

Н.В. КАСЬЯНОВ

АРХИТЕКТУРА, ПРИРОДА И ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ*

Kasyanov Nikolay.
Contemporary World's
Architecture, 1/2020.
Pp. 11–30

УДК 72.036

DOI 10.25995/
NIITIAG.2020.81.27.001

Поиски фундаментальной общности и отличий формообразования в архитектуре и природе требуют применения достижений науки и техники начала третьего тысячелетия, включая искусственный интеллект. Анализ и моделирование архитектурных объектов и принципов их построения во взаимосвязи с изучением природных явлений и ландшафтов ведут к выявлению не раскрытых ранее аспектов и возможностей формообразования. Результаты мировых исследований в области физико-математических наук способствуют развитию топологической теории морфогенеза, поисковым разработкам концепций самоорганизации, эмерджентности, «тенсегрити» и моделированию с применением фрактальной геометрии. Междисциплинарные подходы к решению проблем, актуальных для архитектуры и градостроительства, вовлекают также данные, полученные естественнонаучными, техническими и гуманитарными исследованиями. Комплексные решения этих проблем должны способствовать созданию более гуманистичной, комфортной и экологичной архитектурно-ландшафтной среды будущего.

Ключевые слова: — архитектура, природа, формообразование, междисциплинарность, самоорганизация, информационные технологии.

N.V. KASYANOV

ARCHITECTURE, NATURE AND INNOVATION TECHNOLOGY

The search for fundamental commonality and differences in shaping in architecture and nature requires the application of the achievements of science and technology at the beginning of the third millennium, including artificial intelligence. Analysis and modeling of architectural objects and the principles of their construction in interrelation with the study of natural phenomena and landscapes lead to the revealing of previously unknown aspects and possibilities of shaping. The results of world research in the field of physical and mathematical sciences contribute to the development of the topological theory of morphogenesis, the exploratory development of the concepts of self-organization, emergence, «tensegrity» and modeling using fractal geometry. Interdisciplinary approaches to solving problems relevant to architecture and urban planning also involve data obtained from natural science, technical and humanitarian investigations. Complex solutions to these problems should contribute to the creation of a more humanistic, comfortable and environmentally friendly architectural and landscape habitat in the future.

Keywords: architecture, nature, shaping, interdisciplinarity, self-organization, information technology.

Природный морфогенез осуществляется путем самоорганизации в неживой природе, биологический морфогенез направляется генетическими программами, в архитектуре же создание новых форм

Касьянов Николай Владимирович — кандидат архитектуры, советник РААСН, ведущий научный сотрудник филиала ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России» НИИТИАГ, зав. лабораторией архитектурного формообразования
E-mail: kas_nv@mail.ru

Kasyanov Nikolay — Ph.D. of architecture, Adviser of RAACS, Leading Researcher of the Branch of the Federal State Unitary Enterprise «Central Institute for Research and Design of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation» NIITIAG, Laboratory of architectural shaping

* Исследование выполнено за счет средств Государственной программы Российской Федерации «Развитие науки технологий» на 2013–2020 годы в рамках плана фундаментальных научных исследований Минстроя России и РААСН, тема 1.6.4.

представляет собой творческий процесс с осознанным или интуитивным применением некоторых закономерностей природного формообразования. В процессе моделирования формообразования достаточно простой набор правил приводит к появлению сложных паттернов. Компьютерное моделирование и использование когнитивных технологий применимо для анализа архитектурных форм с целью выявления закономерностей морфогенеза — как общих для неживых и живых систем, так и специфических особенностей архитектурного формообразования. Визуальные образы, модели и метафоры концепций современной науки могут быть применены не только в архитектурной теории, но и в практической работе архитекторов с целью поиска архитектуры, адекватной природному и историческому контексту.

Междисциплинарный подход раздвигает рамки научных исследований, способствует выявлению параллелизма архитектурного и природного формообразования, общих черт морфогенеза в живой и неживой природе и специфических отличий морфогенеза различных систем. Для теории архитектуры актуальны исследования глубинных механизмов архитектурного формообразования и самой формы в свете современных научно-технических достижений. Для более глубокого понимания закономерностей архитектурного формообразования необходим выход в обширную область исследований динамических нелинейных систем, свойства которых не сводимы к характеристикам их компонентов и проявляют вновь возникающие, или «эмерджентные» черты. Междисциплинарные исследования могут включать, помимо теории архитектуры, математику (топологию, теорию катастроф, фрактальную геометрию), биологию, кристаллографию, компьютерные и когнитивные технологии с использованием искусственного интеллекта, а также некоторые прикладные области (геоинформатику, инженерно-строительную геометрию). Поставленные задачи включают анализ существующих архитектурных форм, поиск алгоритмов и адекватных

ПРИМЕЧАНИЯ

¹ Thom R. (1969). *Topological models in biology*. *Topology*, 8: 313–335; Thom R. (1996). *Qualitative and quantitative in evolutionary theory with some thoughts on Aristotelian biology*. *Memorie della Societa Italiana di Scienze Naturali e de Museo Civico di Storia Naturale di Milano*. 27, 115–117.

моделей архитектурного формообразования, использование топологического подхода, применение информационно-компьютерных технологий в экспериментальном архитектурном проектировании.

