

**Лазебная Л.А., Зензеров В.И., Бельков Д.В., Зеленский Д.М.**

Донецкий национальный технический университет

кафедра прикладной математики

E-mail: l\_lazebnay@mail.ru, mpvik56@mail.ru, belkovdv@list.ru, wasd3739@gmail.com

**Аннотация:**

**Лазебная Л.А., Зензеров В.И., Бельков Д.В., Зеленский Д.М. Самоорганизованная критичность в дорожном строительстве.** Архитектура города представляет собой систему, обладающую фрактальными свойствами. Фрактальная структура системы является результатом самоорганизации системы в критическое состояние. Моделью такого процесса может быть формирование фрактального эволюционного ландшафта на основе самоорганизованной критичности (Self-Organized Criticality, SOC). Объектом данного исследования является дорожно-транспортная сеть. Целью статьи является моделирование фрактальной структуры городской улицы. В работе решается задача построения модели городской улицы на основе SOC. Показаны результаты вычислительного эксперимента, выполненного в среде Octave.

**Annotation:**

**Lazebnaya L.A., Zenzerov V.I., Belkov D.V., Zelenskiy D.M. Self-organized criticality in road construction.** The architecture of the city is a system with fractal properties. The fractal structure of the system is the result of the system's self-organization in a critical state. The model of such a process may be the formation of a fractal evolutionary landscape based on self-organized criticality (SOC). The object of this study is the road transport network. BIM technologies enable designers to create a road model with all the necessary characteristics throughout it. The purpose of the article is to model the fractal structure of the city street. The work solves the problem of building a model of city street based on SOC. The results of a computational experiment performed in the Octave runtime shown.

**Введение**

В настоящее время многими учеными развивается направление нелинейной архитектуры. Это направление появилось на этапе формирования теории нелинейных динамических систем [1]. В основу нелинейной архитектуры положены принципы искусственного морфогенеза, синергетических парадигм имитации форм живой и неживой природы. Объект архитектуры рассматривается как саморазвивающаяся система. Архитектура обращается к идеям пороговых состояний, самоорганизации, превращений хаотических систем в упорядоченные. Основным инструментом исследования является компьютерное моделирование, а результаты представляют собой симуляцию и визуализацию вычислительных экспериментов.

Гибкость и согласованность при вычислительном проектировании достигается посредством применения технологий BIM (Building Information Modeling). Современные компьютерные технологии дают архитектору широкие возможности в отношении проектирования сложных пластичных форм и проведения комплексного анализа жизнеспособности объекта. При вычислительном проектировании может быть использована фрактальная геометрия [2].

В первом десятилетии XXI века в рамках теории нелинейной архитектуры зарождается научное направление фрактальной архитектуры. Появляются публикации и иллюстрации, посвященные этой теме. Проводятся исследования и эксперименты по

расчётам уровня фрактальности памятников архитектуры. После появления фрактальной теории архитектуры градостроители начинают активно применять данное направление в своей деятельности.

Фрактал – это самоподобный объект с нерегулярной структурой. На всех уровнях повторяется геометрия исследуемого элемента с учетом фрактальной размерности. Введение в научный оборот понятия «фрактал» способствовало развитию междисциплинарного подхода, основанного на методах нелинейной динамики, фрактальной геометрии и теории самоорганизации [3,4].

Фрактальное моделирование применяется как средство визуализации и описания сложных по форме зданий и городов. В настоящее время проекты разрабатываются не для одного здания, а для целого комплекса, района и нескольких кварталов. Архитектура города представляет собой систему, обладающую фрактальными свойствами. Городскую сеть можно представить, как естественно сложившуюся непрерывную фрактальную структуру, развивающуюся по определенным законам в пространстве и времени. Фрактальная архитектура является сложной нелинейной системой, поведение которой аналогично поведению развивающегося живого организма [5].

Известно [6], что фрактальная структура системы является результатом самоорганизации системы в критическое состояние. Моделью такого процесса может быть формирование фрактального эволюционного ландшафта на основе самоорганизованной критичности (Self-Organized Criticality, SOC).

