют оценивать сложность среды обитания, структуру популяций и распределение биомассы, что особенно важно для охраны природы и рационального управления природными ресурсами.

В области медицины фракталы служат для анализа биологических форм и процессов, не подчиняющихся евклидовой логике. В кардиологии с их помощью изучают вариативность сердечного ритма, выявляя

отклонения, способные сигнализировать о риске заболеваний. Сложная сосудистая система организма, как оказалось, также устроена по фрактальному принципу. В нейрофизиологии подобная структура обнаруживается в ветвлении нейронов, складках коры мозга и связности нейросетей. Это способствует лучшему пониманию когнитивных функций и диагностике неврологических расстройств. В пульмонологии фрактальный анализ дыхательных путей позволяет глубже исследовать характер распределения воздуха и выявлять патологические изменения при заболеваниях дыхательной системы.

В сфере компьютерной графики фрактальные алгоритмы позволяют создавать визуально насыщенные и реалистичные изображения. Они применяются при генерации виртуальных ландшафтов, облаков и сложных эффектов в кино и видеоиграх. Благодаря рекурсивным формулам достигается высокая степень визуального разнообразия при относительной простоте расчётов. Методы фрактального сжатия, использующие повторяющиеся элементы в изображениях, позволяют хранить графическую информацию в компактной форме, сохраняя при этом её чёткость, что особенно актуально для передачи и архивации данных.

В области телекоммуникаций фрактальная геометрия используется при проектировании антенн. Конструкции на основе самоподобных кривых, таких как треугольник Серпинского, позволяют значительно увеличить рабочую длину волны при минимальных физических размерах, создавая антенны с широким диапазоном

частот и высокой эффективностью. Это особенно важно в условиях, где пространство ограничено, а требования к производительности высоки.

В экономике фрактальные модели помогают лучше понимать поведение финансовых рынков. Наблюдаемая в них изменчивость и повторяемость на разных временных отрезках не укладывается в рамки линейных моделей. Гипотеза фрактального рынка предполагает существование долгосрочных зависимостей и масштабной инвариантности, что делает её более чувствительной к крайним событиям и так называемым «чёрным лебедям». Методы фрактального анализа позволяют учитывать асимметрии и нестабильности, улучшая подходы к оценке риска.

В искусстве и архитектуре фрактальные идеи вдохновляют авторов, стремящихся соединить сложность и гармонию. Работы Джексона Поллока, как показали исследования, содержат в себе фрактальные закономерности, несмотря на их внешнюю спонтанность. Подобные структуры интуитивно воспринимаются как визуально привлекательные. В архитектурной практике фрактальные принципы находят отражение как в традиционном зодчестве, где они часто возникают естественным образом, так и в современных проектах, стремящихся к биофильтруному дизайну, где повторяющиеся формы природы используются для создания комфортной и психологически благоприятной среды. В градостроительстве фрактальные модели помогают анализировать рост городов, формирование

транспортных сетей и распределение пространств, способствуя адаптивному и устойчивому развитию городской среды.

Даже в сфере психического здоровья фракталы находят своё применение. Их визуальные образы используются в терапевтических пространствах для снижения тревожности и восстановления когнитивных ресурсов. Исследования показывают, что контакт с природными фракталами, например, с узорами листвы или ветвей деревьев, способствует снижению уровня стресса и улучшению концентрации. Элементы фрактального дизайна внедряются в оформление больничных интерьеров и образовательных учреждений, помогая создать атмосферу покоя и ментального комфорта.

Фракталы, соединяя абстракцию и применимость, становятся универсальным инструментом, способным охватывать как природные закономерности, так и внутренние структуры восприятия. Их устойчивое повторение, сложность и визуальная ритмичность на разных уровнях делают их незаменимыми как в исследовании материи, так и в осмыслении её культурных и когнитивных отражений.

Во взаимодействии фракталов с восприятием, мышлением и эстетическим откликом постепенно раскрывается их двойственная природа: они становятся не просто математическими формами, а ментальными инструментами, соединяющими порядок и беспорядок, внутренние образы и внешнюю реальность. Возникает

ощущение, что фракталы действуют как интерфейсы между разумом и миром, позволяя наводить смысл там, где царит неустойчивость. Согласно теории когнитивной легкости, визуальные образы воспринимаются особенно приятно тогда, когда они легко обрабатываются зрительной системой. В этом смысле фракталы, обладающие средней степенью сложности, оказываются особенно уместными: они удерживают внимание, не перегружая восприятие, и создают баланс между узнаваемостью и новизной.

