

УДК 69+504+517

## **ФРАКТАЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА: ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ**

### **Маяцкая Ирина Александровна**

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Соппротивление материалов» ФГБОУ ВО «Донской государственной технической университет» (г.Ростов-на-Дону, пл. Ю.Гагарина 1); e-mail: [irina.mayatskaya@mail.ru](mailto:irina.mayatskaya@mail.ru);

### **Языев Батыр Меретович**

докт. техн. наук, профессор, профессор кафедры «Соппротивление материалов» ФГБОУ ВО «Донской государственной технической университет» (г.Ростов-на-Дону, пл. Ю.Гагарина 1); e-mail: [ps62@yandex.ru](mailto:ps62@yandex.ru);

### **Языева Светлана Борисовна**

канд. техн. наук, профессор, профессор кафедры «Строительство уникальных зданий и сооружений» ФГБОУ ВО «Донской государственной технической университет» (г.Ростов-на-Дону, пл. Ю.Гагарина 1); e-mail: [iskra1917@bk.ru](mailto:iskra1917@bk.ru);

**Аннотация:** Архитекторы прошлого широко использовали принцип фрактального строения. Элементы зданий являются отдельными элементами, которые представляют собой самоподобные объекты. В статье приведены примеры различных уникальных сооружений прошлого и настоящего. Современный подход в развитии фрактальной архитектуры позволяет архитекторам создавать удивительные сооружения, вести поиск самых необычных форм и гармонии упорядоченных структур и динамики хаоса.

**Ключевые слова:** модель, объект, конструкция, форма, сооружение, архитектура, фрактал, самоподобие

## **FRACTAL ARCHITECTURE: PAST, PRESENT, AND FUTURE**

### **Irina Mayatskaya**

Ph.D. in Engineering, associate professor of Strength of materials of Don State Technical University (DSTU); e-mail: [irina.mayatskaya@mail.ru](mailto:irina.mayatskaya@mail.ru);

### **Batyr Yazyev**

Doctor of Engineering, Professor, professor of Strength of materials of Don State Technical University (DSTU); e-mail: [ps62@yandex.ru](mailto:ps62@yandex.ru);

### **Svetlana Yazyeva**

Ph.D. in Engineering, professor of Construction of unique buildings and structures of Don State Technical University (DSTU); e-mail: [iskra1917@bk.ru](mailto:iskra1917@bk.ru);

**Abstract.** Architects of the past widely used the principle of fractal structure. Building designs are separate elements that are self-similar objects. The article presents examples of various unique

structures of the past and present. The modern approach to the development of fractal architecture allows architects to create wonderful structures, search for the most unusual forms and harmony of orderly structures and dynamics of chaos.

**Keywords:** model, object, structure, form, structure, architecture, fractal, self-similarity

Понятие «фрактал» пришло в архитектуру из фрактальной геометрии, основателем которой был Бенуа Мандельброт [1]. Он определил фрактал как структуру, состоящую из самоподобных объектов, ввел понятие дробной размерности. Термин «фрактал» происходит от слова «fractus» – изломанный, нерегулярный [2-4]. При определении этого понятия о нерегулярности забывают, а это очень существенное свойство фрактала. Если фрактал можно описать функцией, то свойство нерегулярности означает, что это функция не дифференцируема, не гладкая ни в какой точке. Да, основное свойство фрактала – это самоподобие (рис. 1). Но у них есть еще одно свойство, которое проявляется следующим образом: существуют объекты, проявляющиеся по мере увеличения числа деталей (рис. 2). Увидеть это явление стало возможным с появлением компьютерной техники.