Объектом данного исследования является дорожно-транспортная сеть. Для того чтобы развить нормальную скорость механического транспорта, необходимо включить двигатель и постепенно наращивать скорость. Торможение также не должно быть мгновенным, так как это портит двигатель. Поэтому до полной остановки транспорта должно быть пройдено определенное расстояние. Но перекрестки улиц в современных городах, находящиеся на расстоянии 100, 50, 20 и даже 10 метров один от другого, не благоприятствуют нормальному движению механического транспорта. Эти расстояния должны достигать 200–400 метров [7].

Технологии BIM дают возможность проектировщикам создать модель дороги со всеми необходимыми характеристиками на всем ее протяжении [8].

Целью статьи является моделирование фрактальной структуры городской улицы.

В работе решается задача построения модели городской улицы на основе SOC и показаны результаты вычислительного эксперимента, выполненного в среде Octave.

### **Изложение основного материала исследований**

Одной из парадигм синергетики является теория самоорганизованной критичности. Эта теория призвана объяснить такие закономерности, как масштабная инвариантность и прерывистое равновесие.

Согласно теории SOC естественная динамика сложных систем приводит их к критическим состояниям, т.е. системы самоорганизуют себя таким образом, чтобы оказаться в критическом состоянии. Для многих сложных систем «нормальным состоянием» является не стационарное, а критическое состояние.

Система находится в критическом состоянии, если ее структура приобретает свойство масштабной инвариантности, становится фрактальной. Степень близости системы к критическому состоянию определяется степенью фрактальности системы. Увеличение степени фрактальности является универсальным сигналом приближения к критическому состоянию.

Важным свойством системы, обладающей масштабной инвариантностью, является степенная зависимость между частотой и масштабом событий, происходящих в ней. Если  $E$  – масштаб лавин и  $f$  – их частота, то  $f \sim E^{-b}$ , где  $b$  – масштабный коэффициент.

Одной из областей, где теория самоорганизованной критичности позволила добиться успеха при моделировании процесса, является биологическая эволюция. Объектом эволюции является вид, представляющий собой группу особей, упорядоченных по возрастанию приспособленности к условиям окружающей среды. Приспособленность видов изменяется в результате двух различных процессов. Во-первых, переход от одной особи к соседней особи увеличивает приспособленность вида, и он поднимается выше по эволюционному ландшафту. Во-вторых, переход от одного вида к другому обеспечивает связь между видами. В результате такой мутации видов изменяется эволюционный ландшафт. Течение эволюции существенно зависит от соотношения скоростей этих процессов.

Критическим является состояние, в котором экосистема демонстрирует прерывистое равновесие (перемежаемость). Она совмещает в себе черты упорядоченных систем и хаотических, неупорядоченных систем. Интервалы активного межвидового взаимодействия при мутациях видов перемежаются с интервалами активного роста приспособленности за счет мутаций особей.

Пример [9] прерывистого равновесия в модели эволюции показан на рисунке 1.