Многочисленные исследования подтверждают, что наибольшее эстетическое удовлетворение вызывают фрактальные формы с размерностью в пределах от 1.3 до 1.5. Именно такие структуры, как было показано в экспериментах Спехара, Тейлора и их коллег, уменьшают уровень стресса, создавая ощущение визуального комфорта. Интересно, что этот эффект прослеживается не только в природных или математических фракталах, но и в искусстве — в частности, в капельных картинах Джексона Поллока, где визуальный ритм подчиняется фрактальной логике. Независимо от того, где встречаются эти формы — в растениях, в облаках или на холсте, — они оказываются одинаково привлекательными для восприятия.

Тем не менее, за этим универсальным предпочтением скрывается значительное индивидуальное разнообразие. Хотя большинство людей положительно реагируют на фракталы средней сложности, существуют личные отклонения: одни находят особое удовольствие в чётких и угловатых формах, другие тяготеют к мягким,

округлым или более простым узорам. Согласно взглядам Вессела и Рубина, предпочтения в абстрактной визуальности зависят от индивидуального опыта, культурного фона и даже от ощущения личной идентичности. Это разнообразие свидетельствует о том, что эстетическое восприятие фракталов не может быть сведено к универсальной формуле, оно глубоко вплетено в ткань биографий и ассоциаций.

С точки зрения эволюции, предпочтение фракタルных форм, по всей вероятности, не случайно. Природные ландшафты, в которых на протяжении тысячелетий формировалось человеческое зрение, изобиловали фракタルными структурами: ветви деревьев, русла рек, формы скал и листвы. Постепенно зрительная система научилась эффективно воспринимать и обрабатывать эти повторяющиеся узоры, развивая так называемую «фрактальную беглость» — способность легко ориентироваться в среде с определённым уровнем сложности. Эта беглость, как показали Тейлор и Спехар, не только улучшает визуальное восприятие, но и вызывает физиологический отклик — чувство спокойствия и вовлечённости, которое в условиях дикой природы могло повышать шансы на выживание.

Всё это находит применение в самых разнообразных сферах — от архитектуры до психотерапии. Фрактальные структуры, встроенные в пространство, оказывают ощутимое воздействие на состояние человека. В архитектурной практике использование повторяющихся природных мотивов — будь то узор древесных колец или организация фасадов по принципу

ветвления — способно сделать среду более благоприятной для эмоционального и ментального здоровья. В дизайне общественных пространств, особенно тех, где требуется снизить уровень стресса, фракталы становятся не декоративным приёмом, а инструментом психологического воздействия. Исследования в области нейроэстетики указывают на то, что подобные формы не только радуют глаз, но и способствуют восстановлению когнитивных ресурсов, улучшая внимание и снижая тревожность.

Сводя всё воедино, фракталы оказываются не просто научными моделями, но опорными структурами восприятия, в которых отражается и эволюционная память, и логика нейронных процессов. Их привлекательность основана на точном балансе между узнаваемостью и загадочностью, на том, как они соотносятся с особенностями обработки зрительной информации. В эстетике они отражают стремление сознания к сложности, насыщенной смыслом, но не перегруженной. В познании они выступают не как утверждение об устройстве мира, а как способ выстраивать образы из фрагментов, наводить структуру на то, что по своей природе может оставаться расплывчатым и неупорядоченным. Фракталы становятся не зеркалами реальности, а проекцией человеческой способности видеть ритм в колебаниях и порядок в неоднородности.

Зрительная система человека эволюционно настроена на восприятие фрактальных узоров средней сложности — тех самых, что часто встречаются в природной среде:

очертания ветвей деревьев, очесы облаков, неровности скал. Эти фракталы с размерностью около 1,3–1,5 представляют собой тот визуальный диапазон, который обрабатывается особенно легко, но при этом остаётся достаточно насыщенным, чтобы поддерживать внимание. Данные наблюдений, включая отслеживание движений глаз, регистрацию электрической активности мозга и функциональную МРТ, подтверждают: именно такие узоры вызывают устойчивые нейронные реакции, повышают фокусировку, активизируют распознавание образов и способствуют снижению уровня стресса. Это говорит о том, что фракталы воспринимаются не просто как эстетически приятные формы — они выступают в роли оптимальных стимулов, подстроенных под структуру восприятия.

