

Применение пространственно-временной модели активных сред для анализа развития урбоэкосистем

Сидорова Н.Т., Левашова А.Е., Семина А.Э.

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
физический факультет*

sky314bone@mail.ru

Предложена модель пространственно-временной самоорганизации урбоэкосистем как суперпозиции сопряженных активных сред, учитывающая неоднородности антропогенных и природных факторов. В основе модели лежит модифицированное авторами уравнение ФитцХью–Нагумо, учитывающее неоднородности антропогенных (активатор) и природных (ингибитор) факторов в урбоэкосистемах. Обоснованность применения уравнения данного типа определяется относительной простотой системного анализа двух уравнений типа «активатор – ингибитор». Представлено аналитическое и численное исследование стационарных решений системы. Модель исследуемого процесса эволюции урбоэкосистем позволяет выявлять пороговые значения управляющих (социальных и природных) параметров и основные принципы развития автоволновых процессов, формирующих пространственно-временные структуры урбоэкосистем. Модель подтверждена данными динамики численности и плотности населения и картографическими данными развития Москвы (района Кунцево) с 1952 по 1968 годы. Рассмотрены прогнозные модели развития Новой Москвы и Шанхая с 2017 по 2030 гг. Численные исследования проводились с помощью авторской программы на языке C++, позволяющей создавать текстовые файлы на основе картографических данных. Код создан в среде OpenCL и реализован с использованием графических процессоров AMD FIREPRO. Графическая интерпретация проведена с использованием программы «Serfer».

Ключевые слова: активные среды, автоволновая самоорганизация, урбоэкосистемы.

The application of a distributed model of active media for the analysis of the development of urban ecosystems

Sidorova A.E., Levashova N.T., Semina A.E.

I Chair of Biophysics, Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University,

A model of spatio-temporal self-organization of urban ecosystems as a superposition of conjugate active media that takes into account inhomogeneities of anthropogenic and natural factors is proposed. The model is based on the system of FitzHugh–Nagumo equations, modified by the authors so to take into account inhomogeneities of anthropogenic (activator) and natural (inhibitor) factors. The validity of the application of an equation of this type is determined by the relative simplicity of the system analysis of two equations of the "activator – inhibitor" type. An analytical and numerical study of stationary solutions of the system is presented. The model of the investigated process of the evolution of urban ecosystems makes it possible to identify the threshold values of the governing (social and natural) parameters and the basic principles of the development of autowave processes that form the space-time structures of urboecosystems. The model is confirmed by the data of population density and population density and map data of the development of Moscow (Kuntsevo district) from 1952 to 1968. The forecast models of the development of New Moscow and Shanghai from 2017 to 2030 are considered. Numerical research was carried out using the author's program in C ++, which allows creating text files based on cartographic data. The code was created in the OpenCL environment and implemented using AMD FIREPRO graphics processors. Graphical interpretation was carried out using the program "Serfer".

Key words: active media, autowave self-organization, urban ecosystems.

Введение

Урбоэкосистемы (УЭС) как сопряженные активные среды относятся к нелинейным динамическим макроструктурам, состоящим из сопряженных во времени и пространстве природных и антропогенных подсистем [1–3]. В УЭС имеется распределенный ресурс (население, промышленные и жилые объекты, транспорт, геобиоценозы). При наличии возмущения в соседних ячейках, связанного с изменением ресурса, процесс способен стать автокаталитическим. Так, в результате увеличения численности и плотности населения растет плотность застройки, увеличивается количество транспорта, промышленных предприятий, торговых и других сопутствующих росту населения структур, протяженность коммуникаций, расширяются границы УЭС, и растущие города имеют тенденцию к слиянию в общие системы. И результатом расширения и слияния УЭС является изменение площадей геобиоценозов, количественного (флуктуации) и качественного (бифуркации) состава трофических сетей. Управляющими параметрами процесса автоволновой самоорганизации являются природные и антропогенные факторы, формирующие длину и форму автоволн. При этом скорости антропогенных процессов, по меньшей мере, на порядок больше скоростей природных процессов, поэтому антропогенные процессы в данной модели мы полагаем активаторами, а природные – ингибиторами общесистемных процессов. Данные свойства позволяют качественно оценить пороговые и подпороговые условия распространения автоволнового процесса в зависимости от интенсивности источников воздействия, расположения возбудимых, слабовозбудимых и невозбудимых зон.

Модель урбоэкосистем как процесс автоволновой самоорганизации

На базе уравнения ФитцХью–Нагумо [4] авторами предложена система уравнений [1–3]:

$$\begin{aligned} \varepsilon \frac{\partial u}{\partial t} - \varepsilon D_u \Delta u &= -\frac{1}{\varepsilon} (u(u - \alpha(x, y))(u - 1) - uv), \\ 0 \leq x, y \leq L, t > 0; \\ \varepsilon \frac{\partial v}{\partial t} - \varepsilon D_v \Delta v &= -\gamma v + \beta u, \end{aligned} \quad (1)$$

где u – функция интенсивности антропогенных процессов (активатор), v – функция интенсивности природных процессов (ингибитор). Введённое авторами произведение uv расширяет возможности математического анализа перекрестных взаимодействий активатора и ингибитора. Решения уравнения относительно u и v неотрицательны. α – параметр активации системы (определяется как величина, обратная плотности населения), $\alpha < 1$. γ – кинетический параметр затухания ингибитора, $\gamma > 0$.