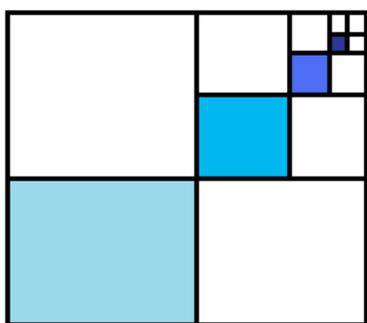


Рис. 1. Простая форма фрактала

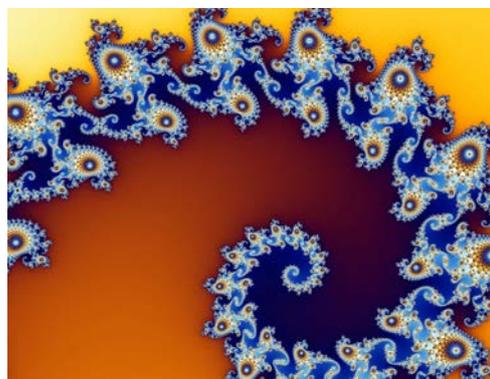


Рис. 2. Множество Жюлиа

Почти все природные явления имеют фрактальную структуру и фрактальные свойства [5 - 8]. Обычно фракталы классифицируют в следующем порядке: геометрические, алгебраические, стохастические и системы итерируемых функций.

Примерами геометрических фракталов являются: треугольник Серпинского, снежинка Коха, дракон Хартера-Хейтуэя, губка Менгера и другие

(рис. 3). Они получаются путем следующих построений: 1). задается начальная фигура; 2). задается процедура, которая определенным образом преобразует начальную фигуру; 3). далее бесконечно повторяется заданная процедура [1-4].

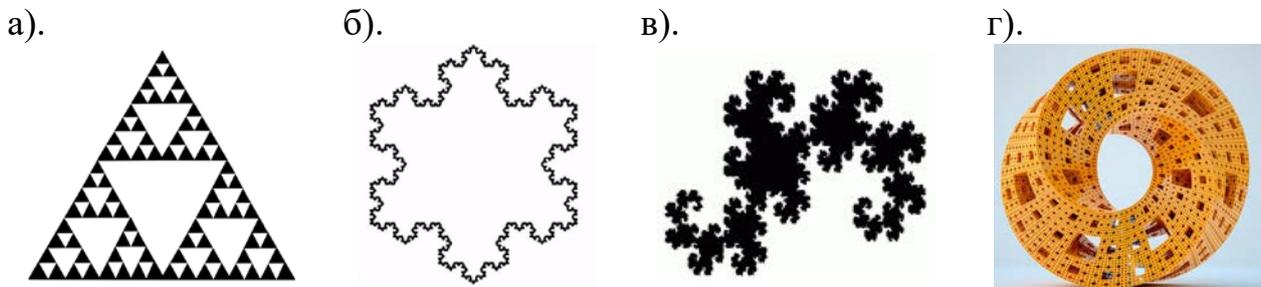


Рис. 3. Геометрические фракталы: а – треугольник Серпинского; б – снежинка Коха; в – дракон Хартера-Хейтуэя; г – губка Менгера

На рис. 4 показаны примеры построения фракталов Коха для незамкнутого и замкнутого контуров.