Согласно теории когнитивной лёгкости, любое изображение, которое мозг обрабатывает без напряжения, вызывает положительное эмоциональное впечатление. И фракталы средней размерности как раз попадают в это «когнитивное окно» — они достаточно сложны, чтобы не быть скучными, но не настолько избыточны, чтобы вызывать перегрузку. Визуальное удовольствие от таких узоров формируется на стыке простоты распознавания и скрытой активации нейронных центров вознаграждения. Это эстетическое переживание, выстроенное на биологических механизмах, уходит корнями глубоко в ту область, где взаимодействуют автоматизм восприятия и тонкая настройка эмоционального отклика.

Нейроэстетика, стремящаяся понять, как мозг

воспринимает и оценивает красоту, выделяет целую сеть зон, участвующих в этом процессе. Восприятие фрактальных форм, особенно тех, что соответствуют среднему уровню сложности, задействует первичную зрительную кору, дополнительные зрительные области и центры эмоционального отклика, включая медиальную орбитофронтальную кору. Исследования показывают, что при взгляде на архитектурные формы с фрактальной организацией активизируются участки, связанные с вниманием, регуляцией эмоций и оценкой значимости. Возникает впечатление, что восприятие этих структур происходит не в изоляции, а при участии обширной нейронной сети, синхронизированной между визуальными, эмоциональными и мотивационными центрами.

Нейрофизиологические данные подтверждают эту взаимосвязь. Мозговые волны, фиксируемые при помощи ЭЭГ, изменяются при наблюдении фракталов: они отличаются от реакций на нефрактальные образы по структуре колебаний. ФМРТ показывает точечную активацию в зонах, связанных с вниманием и системой вознаграждения. Эти наблюдения укладываются в рамки теорий биофилии и восстановления внимания, согласно которым контакт с природоподобными, легко воспринимаемыми структурами помогает восстановить умственные ресурсы, не требуя при этом значительных когнитивных усилий. Фракталы, оказываясь именно такими структурами, выполняют роль нейропсихологической разгрузки.

Значение таких узоров выходит за пределы чисто

зрительного восприятия. Исследования показывают, что фрактальные сцены, особенно подвижные — например, естественные видеозаписи леса, текущей воды или движущихся облаков — активизируют не только зрительную зону, но и области, связанные с памятью (гиппокамп), а также с эмоциональной оценкой (инсулa, поясная кора). Это говорит о том, что взаимодействие с фракталами задействует не только восприятие, но и более глубокие уровни обработки, связывающие чувства, воспоминания и ментальные состояния в единую цепочку.

Появляющиеся сегодня исследования идут ещё дальше, предполагая, что фрактальность — это не только характеристика воспринимаемых форм, но и свойство самого мозга. Первые работы в области картирования нейронных сетей показывают, что и анатомические связи, и функциональные паттерны активности мозга могут напоминать фрактальные сети. Это наводит на мысль, что не только мир, но и сама структура нервной системы организована по подобным законам. Если эта гипотеза получит развитие, фрактальная геометрия станет не просто языком описания визуальных форм, а универсальной моделью для понимания самого процесса мышления и восприятия.

Фрактальная беглость, таким образом, оказывается не случайной особенностью восприятия, а результатом глубокой биологической настройки, обеспечивающей когнитивную эффективность и эмоциональное благополучие. Средние фракталы — это как будто визуальный компромисс между предсказуемостью и

хаосом, который запускает внутренние механизмы удовольствия, внимания и восстановления. Возникает образ двойной отражённости: природные структуры и структура мозга откликаются друг другу, находя в фрактальной геометрии общий язык, на котором ведётся разговор между внешним и внутренним.

Фракталы, как концепция, оказались в уникальной позиции между восприятием и абстракцией, между эстетическим откликом и строгим формализмом. Оценка их «индекса реальности» с точки зрения устойчивости к искажениям, присущим эволюционно сформированному восприятию и культурной обусловленности, позволяет рассматривать фракталы не просто как визуальные или математические объекты, но как концептуальный лакмус: насколько независимы они от человеческой предвзятости и когнитивных упрощений.