β – кинетический параметр взаимодействия активатора и ингибитора, $\beta > 0$. εD_u , εD_v – коэффициенты диффузии активатора и ингибитора. ε – параметр, отражающий значительное различие скоростей изменения функций активатора и ингибитора, ($0 < \varepsilon < 1$). На границе расчетной области задаются краевые условия Неймана. Распределение в начальный момент времени считается известным. Численное решение двумерной задачи проводится в прямоугольнике, в котором вводится равномерная сетка. Реализация численного счета производится при помощи схемы с эволюционной факторизацией [5]. Распределенные компьютерные вычисления проведены с помощью графических процессоров AMD и компилятора OpenCL.

Для вырожденного уравнения системы определены соотношения между параметрами α , β и γ , соответствующие бистабильной и моностабильной средам (рис. 1). В области моностабильности любое начальное возмущение затухает со временем, устойчивые состояния бистабильной среды – в области бистабильности. В области между синей и красной кривой возможно возникновение изменяющихся во времени локализованных в пространстве «делящихся» автоволн.

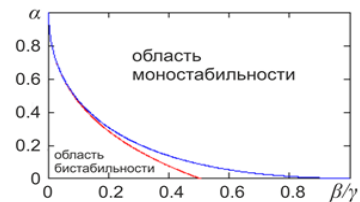


Рис. 1. Диаграмма состояния активной среды в зависимости от соотношения параметров α , β и γ .

Модель была проверена на примере присоединения населенных пунктов Фили, Мазилово и Кунцево к Москве (1952–1968 гг.) [3]. На основе картографических данных [6] с использованием приложения авторской разработки на языке C++, позволяющей создавать текстовые файлы с данными на основе изображений, была получена матрица значений параметра α размера [70×70], в дальнейшем использованная при численной реализации согласно модели. Основной код разработан в среде OpenCL и реализован с использованием графических процессоров AMD FIREPRO. Графическая интерпретация проведена с использованием программы «Serfer». Расчеты проводились согласно следующей модели:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} - D_u \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) &= \\ = -\frac{1}{K_u T^*} u (u - N_B K \alpha(x, y, t)) (u - N_B K) - \frac{1}{K_u T^*} uv, & \quad (2) \\ \frac{\partial v}{\partial t} - D_v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) &= \frac{1}{T^*} \left(-\frac{1}{\gamma} v + \beta u \right), \end{aligned}$$

где u [км²] – застроенная площадь – активатор; v [км²] – площадь уничтоженных геобиоценозов – ингибитор (согласно [7] площадь биоценозов на территории Новой Москвы должна составить не менее 25 % от площади застройки); $T^* = 1$ (год) – характерный масштаб времени; $K = 10$ км² – характерная площадь одноподъездного дома с придомовой территорией; $NB = 80$ – число зданий на км²; $\alpha = KN, \exp(-0.05K\rho)$ – функция, убывающая с ростом плотности населения. Начальное распределение плотности населения: жилая застройка – $\rho = 2000$ чел/км², промышленная территория $\rho = 200$ чел/км², парки, леса и водные преграды $\rho = 0$; $D_u = 5$ км²/год – скорость роста площадей застройки; $D_v = 0.1$ км²/год – скорость уменьшения площадей зеленых насаждений; γ – доля уничтоженной зелени от площади застройки; γ – в интервале 0–0.75; $\beta = 100/NB$ – нормировочный коэффициент согласования локальной площади застройки с общей площадью застраиваемого района. Результаты численных расчетов представлены на рисунке 2.

Результаты численных расчетов согласно модели (2) хорошо согласуются с картографическими данными (рис. 2,а и 2,з). В ходе расширения территории Москвы лесопарковая территория вдоль реки и пруд стали естественными барьерами (рис. 2,б и 2,д), а застраивались небольшие естественные биоценозы (рис. 3,в и 3,е). При этом малоэтажная застройка уступила место многоэтажной (рис. 3,б и 3,д), что автокатализировало процесс увеличения численности и плотности населения на присоединенных территориях.

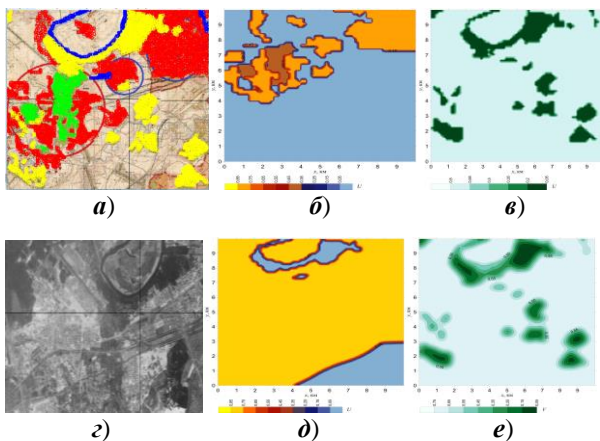


Рис. 2. Расширения границ Москвы за счет присоединения г. Фили и поселка Мазилово к Кунцево: а), б), в) – начальные условия, 1952 г.; з), д), е) – 1968 г.; а) и з) – данные аэрофотосъемки.