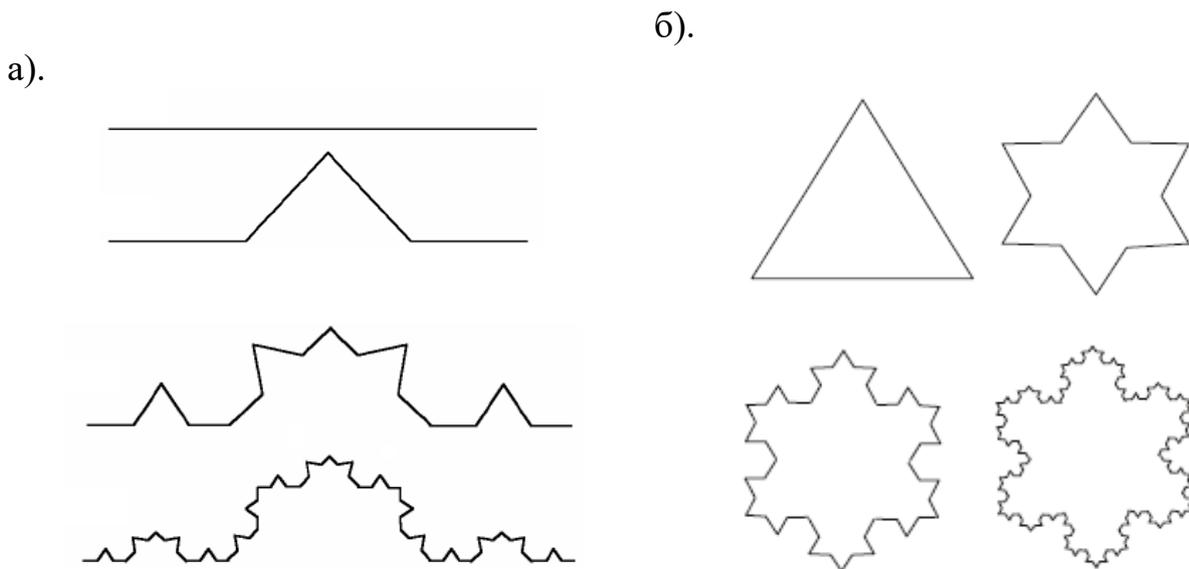


Рис. 4. Фракталы Коха: а – кривая Коха; б – снежинка Коха

Алгебраические фракталы строятся на основе алгебраических формул. Примером является множество Мандельброта (рис. 5), которое было построено в 1980 году. Фрактал Мандельброта описывается простой математической формулой в системе комплексных чисел:  $z \rightarrow z^2 + c$ . Стрелка  $\rightarrow$  означает итерацию, т.е. конечный результат последнего вычисления становится

начальной функцией следующего выражения:  $z^2 + c$  заменяется на  $z$  при последующем вычислении.

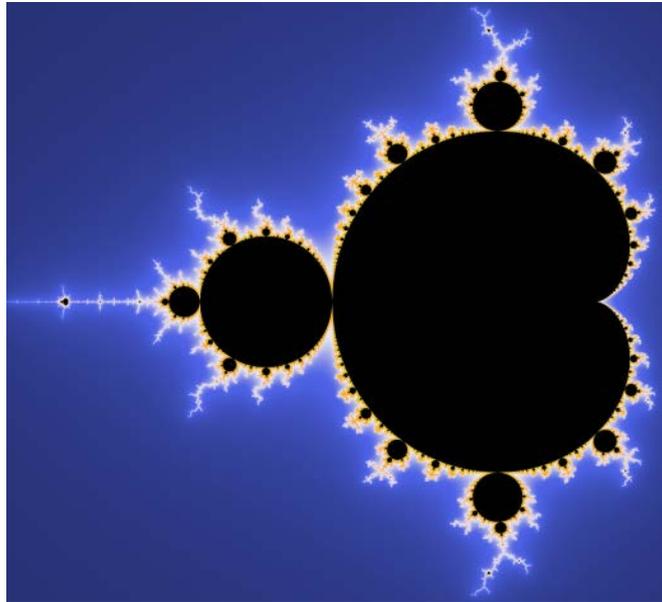


Рис. 5. Множество Мандельброта

Для стохастических фракталов характерно наличие параметров, которые имеют случайный характер. Двухмерные и трехмерные стохастические фракталы используются при моделировании растительных объектов, а также при построении моделей рельефа местности и различных поверхностей, например, строительных конструкций [9 - 12]. Геометрические фракталы образованы бесконечным повторением, в различных вариациях, простых форм. Сложные стохастические фракталы организованы по принципам нелинейной динамики, они хаотичны, нерегулярны.

На рис. 6 показаны фракталы, описывающие растительные объекты, которые построены с помощью систем итерируемых функций.

Для системы итерируемых функций (СИФ) существует следующая классификация: системы IFS (Iterated Function Systems) и L-системы. Системы IFS позволяют получать объект с использованием аффинных преобразований, которые приводят к масштабированию (уменьшению или увеличению)

исходного объекта. С помощью L-систем строят изображения путем проведения преобразований с геометрическими объектами по определенным правилам [5].