Начав с сенсорной зависимости, можно заметить, что большинство людей впервые сталкиваются с фракталами на уровне ощущений — в природных формах, таких как побережья, ветви деревьев, облачные массы. Эти образы укоренены в чувственном опыте, что делает фракталы наглядными и доступными. Однако идеальные формы фракталов, обладающие бесконечной вложенностью и дробной размерностью, уже не поддаются прямому восприятию, они существуют в чисто теоретической плоскости. Это разделение между эмпирическим и абстрактным создаёт напряжение: фракталы одновременно доступны взгляду и ускользают от него.

Лингвистическое оформление понятия «фрактал» в значительной степени опирается на метафоры, пришедшие из обыденной речи — «масштабирование», «вложенность», «разветвление». Но, несмотря на это, сама математическая суть фракталов сохраняется при передаче между языками и культурами. Благодаря символическому характеру формализма, фракталы существуют вне конкретной лингвистической структуры, что повышает их устойчивость к семантическим искажениям.

Эмоциональный отклик, особенно на фракталы, встречающиеся в природе, говорит о глубокой связи между эстетическим восприятием и эволюционными механизмами. Умеренная сложность, присущая фракталам средней размерности, вызывает чувство покоя и визуального удовлетворения. Этот отклик формируется не только как индивидуальный, но и как универсальный — выражение биологически обусловленной тяги к структурам, обещающим безопасность или ресурсность. Однако при переходе к абстрактным фракталам эмоциональное вовлечение снижается, что указывает на частичную, но не полную зависимость от аффективных факторов.

С точки зрения приспособительной пользы предпочтение определённых фрактальных структур, таких как ветвящиеся деревья или речные системы, вероятно, давало преимущество в распознавании среды. Тем не менее, сама концепция фракталов, в её

современной формулировке, не имеет прямой выживающей функции — она появилась как результат высокого уровня абстракции, хотя и сформирована в рамках тех же механизмов восприятия, что некогда помогали ориентироваться в природе.

Культурная независимость фракталов проявляется в том, что они не требуют общественного согласия для своего существования. Их математическое определение объективно, и хотя культура влияет на осведомлённость, сама концепция не формируется под влиянием идеологии или традиции. Это позволяет рассматривать фракталы как относительно чистый пример знания, минимально подверженного социальным искажениям.

Фракталы также демонстрируют сопротивление бинарной логике: они не сводятся к противоположностям, не вписываются в привычные «да/нет»-категории. Их структура континуальна, а не дискретна, они существуют в промежуточных состояниях, между точкой и плоскостью, между хаосом и порядком. Это делает их особенно ценными как формы, противостоящие редукционизму.

Вопрос наблюдатель — объект в случае фракталов принимает интересную форму. С одной стороны, их узнавание требует когнитивной активности, и восприятие фрактальности предполагает наличие наблюдающего субъекта. С другой — математические формулы и свойства фракталов остаются неизменными вне зависимости от того, есть ли наблюдатель. Это создаёт частичную независимость от субъективной

позиции, при том что феноменологический отклик остаётся активным.

Метафорическая нагрузка фракталов заметна в их языковом оформлении: мы говорим о «ветвлении», «масштабировании», «увеличении» — всё это визуальные образы, взятые из реального опыта. Однако математическое содержание этих понятий часто уходит за пределы чувственного понимания, сохраняя автономию от метафорического восприятия.

Отсутствие телеологической направленности — ещё одна черта, выделяющая фракталы. Они не подразумевают цели или замысла, их структура формируется механически, по определённым алгоритмам. Даже в искусстве или дизайне, где фракталы могут быть использованы с определённым намерением, их внутренняя логика лишена телеологического начала. Это придаёт им высокую степень концептуальной чистоты.

Когнитивная доступность фракталов двойственна: с одной стороны, повторяющиеся формы легко узнаваемы, их можно обнаружить в деревьях, облаках, рисунках. С другой — полное понимание требует освоения понятий дробной размерности, бесконечной рекурсии и нелинейной динамики. Это делает фракталы одновременно интуитивными и ментально сложными, требующими перехода от образного к абстрактному мышлению.