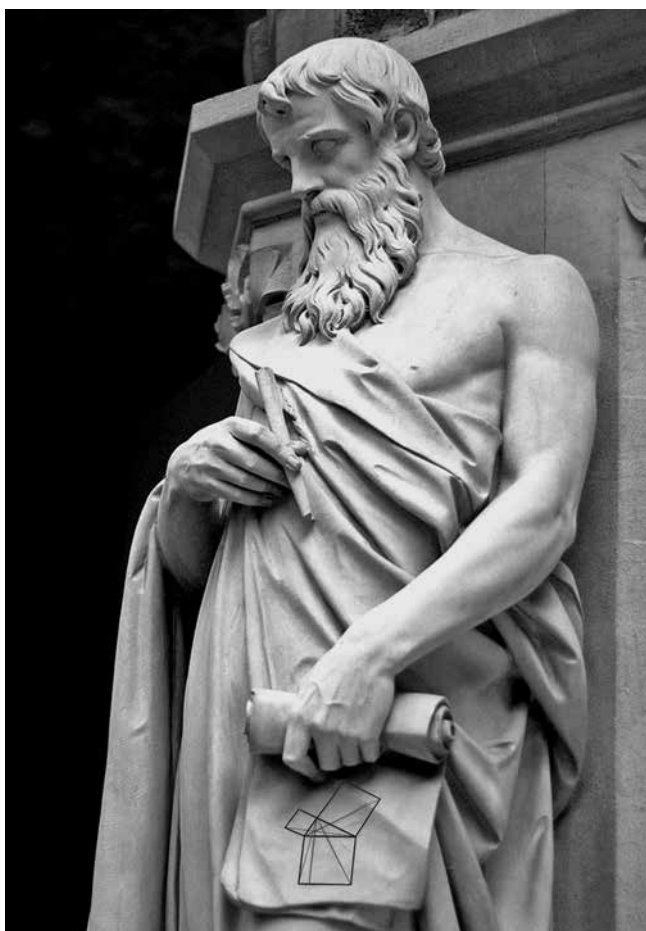
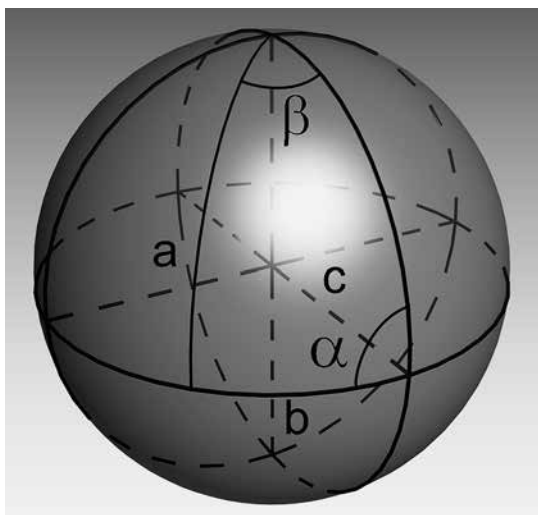
Исследования общности и отличий формообразования архитектурных и природных объектов, применение современных технологий в архитектуре и дизайне должны содействовать решению проблем органичного взаимодействия архитектуры и природной среды, способствовать созданию комфортной, гармоничной, экологичной архитектуры. Использование современных достижений науки в области теории архитектуры, создание и применение новых цифровых технологий позволяет говорить о появлении новой междисциплинарной области научных исследований, способной изменить принципы и концепции построения архитектурного пространства.

Архитектурное формообразование вовлекает преобразование форм, которые не всегда могут быть исчерпывающим образом описаны на языке традиционной евклидовой геометрии и, подобно природным формам, более адекватно анализируемы с использованием концепций и терминологии неевклидовой и фрактальной геометрии и топологии. Такой подход помогает выявить общие черты морфогенеза в живой и неживой природе, сходство и отличия природного и архитектурного формообразования.

Геометрия Евклида (илл. 1), созданная в III в. до н. э., представлена прямыми линиями и окружностями на плоскости. Геодезическая линия на плоскости — кратчайший путь между двумя точками, но на поверхности шара это часть окружности, образуемой сечением шара плоскостью, проходящей через центр шара. Сферическая геометрия (илл. 2) — геометрия геодезических линий на поверхности постоянной положительной кривизны; евклидова геометрия — геометрия геодезических линий на поверхности нулевой кривизны, на плоскости.

Анри Пуанкаре создал гиперболическую геометрию как геометрию геодезических линий на поверхности постоянной отрицательной кривизны; все евклидовы аксиомы отвечают требованиям этой геометрии, за исключением аксиомы о параллелях.

Абстрактная топологическая теория морфогенеза создана выдающимся математиком Рене Томом, создателем теории катастроф. Согласно Тому¹, реальность предстает перед нами в виде феноменов дискретных форм: любая форма и любой морфогенез — дискретное выражение свойств нашего пространства. Устойчивость любого организма и любой структурной формы основывается на ее геометрической сущности. Количественной мерой объекта как носителя информации является топологическая сложность его формы. Основные проблемы формообразования — топологические, поскольку именно топология изучает самые

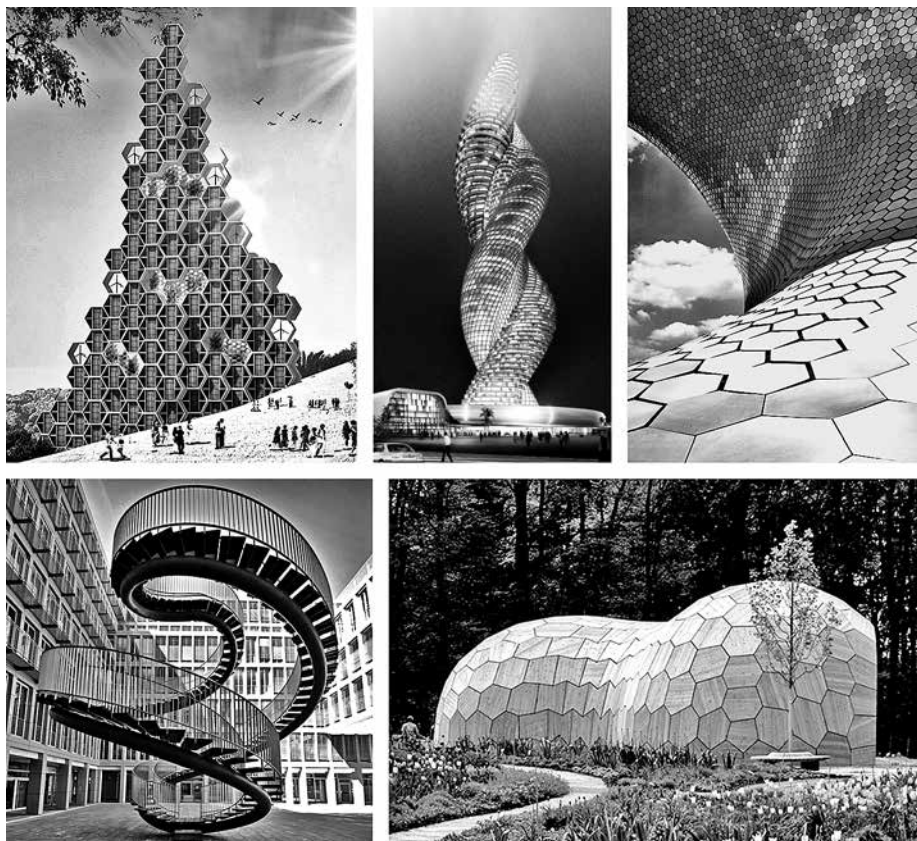


ИЛЛЮСТРАЦИИ

1. Статуя Евклида в Оксфордском университете. На свитке изображены геометрические взаимосвязи, которые имеют прямое отношение к архитектурному пропорционированию