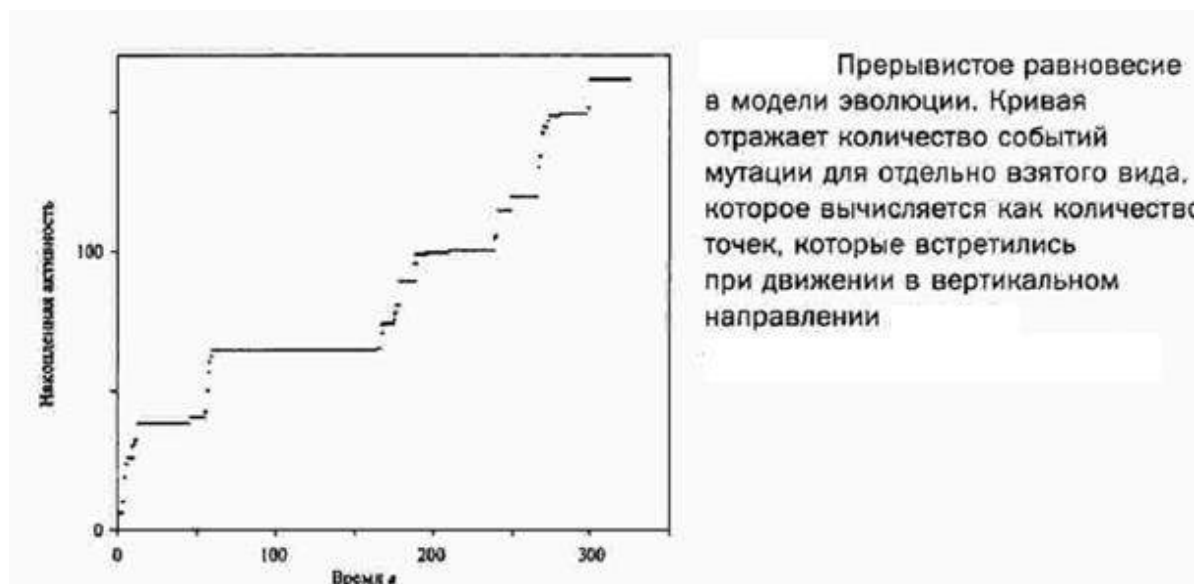


Рис 1. Пример прерывистого равновесия

Аналогия предлагаемой в статье модели с моделью эволюции видов показана в таблице 1.

Таблица 1 – Аналогия моделей

Модель эволюции видов	Модель структуры городской улицы
Вид	Улица между перекрестками
Мутация видов	Перекресток улиц
Накопленная приспособленность	Накопленное расстояние между перекрестками

В работе выполнен вычислительный эксперимент, показывающий, что организация городской улицы соответствует состоянию с перемежаемостью перекрестков. На рисунке 2 показаны расстояния между перекрестками по проспекту Мира города Донецка, на рисунке 3

показан ландшафт накопленного расстояния по проспекту Мира. Увеличение накопленного расстояния между перекрестками происходит с остановками. Это процесс с прерывистым равновесием.