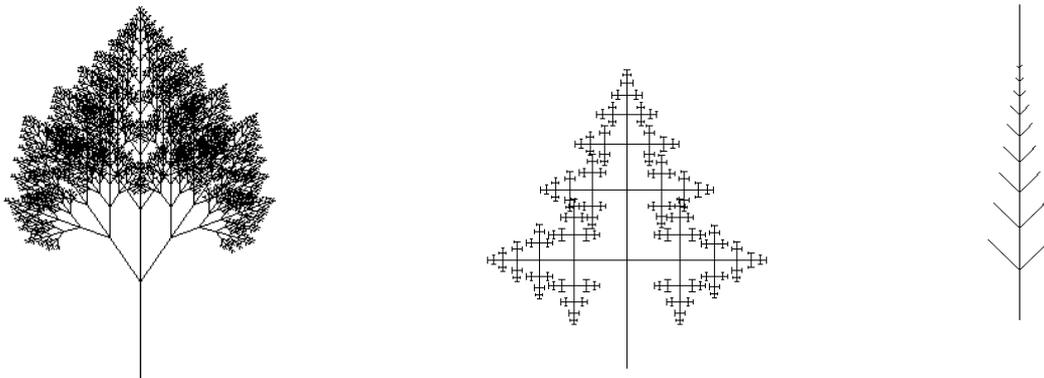


Рис. 6. Фракталы СИФ

Можно отметить, что снежинка Коха (рис. 4,б) и множество Мандельброта (рис. 5) – это два разных типа фракталов, которые имеют рекурсивную формулу и два типа самоподобия. Если для фигуры Коха присуще жесткое самоподобие, то для фрактала Мандельброта – нежесткое самоподобие. В архитектуре можем наблюдать конструкции с самоподобными и подобными формами с дробной размерностью, а также элементы почти похожие на первоначальный образ с нечеткими формами. В этом и проявляется такое свойство фрактала как нерегулярность. Это создает многообразие форм, необычную структуру организации архитектурного объекта [10 - 12].

В 1990-х годах началось бурное развитие цифровых технологий и внедрение программных комплексов при математическом моделировании объектов, а также в проектировании сооружений. Создавая модели с помощью компьютерных технологий, архитекторы смогли создать самые необычные здания, которые представляют собой объекты как бы из будущего, но они построены в наше время [13 - 16]. И много архитектурных сооружений, где применялся фрактальный принцип, остались пока только в проектных бюро. Но все равно этот подход имеет прогрессивное развитие.

Каждый новый проект или новая технология основывается в той или иной степени на тех знаниях и образах, которые уже применялись, только на другом

уровне понимания и восприятия. Происходит непрерывное развитие фрактальной архитектуры. И мы в будущем еще увидим много зданий и комплексов сооружений с самыми необычными архитектурными формами и организацией пространства, как в самом объекте, так и вокруг него [16 - 20].

Новый взгляд на окружающий нас мир привел к пониманию случайных и фрактальных процессов и явлений в самых разных областях науки, и в том числе в архитектуре.

В развитии фрактальной архитектуры можно выделить два этапа: интуитивный и осознанный. Многие памятники архитектуры имеют высокий уровень фрактальности. Принципы фракталоподобного формообразования в мировой архитектуре применялись многими архитекторами и строителями, которые создавали уникальные сооружения на основе опыта и интуиции. После создания фрактальной геометрии использование фрактальных алгоритмов построения элементов сооружений становится осознанным. И многие современные архитекторы в настоящее время используют фрактальные методы при проектировании и при анализе уже построенных уникальных зданий.

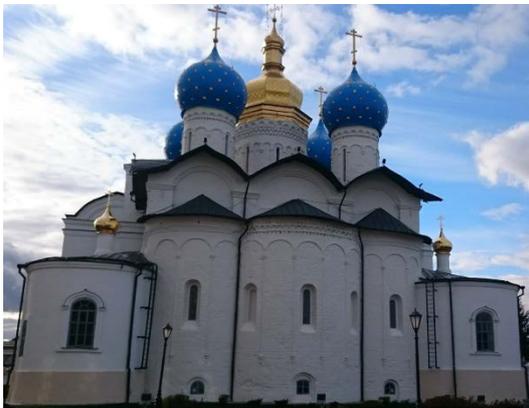
Фрактальный подход применяется как метод исследования, способ проектирования и моделирования архитектурных форм. Использование закономерностей в строении и организации природных объектов в формообразовании позволяет архитекторам создавать конструкции с фрактальной структурой. Интуитивная фрактальность присутствует во многих сооружениях мировой архитектуры, ярким примером могут быть творения Антонио Гауди (рис. 7) [21].