2. Геометрия на сфере как важный для архитектуры пример поверхностей двойной кривизны

3. Архитектурные примеры спиральных и гексагональных структур



общие свойства пространств и позволяет переходить от локальных аспектов формообразования к глобальным. Р. Том различает статические и метаболические (динамические) формы, примерами метаболических форм называя струю воды, пламя, атмосферные вихри и живые существа.

Традиционные архитектурные формы статичны. Вектор гравитации неизбежно ведет к появлению различий между верхней и нижней частями архитектурного сооружения. В основе огромного разнообразия природных и антропогенных форм лежит ограниченное число базовых структур и паттернов, среди которых широко распространены фрактальные (спиральные, дендритные) структуры. Спиральная форма нередко встречается у живых существ. Симметрия — способ повторения структуры при формообразовании. Образование структур, подобных пчелиным сотам — рациональный способ компактного размещения множества одинаковых, исходно округлых частей. В архитектуре использование таких приемов встречается весьма нередко (илл. 3).

Фрактальная геометрия исследует преобразования симметрии с изменением масштаба. Простые алгоритмы фрактальной геометрии могут

порождать сложные формы нелинейных фракталов множества Мандельброта² (илл. 4) и множеств Жюлиа. С развитием аддитивных технологий можно ожидать возрастания интереса зодчих к таким формам.

Образование снежинки — пример природного морфогенеза, представляющего собой и фазовое превращение, и нарушение симметрии, и каскад бифуркаций, и фрактальное формообразование. Повторяющиеся в различных системах общие закономерности и численные соотношения нередко рассматриваются как сакральные, магические, привлекая внимание исследователей и архитекторов, как, например, золотое сечение и связанная с ним последовательность Фибоначчи. Ряд математических формул и теорем устанавливают закономерности формообразования: например, Л. Эйлер (илл. 5) показал, что число граней многогранника плюс число вершин всегда равно числу ребер плюс два.

Биологические структуры, оптимальные в контексте естественного отбора, являются также оптимальными в отношении минимизации функциональных затрат. Применительно к архитектурным

ИЛЛЮСТРАЦИИ

4. Б. Мандельброт

5. Л. Эйлер

6. Р. Фуллер и макеты его структур

ПРИМЕЧАНИЯ

² Mandelbrot B.B. *Form, Chance and Dimension*. Freeman, San Francisco. 1977. 365 p.; Mandelbrot B.B. *The Fractal Geometry of Nature*. Freeman, New York. 1983. 468 p.

³ Baldwin J. *Bucky works*. New York: Wiley. 1996. 243 p.



4



5



сооружениям Р.Б. Фуллером (илл. 6) сформулирован принцип минимакса, учитывающий соотношение затраченных материалов и прочности сооружения, а также соотношение площади поверхности и объема купола³.

В некоторых конструкциях эффективна реализация схемы «tensegrity» (от сочетания слов *tension* и *integrity*), где взаимодействует система жестких стержней и натянутых тросов. Стержни работают на сжатие, тросы на растяжение, в итоге конструкция устойчива к механическим

воздействиям; на основе этого принципа возможно создание и кинематических раздвигаемых объектов. Пока в архитектуре подобные системы не нашли широкого применения, лишь в дизайне (илл. 7). Очевидно, что при дальнейшем освоении морского, воздушного и космического пространства они будут востребованы.

В живой природе ветвящиеся фрактальные структуры организмов обеспечивают максимизацию площади обмена с окружающей средой при минимизации общего объема. Для биологического морфогенеза характерны проявления физической оптимизации как минимизации энергетической «стоимости» морфофункциональной организации биологических структур⁴.

В архитектурном формообразовании тоже неизбежны проявления минимизации стоимости. Требования экономичности, энергоэффективности, надежности хорошо известны зодчим и строителям, обычно стремящимся реализовать принцип минимизации затрат при проектировании и строительстве

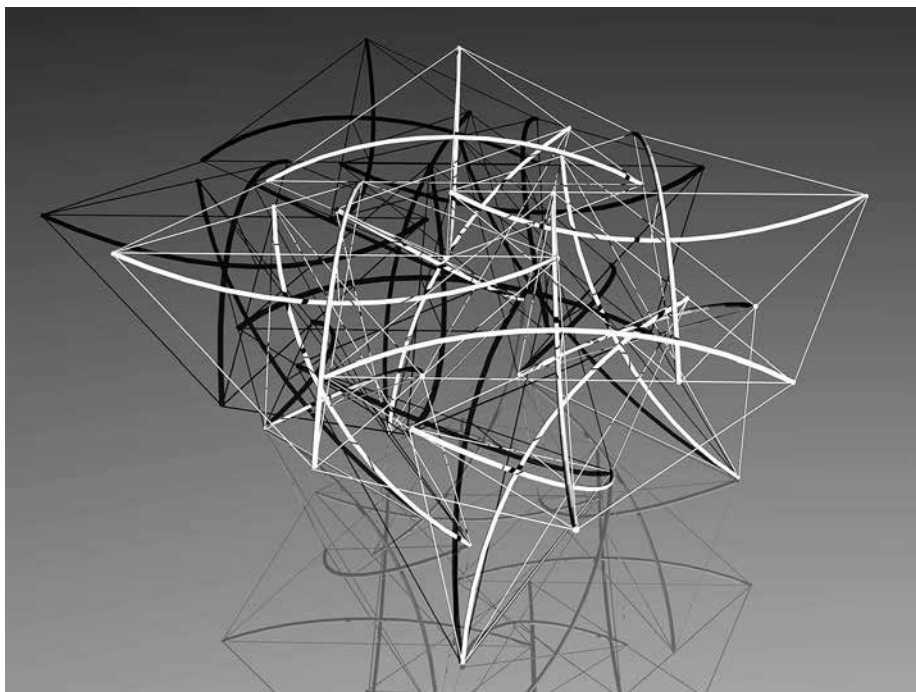
ИЛЛЮСТРАЦИИ

7. Визуализация инсталляции, демонстрирующей напряженную целостность

8. Тонкий слой раствора, в котором образуется рисунок в ходе реакции Белоусова — Жаботинского