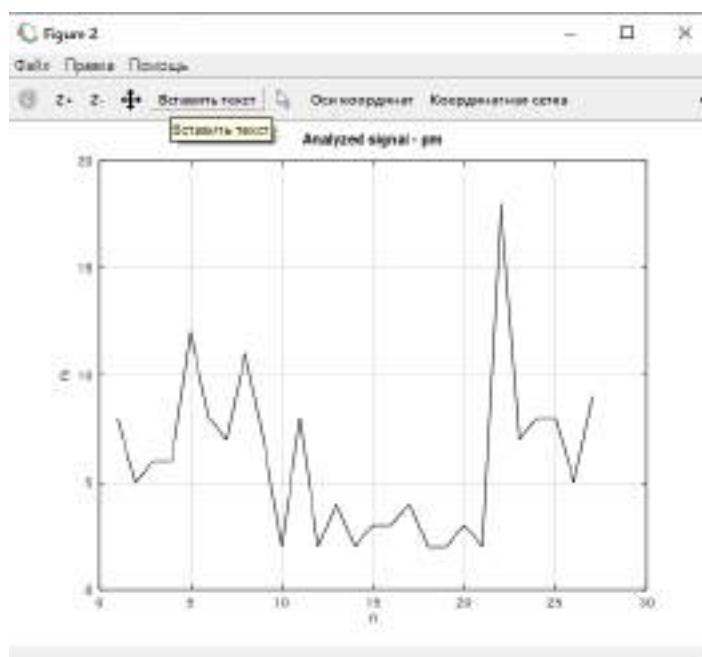


Рис. 2. Исходные данные

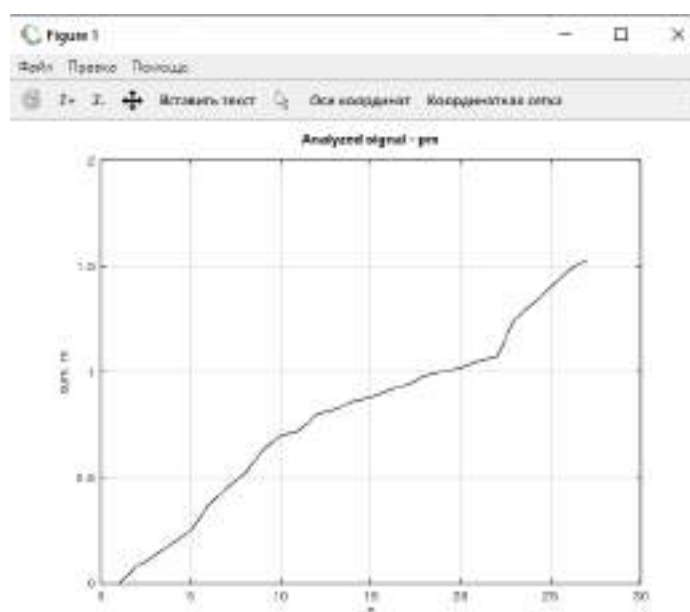


Рис. 3. Ландшафт накопленного расстояния

На рисунке 4 показана масштабная инвариантность улицы. Зависимость между частотой появления перекрестков и масштабом этих событий (уровнем накопленного расстояния между перекрестками) является степенной. В логарифмических координатах линейная аппроксимация степенной зависимости показана штриховой линией. Тангенс ее наклона равен значению масштабного коэффициента  $b=0.8$ . Достоверность аппроксимации  $R^2 = 0,72$ .

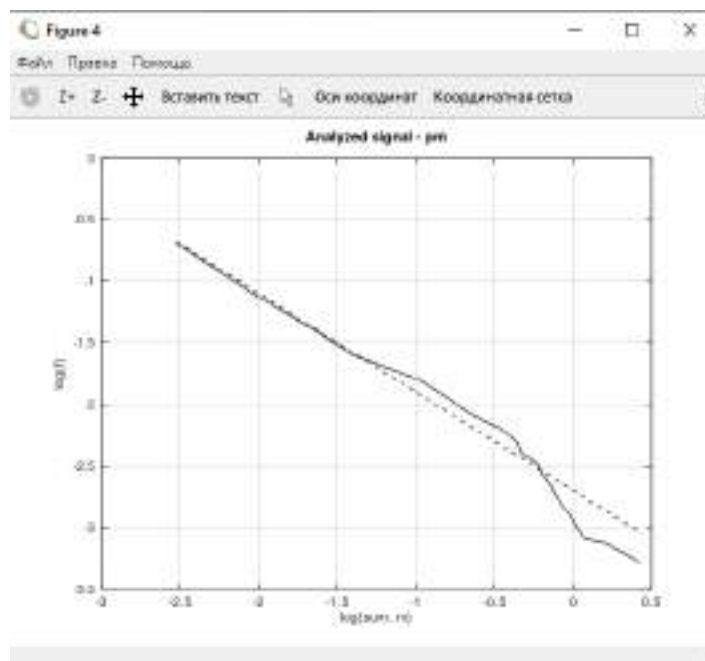


Рис. 4. Масштабная инвариантность улицы

### Выводы

В работе получены следующие результаты: разработана модель городской улицы на основе самоорганизованной критичности, показана аналогия предлагаемой модели с моделью эволюции видов на основе самоорганизованной критичности. Показано, что процесс накопления расстояния по проспекту Мира города Донецка обладает масштабной инвариантностью с масштабным коэффициентом 0,8.

### Литература

1. Saunders P. Nonlinearity. What it is and Why it Matters. Architectural Design, 1997, vol. 67, no. 9/10, pp. 52–57.
2. Стессель, С.А. Предпосылки развития идей нелинейности в современной архитектуре / С.А. Стессель // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». - 2016. - Т. 16. - № 3. - С. 5–11.
3. Маяцкая, И.А. Фрактальность и симметрия в архитектурных элементах сооружений / И.А. Маяцкая, С.Б. Языева, Б.М. Языев // Строительство и техногенная безопасность. - 2018. - №12(64). - С. 29–32.
4. Поморов, С.Б. Фракталы и их участие в архитектурном проектировании / С.Б. Поморов, А.А. Филиппов // Ползуновский вестник. - 2014. - № 1. - С. 141–147.
5. Кравченко, Г.М. Концепция фрактального формообразования в городской среде / Г.М. Кравченко, Л.И. Пуданова // Молодой исследователь Дона. - 2019. - № 6(21). - С. 36–40.
6. Подлазов, А.В. Теория самоорганизованной критичности – наука о сложности. URL: <https://magpie73.livejournal.com/2300105.html> (дата обращения: 21.02. 2021).
7. Дорожное строительство. URL: <https://plus.rbc.ru/news/5c0f54ed7a8aa9106d8a323c> (дата обращения: 21.02. 2021).
8. Расстояния между уличными перекрестками слишком малы. URL: <https://cyberpedia.su/2x6be6.html> (дата обращения: 21.02. 2021).
9. Бак, П. Как работает природа. Теория самоорганизованной критичности. – Москва. - 2013. - 276 с.