На рис. 8 и 9 – показаны примеры исторических и современных зданий с фрактальной архитектурой. Стремление вписать в окружающую среду фрактальные структуры может проявиться в подобии линий, форм и поверхностей архитектурных элементов природным объектам.



Рис. 7. Фрактальные элементы в творениях А. Гауди.

а).



б).



Рис. 8. Исторические сооружения:  
а – православный храм, Казань; б – здания в центре Лондона

а).



б).



Рис. 9. Современные здания с фрактальной структурой фасада:  
а – стеклянные конструкции; б – композитные конструкции

Еще в XX веке в практике градостроительства применялись методы фрактального анализа. Многие архитекторы применяли методы архитектурного формообразования на основе фрактальной геометрии и нелинейной динамики. Примерами могут служить следующие сооружения:

- многофункциональный центр «Mixed use Tower», Манчестер;
- жилой комплекс «VM Houses», Копенгаген;
- жилой комплекс «Magic Mountains», Чунцин и другие (рис. 10).

а).



б).



в).



Рис. 10. Уникальные сооружения современной фрактальной архитектуры:  
а – жилой комплекс «Magic Mountains»; б – жилой комплекс Вайле, Дания;  
в – жилой дом Даниэля Либескинда, Берлин

Архитектурные элементы, декор, узоры орнаментов решеток и оград могут также представлять собой удивительные фракталы (рис. 11 и 12).



Рис. 11. Примеры элементов фрактального декора.



Рис. 12. Удивительное внутреннее пространство мечети в Казани.

Комплекс зданий «Вертикальный лес» (Bosco Verticale), Милан, – это две башни высотой 76 и 110 метров с озелененными фасадами, которые имеют фрактальное строение (рис. 13). Этот проект построен на принципах фрактальной архитектуры и зеленого строительства. Это лучшие небоскребы в Европе.



Рис. 13. Комплекс зданий «Bosco Verticale», Милан

В Шанхае был построен удивительный небоскреб «Шанхайская башня» (Shanghai tower), который занимает одно из первых мест в рейтинге высоких зданий мира (рис. 14).

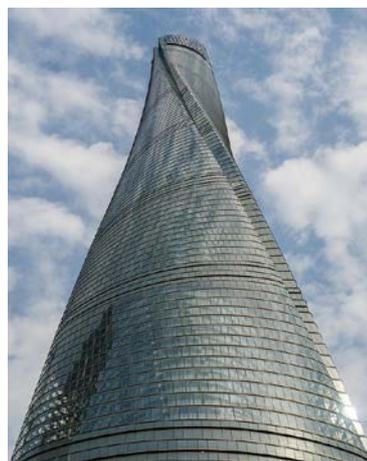


Рис. 14. Небоскреб «Shanghai tower», Шанхай

Здесь четко прослеживаются два свойства фрактальной геометрии: дисимметрии и скейлинга. Дисимметрия – это единство симметрии и

асимметрии, а скейлинг – изменяющееся подобие или подобие со скольжением. Блоки башни имеют подобную форму в сочетании с перекрученным по высоте здания фасадом. Это сооружение символизирует тенденции архитектуры в будущем. Не только эстетическая составляющая конструкции говорит о удивительном проекте, но и спиралевидная цилиндрическая форма с расширенным основанием делает высокий объект более устойчивым.

Обычно в архитектуре применяются фрактальные алгоритмы по правилам построения структуры объекта с использованием ограниченного числа повторений, сменой правил, изменением жесткого подобия элементов сооружений (рис. 15). На основе анализа сооружений мировой архитектуры идет поиск гармонии и красоты архитектурных форм и важную роль в этом играют фрактальные структуры.