ПРИМЕЧАНИЯ

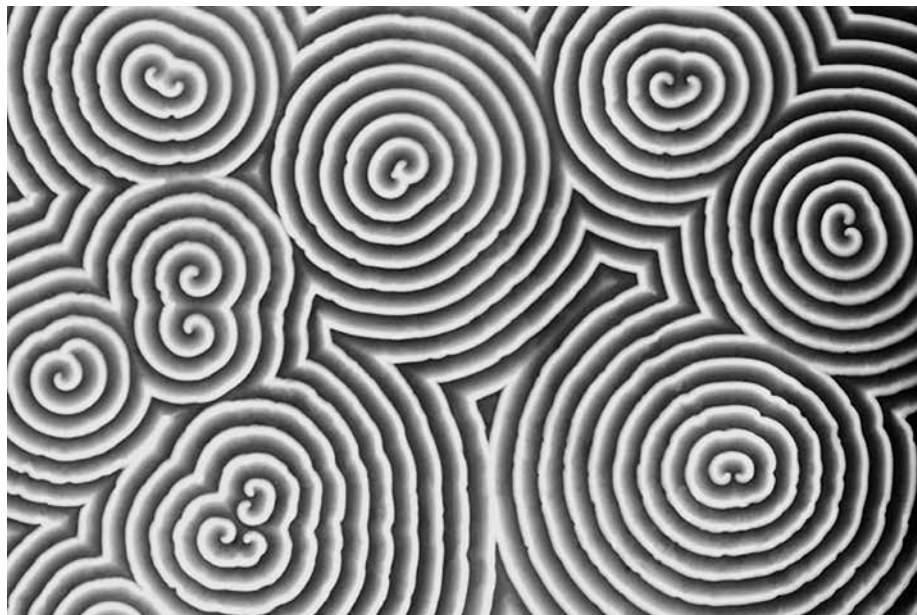
⁴ Damiani G. Evolutionary meaning, functions and morphogenesis of branching structures in biology // Nonnenmacher T.F., Losa G.A. and Weibel E.R. (Eds.). *Fractals in Biology and Medicine*. Birkhäuser Verlag, Basel. 1994. P. 104–115.



зданий различного назначения, хотя сооружения сакрального, идеологического назначения выпадают из этого правила — функция такой имиджевой архитектуры иная, требующая максимального эффекта и соответствующих затрат. Для таких объектов свойственно применение неканонических форм и нетривиальных геометрических образов в сочетании с большепролетными пространственными покрытиями.

Современная экологическая парадигма не отделяет людей и антропогенный мир от природного окружения, рассматривая их как часть единой сети экосистемы. Для анализа формообразования может быть использовано моделирование пространственной организации живых организмов и объектов архитектуры с применением фрактальных и топологических моделей. Концепции и методология междисциплинарной науки, в частности, фрактальной геометрии, успешно применяются в таких областях, как астрономия, физика, химия, экономика. Актуальны фундаментальные научные исследования, направленные на разработку нейроморфных вычислительных систем, создание сильного искусственного интеллекта.

Моделирование — один из основных методологических подходов к исследованию формообразования природных структур. Алан Тьюринг в 1952 г. теоретически установил, что в реакционно-диффузионных системах химических веществ могут спонтанно возникать различные упорядоченные, динамично преобразующиеся структурные паттерны. Позже была открыта реальная химическая модель — реакция Белоусова — Жаботинского (илл. 8), способная к подобному спонтанному



формообразованию. Подобные химические эксперименты и их компьютерные генерации, которые дают достаточно впечатляющие визуальные результаты, смогут найти применение, как минимум, в орнаменталистике.

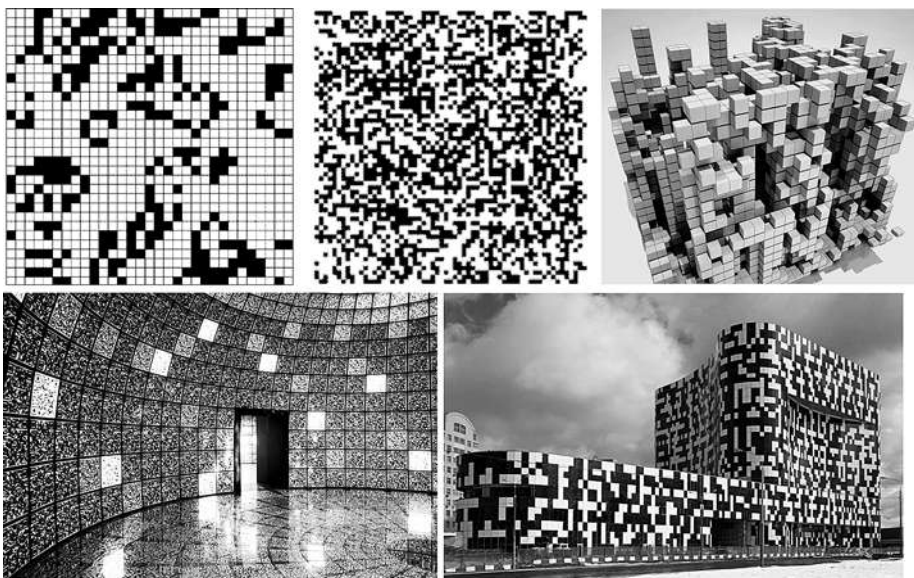
В 1960-е гг. Джон Конвей создал клеточный автомат «Игра Жизнь», включающий лишь черные и белые квадраты и всего три простых правила, дающих, однако, способность этой системы к образованию разнообразных пульсирующих, симметричных и перемещающихся конфигураций (илл. 9). При определенной комбинации подобные построения могут напоминать QR-код. Подобные изображения уже начали использовать в дизайне и архитектуре.