Итоговая оценка — 2.65 из 5.0 — указывает на умеренную устойчивость фракталов к когнитивным искажениям. С одной стороны, они глубоко связаны с человеческим восприятием, опираются на эволюционно закреплённые предпочтения и культурные ассоциации. С другой — их математическое ядро сопротивляется упрощению, сохраняет независимость от субъективного опыта и демонстрирует внутреннюю целостность. На пересечении природных узоров и формальной строгости, фракталы выступают как символ двойственного способа постижения мира: через образ и структуру, через чувство и абстракцию.

Тем не менее, вокруг их познавательного статуса не утихают споры. Одни полагают, что фракталы — это не более чем ментальные проекции, навязанные природным объектам. Другие настаивают на том, что фракталы отражают реальную, пусть и неочевидную, структуру природы. Ответ на этот вызов требует дальнейшего изучения — не только математического, но и философского.

Возражение о том, что фракталы существуют в природе независимо от человеческого сознания, основано на наблюдаемом присутствии фрактальных структур — от ветвей деревьев до облаков и русел рек. Однако такое утверждение не учитывает различие между наблюдаемой формой и её математической интерпретацией. Природные объекты действительно демонстрируют признаки самоподобия, но это

самоподобие всегда ограничено: оно прерывается на физических масштабах, подчиняется законам материи и теряет точность при приближении. Истинные фракталы — с бесконечной рекурсией и дробной размерностью — существуют лишь в абстрактной математике. Таким образом, фракталы в природе — это не сущности, а проявления, приближённые к модели, которую сознание выстраивает в попытке интерпретировать сложность окружающего мира.

Предположение о том, что эстетическое восприятие фракталов обусловлено исключительно культурными механизмами, также не выдерживает эмпирической проверки. Наблюдения, охватывающие разные возрастные группы и культуры, в том числе неиндустриализованные сообщества, подтверждают устойчивое предпочтение фракталов средней размерности. Эти формы вызывают схожие реакции у представителей разных народов, что прослеживается и в поведении детей, не подвергшихся длительному культурному влиянию. Нейрофизиологические данные показывают активацию одних и тех же участков мозга при восприятии фрактальных структур, что указывает на наличие универсальных механизмов зрительной обработки, лежащих в основе эстетического отклика. Следовательно, культурные коды могут влиять на оформление восприятия, но не являются его первичным источником.

Критика, утверждающая, что фрактальные модели — всего лишь удобные аналитические схемы, не имеющие отношения к глубинным структурам реальности,

содержит долю истины. Действительно, фракталы используются в первую очередь как инструменты описания, а не как конечные объяснения. Тем не менее, их применение в столь различных областях, как геология, медицина, биология и экономика, говорит о том, что они отражают повторяющиеся принципы организации сложных систем. Эти принципы могут быть приближёнными и не универсальными, но их повторяемость и прогностическая сила свидетельствуют о том, что фракталы фиксируют определённые регулярности в поведении нелинейных, многомасштабных процессов, что делает их больше, чем просто удобным приёмом.

Что касается утверждения о том, что увлечение фракталами связано с врождённой склонностью видеть закономерности там, где их нет, — это замечание, безусловно, затрагивает важный аспект человеческого восприятия. Но отличие фракталов от иллюзорных узоров в том, что они поддаются количественной проверке. Самоподобие, размерность, рекурсивность — всё это не эфемерные свойства, а измеряемые характеристики, которые можно описать и воспроизвести. Более того, использование фракталов в научном моделировании доказывает, что они работают не только как когнитивные «зеркала», но и как аналитические фильтры, помогающие упорядочить сложные и изменчивые системы.

Утверждение, что эстетическая привлекательность фракталов отвлекает от их научной значимости, опровергается современной нейронаукой.

Эмоциональный отклик — не побочный шум, а важный элемент когнитивной обработки. Эстетически насыщенные стимулы активируют зоны мозга, отвечающие за внимание, память, принятие решений. Это усиливает вовлечённость, способствует лучшему усвоению информации и даже повышает адаптацию к окружающей среде. Восприятие фракталов, вызывающее спокойствие или восторг, тем самым не только украшает знание, но и делает его глубже, связывая рациональное и чувственное в едином процессе осмыслиения.