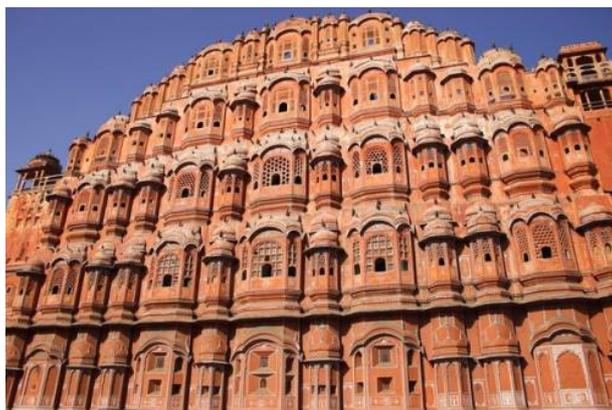


Рис. 15. Дворец ветров, Джайпур

Можем сказать, что фрактальный подход – это эффективный способ анализа уже построенных сооружений, так и способ проектирования таких архитектурных объектов, способных обогатить достижения мировой архитектуры. Например, великий А. Гауди пересмотрел свои взгляды на готическую архитектуру и создал формы лишь отчасти напоминающие здания, построенные в этом стиле (рис. 16). Он использовал фракталоподобные формы собора в виде природных объектов, создавая свой песчаный храм (рис. 17,а). Он

применял фрактальные элементы и внутри сооружения (рис. 17,б). Антонио Гауди создал величайший мировой шедевр в архитектуре и поставил высокие рамки для других архитекторов. Он стал основоположником архитектурной бионики, которая применяет методы фрактальной архитектуры. Эти два направления взаимно пересекаются в творениях великого архитектора.



Рис. 16. Собор в готическом стиле, Испания

а).



б).



Рис. 17. Собор Святого Семейства, Барселона, Испания:  
а – общий вид; б – внутреннее пространство

Нужно проводить дальнейшие исследования, связанные с фрактальным анализом. В фрактальной архитектуре применяются следующие принципы: самоподобие; динамичность, способность к развитию; нерегулярность;

рекурсивность; дробность. С помощью фрактальных принципов можно создавать удивительные по форме объекты архитектуры, изучать архитектурную композицию зданий, проектировать сооружения с рациональной организацией пространства и учетом экологических требований окружающей среды.

Использование фрактальных структур в процессе архитектурного формообразования позволяет сформировать гармоничное сочетание иррационального и рационального, что представляет изучать тенденции при прогнозировании архитектурного облика городов.

Применение повторяющихся самоподобных форм широко распространено в проектировании самых разнообразных сооружений. Архитектурные фрактальные структуры более упорядочены, чем природные.

В прошлые года архитекторы часто применяли самоподобные элементы при строительстве зданий. И хотя часто архитектурные элементы были одинаковыми, сам талант архитектора в организации пространства и фасада делали эти сооружения уникальными и неповторимыми. Примером фрактальной архитектуры прошлого является замок Кастель дель Монте (рис. 18). Он представляет собой в плане правильный восьмиугольник, к вершинам которого пристроены восемь башен также имеющих в сечении восьмиугольник.



Рис. 18. Замок «Castel del Monte»

Архитекторы нашего времени ведут поиск графических фрактальных образов, архитектурных форм в 2D и 3D форматах, привлекают к исследованию

методы имитационного компьютерного моделирования. В будущем проектировщики все чаще будут использовать цифровые технологии не только при проектировании сооружений, но и для поиска самых удивительных и неожиданных решений. Эталоном красоты становится не статичный объект, а след движения, изгиб, изломы поверхностей, мягкие формы, имитирующие линии живой природы. Фрактальные алгоритмы допускают сжатие, поворот, нелинейные преобразования исходной формы.

Красота фракталов выявила закономерности гармоничного развития мира, способствовала созданию уникальных сооружений современных архитекторов. Это стало возможным благодаря методам компьютерного моделирования и внедрения в практику проектирования цифровых технологий.