Фрактальная геометрия, топология и современные информационно-компьютерные технологии допускают потенциальную возможность корректного сжатого описания и моделирования архитектурного формообразования. Это позволяет сформировать эвристический взгляд на исследуемый объект, например, урбанистический кластер, моделируемый как хаотическая фрактальная агрегация. В итоге структура обладает общими

ИЛЛЮСТРАЦИИ

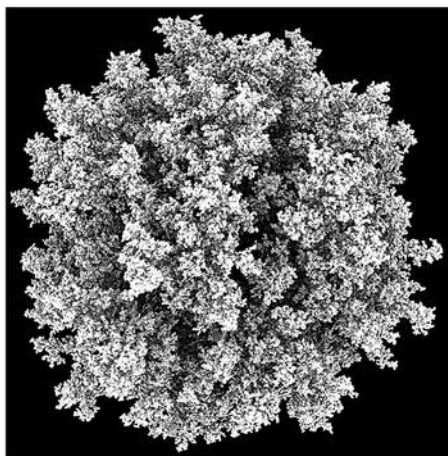
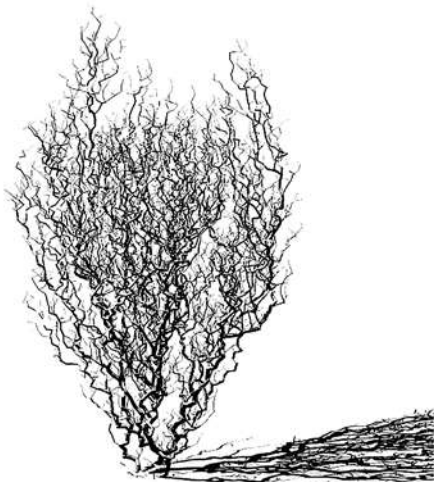
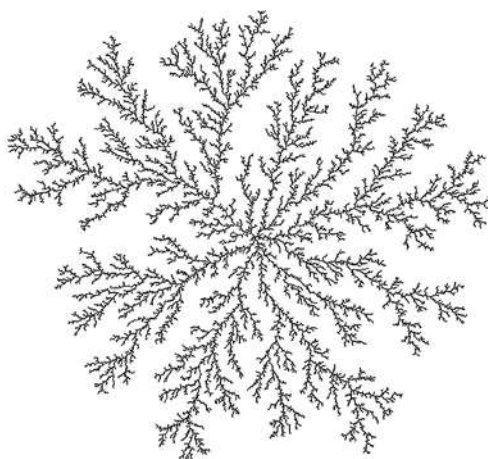
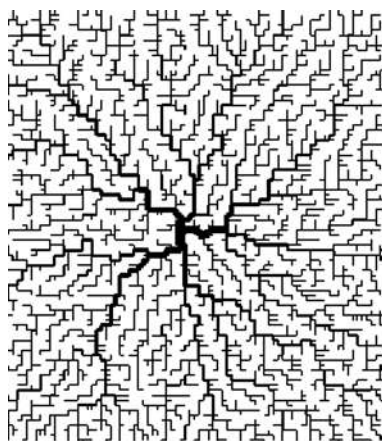
9. Примеры «клеточных автоматов» и их визуального воплощения в архитектуре

10. Примеры сгенерированных компьютером двумерных и трехмерных дендритоподобных структур



чертами с подобными кластерами живой и неживой природы. Методология имитационного компьютерного моделирования дает возможность экспериментального построения объектов виртуальной архитектуры и проектного поиска новых архитектурных форм.

Фрактальные алгоритмы и логарифмические закономерности — универсальные правила формообразования в природе и творчестве человека. Эти алгоритмы дают возможность построения фотореалистичных компьютерных ландшафтов виртуального мира; при этом подобие реальности достигается некоторой структурной нерегулярностью. Нелинейные фрактальные алгоритмы множеств Жюлиа и Мандельброта кодируют виртуальную динамику морфогенеза сложных форм. Для экспериментального построения виртуальных форм использованы, в частности, дискретные модели, относящиеся к классу клеточных автоматов, и модель агрегации (илл. 10), ограниченной диффузией (diffusion limited aggregation, DLA).



При таком моделировании весьма простой набор правил приводит к появлению сложных паттернов. Клеточные автоматы неоднократно применены для моделирования широкого спектра физических и биологических явлений. Разработанная исходно для моделирования морфогенеза физических фрактальных кластеров модель DLA⁵ была использована для имитации биологического морфогенеза, включая морфологию нейронов⁶. Поскольку многие природные объекты представляют собой фракталы с неоднородным распределением точек множества, или мультифракталы, для характеристики их морфологии перспективно использование анализа с несколькими последовательно сменяющимися друг друга алгоритмами⁷. Город в ландшафте — тоже иерархическая мультифрактальная система, включающая множество масштабов и несколько фрактальных алгоритмов. Варианты модели DLA могут имитировать векторизованный рост кластера (например, рост города вдоль таких природных ограничителей, как берег моря, реки) или взаимодействие хаотических фрактальных кластеров, создающих квазифрактальную сеть (например, мегаполис как ассоциацию нескольких городов). При этом трехмерные модели позволяют реалистично моделировать, например, древесно-кустарниковую растительность с учетом динамики ее роста. Фрактальность геоморфологии (илл. 11) и ее влияние на рост городов может учитываться при анализе и моделировании планов городов в соответствии с природным ландшафтом.

Развитие экологического сознания современного общества и стремление к созданию гуманистической архитектуры, органично вписывающейся в ландшафт, делает такого рода моделирование весьма актуальным.

Дробная (фрактальная) размерность служит показателем и мерой заполнения фрактальной структурой топологического пространства, в котором осуществляется морфогенез этой структуры. В качестве дополнительной характеристики фракталов Б. Мандельброт⁸ ввел понятие лакунарности как

ИЛЛЮСТРАЦИИ

11. Пример фрактальности ландшафтов планеты Земля

ПРИМЕЧАНИЯ

⁵ Witten T.A. and Sander L.M. Diffusion-limited aggregation, a kinetic critical phenomenon // *Physical Reviews Letters*. 1981. Vol. 47. P. 1400–1403.