Таким образом, несмотря на наличие проекций, предпочтений и инструментальной природы, фракталы сохраняют свою познавательную ценность. Их устойчивость в разных дисциплинах, постоянство в восприятии и широкая применимость указывают на то, что они фиксируют реальные закономерности, пусть и не в окончательном, фундаментальном смысле. В этом проявляется их сила — не как абсолютной истины, а как подвижного посредника между тем, что видит глаз, и тем, что выстраивает разум.

Несмотря на элегантность концепции и широкое применение, фракталы сталкиваются с рядом принципиальных ограничений, которые снижают их эпистемологическую стабильность и практическую универсальность. Одним из главных затруднений остаётся разрыв между математическим идеалом и физической реальностью. Истинные фракталы предполагают бесконечную вложенность и детальность, что невозможно реализовать в рамках материального

мира. Любое природное проявление фрактальности — будь то форма дерева, речная сеть или контуры облаков — всегда ограничено масштабом, временем и энергией. То, что принято называть «фракталом» в наблюдаемой природе, представляет собой лишь приближение, статистическое или структурное, но не полное совпадение с теоретическим образцом.

Не менее значимой оказывается проблема наблюдателя. Идентификация фрактальных структур часто осуществляется через механизмы распознавания паттернов, встроенные в человеческое восприятие. Это делает классификацию фракталов подверженной субъективным сдвигам: одна и та же структура может быть интерпретирована по-разному в зависимости от используемой методики, точности измерений или заранее заданного уровня допустимой самоподобности. Таким образом, фрактальность может в определённой степени быть результатом акта наблюдения, а не только свойством объекта.

Фрактальный анализ требует высокой точности в определении параметров. На результат влияет выбор диапазона масштабов, разрешающая способность выборки, границы исследуемого объекта. Даже незначительные вариации на входе могут привести к серьёзным расхождениям в оценке фрактальной размерности, что затрудняет воспроизводимость и усложняет интерпретацию результатов, особенно в условиях, где точность и устойчивость имеют решающее значение — например, в биомедицинских или климатических исследованиях.

Ещё одной ограничивающей стороной является склонность фрактальных моделей к упрощению. Хотя они прекрасно отражают геометрическую сложность, они могут упускать важные динамические характеристики систем, такие как обратные связи, временные эволюции или причинные взаимосвязи. Сосредоточенность на пространственной структуре без учёта временной изменчивости способна привести кискажённому или неполному пониманию изучаемого явления. В этом смысле фракталы выполняют описательную, но не объяснительную функцию, теряя статус универсального метода.

С теоретической точки зрения фракталы также находятся в промежуточном положении между моделью и утверждением о реальности. Их нельзя приравнять к фундаментальным законам природы вроде закона сохранения энергии или уравнений движения — они не объясняют поведение системы, а только воспроизводят её форму. Такая эпистемологическая неопределенность снижает вес фракталов как самостоятельных теоретических структур, хотя и не отменяет их аналитической пользы.

Однако многие из этих ограничений могут быть преодолены в рамках будущих направлений исследования. Развитие мультифрактальных и гибридных моделей способно существенно расширить выразительные возможности фрактального подхода. В отличие от традиционных монофракталов, основанных

на единой размерности, мультифракталы допускают наличие разных масштабов самоподобия в пределах одной системы. Объединение фрактального анализа с методами стохастики, теории сетей или моделирования на основе агентов создаёт перспективу более точного воспроизведения сложных биологических и социальных процессов.

Интерес вызывает также нейрокогнитивный аспект фрактального восприятия. Сочетание нейровизуализации (ЭЭГ, фМРТ) с поведенческими методами позволяет точнее понять, как мозг обрабатывает масштабные инвариантные структуры, какие нейронные сети при этом активируются и как это связано с вниманием, памятью и эмоциональной регуляцией. Эти данные могут оказаться важными не только для теории восприятия, но и для понимания психических состояний и расстройств.

Отдельное внимание заслуживают структурные и функциональные фрактальные черты в самом мозге. Первые исследования нейронных связей уже указывают на фрактальность как на возможный принцип организации нейросетей. Остаётся выяснить, соответствует ли этой структурной организации аналогичная динамика — если да, фракталы могут стать ключом к моделированию когнитивных процессов и новым подходам в нейротерапии.