### Литература

1. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
2. Морозов А.Д.. Введение в теорию фракталов. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского университета, 2004. – 160 с.
3. Божочин С.В., Паршин Д.А. Фракталы и мультифракталы. — Ижевск,: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. — 128 с.
4. Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. – М.: Техносфера, 2006. – 488 с.
5. Маяцкая И.А., Медведева Т.А. Математическое моделирование растительных объектов с использованием элементов фрактальной геометрии // Системный анализ, управление и обработка информации. Труды VII международного семинара, 2016, С.44–49.
6. Маяцкая И.А., Еремин В.Д. Фрактальность природных объектов // Актуальные проблемы науки и техники: Материалы Национ. науч.-практ. конф., г.Ростов-на-Дону, 2019 / Дон. гос. техн. ун-т (ДГТУ). – Ростов-на-Дону, 2019. – С. 704-705.
7. Маяцкая И.А., Асланян А.Р. Фракталы вокруг нас // Актуальные проблемы науки и техники: Материалы Национ. науч.-практ. конф., г.Ростов-на-Дону, 2020 / Дон. гос. техн. ун-т (ДГТУ). – Ростов-на-Дону, 2020. – С. 1693-1695.
8. Маяцкая И.А. Распознавание природных объектов с фрактальной поверхностью.// Международный научно-исследовательский журнал, 2017.– № 7–3(61), С.54–58
9. Маяцкая И.А., Языева С.Б. Фрактальность в архитектуре // Актуальные проблемы науки и техники: Материалы Национ. науч.-практ. конф., г.Ростов-на-Дону, 2019 / Дон. гос. техн. ун-т (ДГТУ). – Ростов-на-Дону, 2019. – С. 705-708.
10. Маяцкая И.А., Беловолов М.Г. Применение фрактальных поверхностей при проектировании сооружений // Актуальные проблемы науки и техники: Материалы Национ. науч.-практ. конф., г.Ростов-на-Дону, 2020 / Дон. гос. техн. ун-т (ДГТУ). – Ростов-на-Дону, 2020. – С. 1695-1697

11. Yazyev V.M., Mayatskaya I.A., Yazyeva S.B., Yazyev S.B. Fractality in architectural forms and in organization of space in buildings // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – №698. CATPID-2019, 022087
12. Mayatskaya I.A., Yazyeva S.B., Kashina I.V., Nesterova A.N. The manifestation of fractality in the architecture of buildings and Structures // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – №698. CATPID-2019, 033046
13. Маяцкая И.А., Языева С.Б., Языев Б.М. Фрактальность и симметрия в архитектурных элементах сооружений // Строительство и техногенная безопасность, 2018. № 12 (64), С. 29-32.
14. Кушнер М. Будущее архитектуры. 100 самых необычных зданий.– М.: АСТ, 2016. – 176 с.
15. Трубе Г. Путеводитель по архитектурным формам. – М.: Архитектура – С, 2014. – 216 с.
16. Гнедич П.П. Мировая архитектура. – М.: Эксмо-Пресс, 2012. –240 с.
17. Mayatskaya I.A., Yazyev V.M., Yazyeva S.B., Kulinich P.V. Building Constructions : architecture and nature, //MATEC Web of Conferences. – 2017. – №106. SPbWOSCE-2016, 01031
18. Маяцкая И.А., Еремин В.Д., Языева С.Б. Зеленая архитектура: единство красоты природы, комфорта, экологичности и архитектурных форм // Строительство и архитектура. 2019. Т. 7. № 1. С. 91-96.
19. Mayatskaya I.A., Yazyeva S.B., Zakieva N.I., Lapina A.P Modern glass constructions and comfortable urban environment //Materials Science Forum, Vol.931. pp. 754-758
20. Mayatskaya I.A., Yazyeva S.B., Kolotienko M.A., Yazyev V.M. The use of glass structures in the design of unique structures // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – №698. CATPID-2019, 022083
21. Хенсберген Г.В. Гауди – тореадор искусства. –М. Эксмо-Пресс,2002. –358 с.