⁶ Binzegger T., Douglas R.J. and Martin K.A.C. Axons in cat visual cortex are topologically self-similar // *Cerebral Cortex*. 2005. Vol. 15. P. 152–165; Caserta F., Stanley H.E. and Eldred W.D. Physical mechanisms underlying neurite outgrowth; a quantitative analysis of neuronal shape // *Physical Review Letters*. 1990. Vol. 64. P. 95–98.

⁷ Fernandez E., Bolea J.A., Ortega G. and Louis E. Are neurons multifractals? // *Journal of Neuroscience Methods*. 1999. Vol. 89. P. 151–157; Smith T.G., Lange G.D. and Marks W.B. Fractal methods and results in cellular biology — dimensions, lacunarity and multifractals // *Journal of Neuroscience Methods*. 1996. Vol. 69. P. 123–136.

⁸ Mandelbrot B.B. *Form, Chance and Dimension*. Freeman, San Francisco. 1977. 365 p.; Mandelbrot B.B. *The Fractal Geometry of Nature*. Freeman, New York. 1983. 468 p.

⁹ Bovill C. *Fractal geometry in architecture and design*. Boston, Basel, Berlin: Birkhäuser, 1996. 195 p.



меры неоднородности структуры фрактала. Фрактальная размерность была использована для оценки пространственной сложности физических и биологических объектов; были предприняты также попытки применения значения фрактальной размерности для количественной оценки сложности объектов архитектуры⁹.

Для архитектуры весьма типичны элементы повторяемости и подобия. Целостные фракталы пригодны для моделирования отдельных зданий и сооружений, тогда как планы городов могут быть представлены дискретными фракталами. Для моделирования архитектурных форм применимы двумерные геометрические фракталы, в частности, спиральные и ветвящиеся формы, график функции Вейерштрасса, но наиболее перспективны некоторые трехмерные фракталы. Упорядоченность таких структур в архитектуре выше, чем в живой природе. В отличие от простых геометрических и компьютерных фракталов с бесконечным повторением одной и той же формы, в архитектуре применяются правила построения

с использованием ограниченного числа повторов, сменой правил их построения, нарушением строгого подобия введением множества вариаций.

Наиболее общей трехмерной фрактальной моделью или метафорой типовых зданий может служить так называемая «губка» Менгера (илл. 12).

Прямоугольники окон подобны очертаниям всего здания, кубы или параллелепипеды внутренних помещений — всей «коробке» здания. Разумеется, многоэтажное здание не строится по алгоритму «губки» Менгера, но фрактальные алгоритмы могут включать сжатие, поворот, нелинейные преобразования исходной формы. Можно с сожалением отметить, что в последнее время в многоэтажной жилой застройке наметились тенденции к использованию подобных форм с чрезмерным количеством повторов, даже по сравнению с постройками второй половины XX в., где эта тенденция только намечалась.

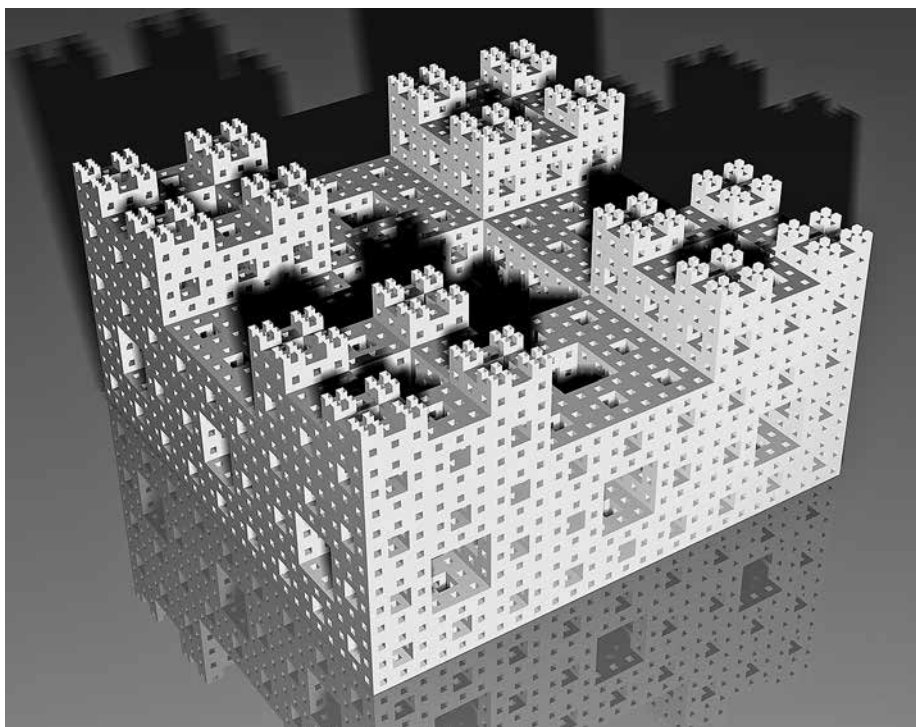
Компьютерное моделирование, нацеленное на поиск алгоритмов архитектурного формообра-

ИЛЛЮСТРАЦИИ

12. Сгенерированная «губка» Менгера как возможная абстрактная метафора архитектурного воплощения

ПРИМЕЧАНИЯ

¹⁰ Kasyanov N. Study of architectural shape formation in comparison with natural morphogenesis using computer simulations // *International electronic scientific-educational journal on scientific technological and educational-methodical aspects of modern architectural education and designing with usage of video and computer technologies*. 2008. № 1. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.marhi.ru/AMIT/2008/1kvart08/Kasyanov/article.php> [дата обращения: 23.10.2020].



зования, позволяет получить результаты широкого спектра для исследований и на уровне градостроительных решений, и в масштабе отдельных зданий и сооружений. В наше время приходит более глубокое осознание единства принципов формообразования в «живой» и «неживой» природе. Исследования морфологической общности и отличий архитектурных и природных объектов должны содействовать решению проблем органичного взаимодействия архитектуры и природной среды, способствовать гуманизации архитектурно-ландшафтной среды¹⁰.