Вопрос универсальности эстетического предпочтения фракталов по-прежнему остаётся открытым.

Сравнительные исследования между культурами, возрастами и когнитивными профилями помогут выяснить, действительно ли склонность к фрактальности является врождённой или всё же формируется в процессе обучения. Особенno интересны возможные различия у людей с расстройствами восприятия, такими как аутизм или ПТСР, где реакция на сложные визуальные паттерны может существенно отличаться от нормы.

Потенциально плодотворным направлением остаётся и применение фрактальных принципов в искусственном интеллекте. Архитектуры, основанные на само- масштабировании и рекурсивной логике, могут оказаться особенно эффективными в задачах распознавания образов, работы с многомасштабными данными и адаптивных вычислений. Биовдохновлённые алгоритмы, опирающиеся на принципы фрактальной организации, могут усилить устойчивость и гибкость интеллектуальных систем.

Наконец, по мере того как фракталы всё активнее внедряются в архитектуру, дизайн и урбанистику, возрастаёт необходимость в понимании социальных и этических последствий такого применения. Будущие исследования должны выработать эмпирически подтверждённые рекомендации, позволяющие использовать фрактальную эстетику с учётом культурных различий, психофизиологических реакций и контекста восприятия.

Фракталы, как и многое в современной науке,

оказываются не столько окончательной формой знания, сколько переходным состоянием — мостом между наблюдением, моделью и смыслом. Их ценность — не в безупречности, а в способности раскрывать сложность мира через формы, которые одновременно кажутся знакомыми и непредсказуемыми.

Фракталы занимают особое место на стыке математики, природы и человеческого восприятия, представляя собой не просто эстетически выразительные формы или любопытные геометрические парадоксы, но полноценные интеллектуальные конструкции, с помощью которых удаётся приблизиться к пониманию той части реальности, что ускользает от строгого порядка и линейных описаний. Природа, как она предстаёт в виде изломанных береговых линий, ветвящихся сосудов или экономических колебаний, отказывается быть гладкой, упорядоченной и предсказуемой. Именно в этой зоне, где регулярность сталкивается с флуктуацией, фракталы демонстрируют свою силу — не в том, чтобы дать окончательный ответ, а в способности предложить форму, в которой можно различить закономерности без насилия над сложностью.

И хотя фракталы повсеместно проявляются в эмпирических контекстах — от геофизики до нейроэстетики — их подлинная значимость раскрывается в роли когнитивных посредников. Они формируются как образы, рождающиеся на границе внешнего и внутреннего: с одной стороны, они вдохновлены природой, с другой — обработаны системой человеческого восприятия, эмоциональной

реакцией и абстрактным мышлением. Идеализированные фракталы, как таковые, не встречаются в физической реальности: они существуют в виде математических конструкций, где бесконечное самоподобие и дробная размерность возможны лишь в теоретическом пределе. То, что мы наблюдаем, — это приближённые формы, прерывающиеся в определённый момент, деформированные материальными условиями, но всё же достаточно структурированные, чтобы распознаваться как фрактальные.

Именно в этой двойственной позиции — между открытием и построением — фракталы обретают своё эпистемологическое лицо. Они одновременно находятся в окружающем мире и создаются в момент восприятия; они отражают действительность, но только после того, как она прошла через фильтры сенсорных, эмоциональных и вычислительных систем. Их архитектура, основанная на повторении и иерархии, почти инстинктивно воспринимается как выразительная и естественная, поскольку она перекликается с врождёнными механизмами обработки визуальной информации, сформировавшимися в условиях фрактально организованной природной среды.

Использование предложенного Индекса Реальности (AIRI) и структурированной системы оценки устойчивости фракталов к когнитивным искажениям позволяет прояснить это положение. Фракталы занимают промежуточную позицию: они не растворяются полностью в абстракции и не сливаются без остатка с физической природой. Они существуют как

карты, приближённые и условные, но точные настолько, насколько может быть точной любая модель, создаваемая разумом для описания мира. В этом смысле фракталы — это форма компромисса между недоступной полнотой реальности и возможностями человеческого мышления.