## References

1. Mandelbrot B. Fractal geometry of nature.– М.: Institute for Computer Research, 2002.– 656 p.
2. Morozov A.D. Introduction to the theory of fractals. – Nizhny Novgorod: Publishing house of the Nizhny Novgorod University, 2004. – 160 p.
3. Bozhochin S.V., Parshin D.A. Fractals and multifractals. – Izhevsk: SRC "Regular and Chaotic Dynamics", 2001. – 128 p.
4. Kronover R.M. Fractals and chaos in dynamical systems. – М.: Technosphere, 2006. – 488 p.
5. Mayatskaya I.A., Medvedeva T.A. Mathematical modeling of plant objects using elements of fractal geometry. // System analysis, management and information processing. Proceedings of the VII International Seminar, 2016, pp.44–49.
6. Mayatskaya I.A., Eremin V.D. Fractality of natural objects. // Actual problems of science and technology: Materials of the National scientific-practical Conf., Rostov-on-Don, 2019 / Don. State Tech. Un-t (DSTU). - Rostov-on-Don, 2019. – pp. 704-705.
7. Mayatskaya I.A., Aslanyan A.R. Fractals around us. // Actual problems of science and technology: Materials of the National scientific-practical Conf., Rostov-on-Don, 2020 / Don. State Tech. Un-t (DSTU). - Rostov-on-Don, 2020. – pp. 1693-1695.
8. Mayatskaya I.A. Recognition of natural objects with a fractal surface. // International research journal, 2017.– № 7–3(61), pp.54–58
9. Mayatskaya I.A., Yazyeva S.B. Fractality in architecture.// Actual problems of science and technology: Materials of the National scientific-practical Conf., Rostov-on-Don, 2019 / Don. State Tech. Un-t (DSTU). - Rostov-on-Don, 2019. – pp. 705-708.

10. Mayatskaya I.A., Belovolov M.G. The use of fractal surfaces in the design of structures.// Actual problems of science and technology: Materials of the National scientific-practical Conf., Rostov-on-Don, 2020 / Don. State Tech. Un-t (DSTU). - Rostov-on-Don, 2020. – pp. 1695-1697
11. Yazyev B.M., Mayatskaya I.A., Yazyeva S.B., Yazyev S.B. Fractality in architectural forms and in organization of space in buildings // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – №698. CATPID-2019, 022087
12. Mayatskaya I.A., Yazyeva S.B., Kashina I.V., Nesterova A.N. The manifestation of fractality in the architecture of buildings and Structures // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – №698. CATPID-2019, 033046
13. Mayatskaya I.A., Yazyeva S.B., Yazyev S.B. Fractality and symmetry in architectural elements of buildings] // Construction and technological safety, 2018. № 12 (64), pp. 29-32.
14. Kushner M. The future of architecture. 100 most unusual buildings.– M.: AST, 2016. – 176 p.
15. Trube G. Guide to architectural forms. – M.: Architecture – S, 2014. – 216 p.
16. Gnedich P. P. World architecture. – M.: Eksmo-Press, 2012. –240 p.
17. Mayatskaya I.A., Yazyev B.M., Yazyeva S.B., Kulinich P.B. Building Constructions : architecture and nature, //MATEC Web of Conferences. – 2017. – №106. SPbWOSCE-2016, 01031
18. Mayatskaya I.A., Eremin V.D., Yazyeva S.B. Green architecture: the unity of the beauty of nature, comfort, environmental friendliness and architectural forms. // Construction and architecture, 2019. T. 7. № 1. pp. 91-96.
19. Mayatskaya I.A., Yazyeva S.B., Zakieva N.I.,Lapina A.P Modern glass constructions and comfortable urban environment //Materials Science Forum, Vol.931. pp. 754-758
20. Mayatskaya I.A., Yazyeva S.B., Kolotienko M.A., Yazyev B.M. The use of glass structures in the design of unique structures // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – №698. CATPID-2019, 022083
21. Hensbergen G.V. Gaudi is the bullfighter of art. –M.: Eksmo-Press,2002.–358p.