Внедрение в архитектуру достижений иных отраслей — от молекулярных исследований в кристаллографии и биологии до авиастроительных технологий — может обеспечить качественный скачок не только в формообразовании, но и в функционировании новой архитектуры. Становится реальным создание архитектуры, обладающей «интеллектом», экспериментальных инновационных проектов с внедрением новых технологий непосредственно в оболочку здания, его конструкции и механизмы. Если брать пример с природы, то наилучшим способом взаимодействия с внешней средой будет создание некоей защитной оболочки, способной обеспечивать оптимальную реакцию на внешние условия, функциональные требования, ориентацию и тип здания.

От идей «умного дома» инновационные архитектурно-инженерные проекты постепенно развиваются в направлении создания самоорганизующихся кибернетических систем. Это подразумевает компьютерное распознавание и синтез визуальных образов и речи, а также различные направления робототехники, включая управление беспилотным транспортом. Фундаментальные исследования должны быть направлены на создание универсального искусственного интеллекта как системы, имитирующей когнитивные функции человека. Эта задача связана с естественнонаучной, технической и социогуманитарной сферами; разумеется, при этом должны учитываться этические нормы, безопасность, защита прав и свобод человека.

Перспективной представляется имитация биологических распределенных коллективных систем, таких как термитники, муравейники, рои пчел. Так, детальные исследования закономерностей человеческих перемещений стали возможны с появлением мобильных устройств связи. Полученные результаты могут оказаться полезными для рационального распределения людских и транспортных потоков. Это важно и для медицины, например, для прогнозирования распространения эпидемий. Тема особенно актуализирована всемирным распространением в 2020 г. новой коронавирусной инфекции SARS-CoV-2.

Теоретическое изучение процессов формообразования в архитектуре и градостроительстве неразрывно связано с прикладными аспектами создания психологически комфортной среды обитания. Пример

попытки подобного решения представляет собой здание биологических исследований (Koch Biology Building) Массачусетского технологического института (MIT, Massachusetts Institute of Technology, USA) и комплекс наук о мозге и познании (MIT Brain and Cognitive Sciences Complex) (илл. 13), где создано интерактивное пространство для успешных исследований, которое должно давать возможность духовного взлета и поощрять контакты и взаимодействия исследователей, снимать межлабораторные барьеры¹¹. Насколько это действительно эффективно работает — вопрос отдельный.

Перспективным направлением для развития архитектурного формообразования являются также и технологии трехмерной печати (илл. 14) зданий и сооружений, позволяющие создавать сложные формы и автоматизировать процесс возведения объектов. Пока в мире еще немного объектов, возведенных аддитивным методом.

Технологии, визуализирующие математические концепции нелинейной динамики, фрактальной геометрии и топологии, делают их наглядными для архитекторов и дают возможность

ИЛЛЮСТРАЦИИ

13. Интерьер комплекса наук о мозге и познании Массачусетского Технологического Института. Начало 2000-х гг., при участии арх. Ф. Гери

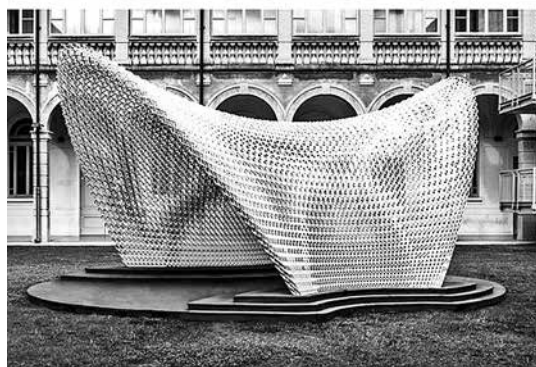
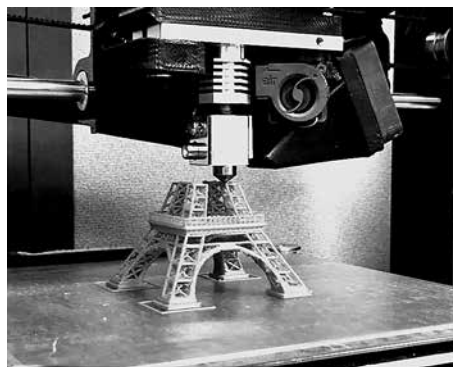
14. Примеры изделий, изготавливаемых аддитивными методами

ПРИМЕЧАНИЯ

¹¹ Goldstein R.N. Architectural design and the collaborative research environment // *Cell*. 2006. Vol. 127. No. 2. P. 243–246.

¹² Isaeva V.V., Kasyanov N.V., Presnov E.V. Topological singularities and symmetry breaking in development // *BioSystems*. 2012. Vol. 109. P. 280–298; Presnov E.V., Isaeva V.V., Kasyanov N.V. Topological invariance of biological development // *Axiomathes*. 2014. Vol. 24. P. 117–135.





«перевода» терминологии современной науки на язык архитектурной теории и экспорта концепций междисциплинарной науки не только в биологию¹², но и теорию архитектуры. Новые пространственные формы архитектуры, созданные посредством комплекса информационных технологий во взаимодействии с человеком, можно назвать виртуальной архитектурой. Технологии виртуальной и дополненной реальности также активно развиваются. И виртуальная, и реальная архитектура начинают сосуществовать одновременно, взаимодействуя и дополняя друг друга.

Итак, анализ и изучение природных и архитектурных объектов, закономерностей и принципов их морфогенеза с использованием когнитивных технологий и построением компьютерных моделей ведет к выявлению не раскрытых ранее аспектов формообразования. Концепции и методы современной междисциплинарной науки применимы не только к теории архитектуры, но способны расширить и практические проектные возможности. В экспериментальном архитектурном проектировании возможно использование алгоритмов, визуальных образов и метафор нелинейной междисциплинарной науки. Инновационные концепции и язык архитектурной науки порождают новое понимание форм общепризнанных образцов мировой архитектуры, принципов художественной целостности архитектурной среды и способствуют решению ряда проблем архитектурного формообразования, не поддающихся исчерпывающему пониманию без выхода за рамки узко профессионального подхода. Исследование общности и отличий формообразования архитектурных и природных объектов должно содействовать решению задач органичного взаимодействия архитектуры и природной среды, способствовать созданию комфортной и экологичной архитектурно-ландшафтной среды обитания.