Разнообразие сфер, где фракталы оказываются продуктивными — от медицины и урбанистики до цифрового моделирования и терапии, — подчёркивает их инструментальную ценность. Однако их уязвимость к методологическим неточностям, зависимость от точки наблюдения, ограниченность масштабом и неустоявшаяся эпистемологическая роль требуют более внимательной теоретической проработки. Будущие исследования смогут раскрыть фрактальную тему глубже, если обратятся к культурным, нейрофизиологическим и онтологическим основаниям: не только как к инструменту анализа, но как к знаку того, как человек воспринимает сложность и формирует смысл.

В конечном счёте, фракталы становятся выразительным примером того, как знание развивается на границе между упорядочиванием и отказом от упрощения. Они не являются истиной в абсолютном смысле, но и не сводятся к иллюзии; они представляют собой символическую форму, с помощью которой разум организует хаос, не разрушая его структуру. Их устойчивость в научном и эстетическом дискурсе говорит о том, что фракталы — это не просто способ описания внешнего мира, но и отражение внутренней

архитектуры самого познающего субъекта.

## БІБЛІОГРАФІЯ

Kriger, B. (2025). Fractals as cognitive interfaces: Exploring the role of consciousness in the perception of natural complexity. Global Science News

Kriger, B. (2025). *Anthropic-independent reality index: A framework for measuring conceptual distortion under anthropic-bound cognitive constraints.* Global Science News.

Batty, M., & Longley, P. (1994). Fractal cities: A geometry of form and function. Academic Press.

Ebert, D. S., Musgrave, F. K., Peachey, D., Perlin, K., & Worley, S. (2003). Texturing and modeling: A procedural approach (3rd ed.). Morgan Kaufmann.

Gallos, L. K., Makse, H. A., & Sigman, M. (2012). A small world of weak ties provides optimal global integration of self-similar modules in functional brain networks. Proceedings of the National Academy of Sciences, 109(8), 2825–2830.

Gleick, J. (1987). Chaos: Making a new science. Viking.

Goldberger, A. L., Amaral, L. A. N., Hausdorff, J. M., Ivanov, P. C., Peng, C.-K., & Stanley, H. E. (2002). Fractal dynamics in physiology: Alterations with disease and aging. Proceedings of the National Academy of Sciences, 99(Suppl 1), 2466–2472.

Lovejoy, S., & Schertzer, D. (2013). The weather and climate: Emergent laws and multifractal cascades. Cambridge University Press.

Mandelbrot, B. B. (1982). The fractal geometry of nature. W. H. Freeman and Company.

Milne, B. T. (1992). Spatial aggregation and neutral models in fractal landscapes. *The American Naturalist*, 139(1), 32–57.

Peters, E. E. (1994). Fractal market analysis: Applying chaos theory to investment and economics. John Wiley & Sons.

Smith, T. G., Lange, G. D., & Marks, W. B. (2014). Fractal methods and results in cellular morphology — Dimensions, lacunarity and multifractals. *Journal of Neuroscience Methods*, 69(2), 123–136.

Spehar, B., Clifford, C. W. G., Newell, B. R., & Taylor, R. P. (2003). Universal aesthetic of fractals. *Computers & Graphics*, 27(5), 813–820.

Taylor, R. P. (2006). Reduction of physiological stress using fractal art and architecture. *Leonardo*, 39(3), 245–251.

Taylor, R. P., Micolich, A. P., & Jonas, D. (1999). Fractal analysis of Pollock's drip paintings. *Nature*, 399(6735), 422.

Taylor, R. P., Spehar, B., Van Donkelaar, P., & Hagerhall, C. M. (2005). Perceptual and physiological responses to Jackson Pollock's fractals. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9(15), 1–13.

Turcotte, D. L. (1997). Fractals and chaos in geology and geophysics (2nd ed.). Cambridge University Press.

Vessel, E. A., Starr, G. G., & Rubin, N. (2012). The brain on art: Intense aesthetic experience activates the default mode network. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6, 66.

Werner, D. H., & Mittra, R. (1999). *Frontiers in electromagnetics*. IEEE Press.

Zaidel, D. W., & Hessamian, M. (2010). Asymmetry and symmetry in the beauty of human faces. *Symmetry*, 2(1), 136–149.