Компьютерное моделирование и использование элементов искусственного интеллекта, направленное на поиск алгоритмов архитектурного формообразования, позволит получить результаты широкого спектра как на уровне градостроительных решений, так и в масштабе отдельных зданий и сооружений; возможно создание вариативных концептуальных проектов. Это может стать новым вектором инновационного развития архитектурной науки, помимо теоретического и исторического направлений исследований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baldwin J. Bucky works. New York: Wiley. 1996.
2. Binzegger T., Douglas R.J. and Martin K.A.C. Axons in cat visual cortex are topologically self-similar // Cerebral Cortex. 2005. Vol. 15. P. 152–165.
3. Bovill C. Fractal geometry in architecture and design. Boston, Basel, Berlin: Birkh user, 1996.
4. Caserta F., Stanley H.E. and Eldred W.D. Physical mechanisms underlying neurite outgrowth; a quantitative analysis of neuronal shape // Physical Review Letters. 1990. Vol. 64. P. 95–98.
5. Damiani G. Evolutionary meaning, functions and morphogenesis of branching structures in biology // Nonnenmacher T.F., Losa G.A. and Weibel E.R. (Eds.). Fractals in Biology and Medicine. Birkh user Verlag, Basel. 1994. P. 104–115.

6. Fernandez E., Bolea J.A., Ortega G. and Louis E. Are neurons multifractals? // *Journal of Neuroscience Methods*. 1999. Vol. 89. P. 151–157.
7. Goldstein R.N. Architectural design and the collaborative research environment // *Cell*. 2006. Vol. 127. No. 2. P. 243–246.
8. Isaeva V.V., Kasyanov N.V., Presnov E.V. Topological singularities and symmetry breaking in development // *BioSystems*. 2012. Vol. 109. P. 280–298.
9. Kasyanov N. Study of architectural shape formation in comparison with natural morphogenesis using computer simulations // *International electronic scientific-educational journal on scientific technological and educational-methodical aspects of modern architectural education and designing with usage of video and computer technologies*. 2008. No. 1. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.marhi.ru/AMIT/2008/1kvart08/Kasyanov/article.php> (дата обращения: 23.10.2020).
10. Mandelbrot B.B. *Form, Chance and Dimension*. Freeman, San Francisco. 1977.
11. Mandelbrot B.B. *The Fractal Geometry of Nature*. Freeman, New York. 1983.
12. Presnov E.V., Isaeva V.V., Kasyanov N.V. Topological invariance of biological development // *Axiomathes*. 2014. Vol. 24. P. 117–135.
13. Smith T.G., Lange G.D. and Marks W.B. Fractal methods and results in cellular biology — dimensions, lacunarity and multifractals // *Journal of Neuroscience Methods*. 1996. Vol. 69. P. 123–136.
14. Thom R. (1969). Topological models in biology // *Topology*, 8: 313–335.
15. Thom R. (1996). Qualitative and quantitative in evolutionary theory with some thoughts on Aristotelian biology // *Memorie della Societa Italiana di Scienze Naturali e de Museo Civico di Storia Naturale di Milano*. 27, 115–117.
16. Witten T.A. and Sander L.M. Diffusion-limited aggregation, a kinetic critical phenomenon // *Physical Reviews Letters*. 1981. Vol. 47. P. 1400–1403.

REFERENCES

1. Baldwin J. *Bucky works*. New York: Wiley. 1996.
2. Binzegger T., Douglas R.J. and Martin K.A.C. Axons in cat visual cortex are topologically self-similar // *Cerebral Cortex*. 2005. Vol. 15. P. 152–165.
3. Bovill C. *Fractal geometry in architecture and design*. Boston, Basel, Berlin: Birkhäuser, 1996.
4. Caserta F., Stanley H.E. and Eldred W.D. Physical mechanisms underlying neurite outgrowth; a quantitative analysis of neuronal shape // *Physical Review Letters*. 1990. Vol. 64. P. 95–98.
5. Damiani G. Evolutionary meaning, functions and morphogenesis of branching structures in biology // Nonnenmacher T.F., Losa G.A. and Weibel E.R. (Eds.). *Fractals in Biology and Medicine*. Birkhäuser Verlag, Basel. 1994. P. 104–115.
6. Fernandez E., Bolea J.A., Ortega G. and Louis E. Are neurons multifractals? // *Journal of Neuroscience Methods*. 1999. Vol. 89. P. 151–157.

7. Goldstein R.N. Architectural design and the collaborative research environment // *Cell*. 2006. Vol. 127. No. 2. P. 243–246.
8. Isaeva V.V., Kasyanov N.V., Presnov E.V. Topological singularities and symmetry breaking in development // *BioSystems*. 2012. Vol. 109. P. 280–298.
9. Kasyanov N. Study of architectural shape formation in comparison with natural morphogenesis using computer simulations // *International electronic scientific – educational journal on scientific technological and educational-methodical aspects of modern architectural education and designing with usage of video and computer technologies*. 2008. No. 1. [Elektronniy resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.marhi.ru/AMIT/2008/1kvart08/Kasyanov/article.php> (data obrascheniya: 23.10.2020).
10. Mandelbrot B.B. *Form, Chance and Dimension*. Freeman, San Francisco. 1977.
11. Mandelbrot B.B. *The Fractal Geometry of Nature*. Freeman, NewYork. 1983.
12. Presnov E.V., Isaeva V.V., Kasyanov N.V. Topological invariance of biological development // *Axiomathes*. 2014. Vol. 24. P. 117–135.
13. Smith T.G., Lange G.D. and Marks W.B. Fractal methods and results in cellular biology — dimensions, lacunarity and multifractals // *Journal of Neuroscience Methods*. 1996. Vol. 69. P. 123–136.
14. Thom R. (1969). Topological models in biology // *Topology*, 8: 313–335.
15. Thom R. (1996). Qualitative and quantitative in evolutionary theory with some thoughts on Aristotelian biology // *Memorie della Societa Italiana di Scienze Naturali e de Museo Civico di Storia Naturale di Milano*. 27, 115–117.
16. Witten T.A. and Sander L.M. Diffusion-limited aggregation, a kinetic critical phenomenon // *Physical Reviews Letters*. 1981. Vol. 47. P. 1400–1403.