На основе аналогичного анализа и уравнения (2) авторами построена прогнозная модель развития Новой Москвы до 2030 г. (рис. 3). Основные параметры модели: ρ – планируемая плотность населения на этих территориях, согласно их назначению. Для жилого фонда плотной застройки и промышленной зоны $\rho = 4000$ чел/км², для коттеджной застройки $\rho = 2000$ чел/км², для

территорий парков $\rho = 0$, – параметр, характеризующий тип застройки. Планируемые лесопарковые территории составляют 10 % от общей площади [7]. Учитывая скорости застройки территории Новой Москвы и меры, предпринимаемые по сохранению биоценозов, было принято $D_u = 5$ км²·год⁻¹ и $D_v = 0.1$ км²·год⁻¹ ($D_v/D_u = 1/50$). Численное значение кинетического параметра: $\gamma = 0$ для естественных биоценозов; $\gamma = 0.1$ для парков [6]; $\gamma = 0.5$ – для коттеджной застройки [8]; $\gamma = 0.75$ для плотной застройки [8]; $\gamma = 0.85$ – для промышленных зон [8]. Анализ картографических данных проведен с использованием приложения авторской разработки на языке C++, позволяющей создавать текстовые файлы с данными на основе изображений.

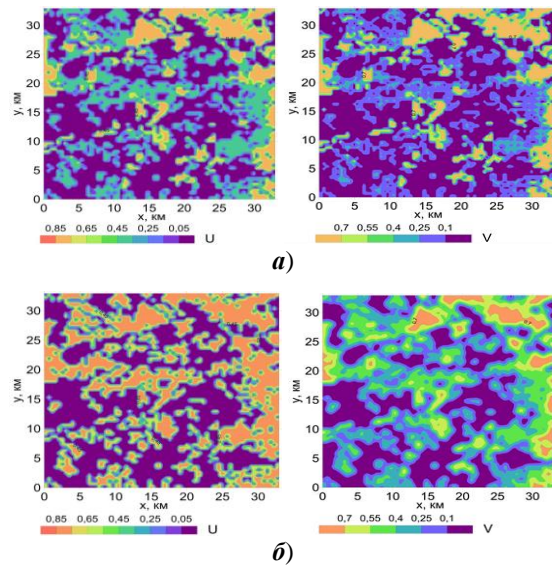


Рис. 3. Модель развития Новой Москвы до 2030 года: U – пространственное распределение застройки, V – пространственное распределение биоценозов. а) 2017 г. – начальные условия; б) 2030 г. 0.85–0.75 – плотная застройка, 0.65–0.25 – коттеджная застройка, 0.1–0.05 – лесопарковая зона.

Анализ данных модели показывает, что возможны два основных варианта развития Новой Москвы.

1. Планируемый. Соотношение застроенных площадей и геобиоценозов сохраняется (рис. 3,а), что соответствует нормативам [7].

2. Прогнозный. Согласно существующей практике застройки, по мере увеличения численности населения, расширяются также площади сопутствующей инфраструктуры (пешеходные, проезжие, стоянки автотранспорта, детские площадки и т.д.), что приводит к увеличению антропогенно преобразованных территорий на 10–12 %.

Согласно модели (в результате сохранения данной практики застройки), в дальнейшем возможно сокращение площади геобиоценозов за счет территории лесов и парков (на 35 % от общей площади геобиоценозов данной территории в

2017 году). К 2030 году – уменьшение площади геобиоценозов на 35 % (рис. 3,б). Таким образом, общая площадь геобиоценозов в 2030 году составит 39 %. Как известно, возникновение необратимых системных процессов наступает в результате разрушения более 50 % системных взаимосвязей. Такой сценарий приведет к дополнительному сокращению и фрагментированию площадей естественных геобиоценозов, разрушению трофических сетей и, следовательно, к снижению потенциала природной автоволновой самоорганизации.

На основе уравнения (1) разработана модель территориального развития Шанхая до 2030 г.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} - D_u \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) &= -\frac{1}{T^*} u(u - \alpha(x, y, t))(u - 1) - \frac{1}{T^*} uv, \\ \frac{\partial v}{\partial t} - D_v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) &= \frac{1}{T^*} (-v + \gamma(x, y, t)u), \end{aligned} \quad (3)$$

где u – функция застройки (безразмерная доля с км²) – активатор; v – функция цены (безразмерная доля от максимально возможной за м² жилой площади) – ингибитор; α – доля площади земель естественных биоценозов (рис. 4): на западном направлении $\alpha = 0.3$ – зона бистабильности, в зоне моря $\alpha \approx 1$, в районе р. Янцзы, на границе невозбудимой и бистабильной зон, α в интервале 0.5–0.7; γ – безразмерный параметр, показывающий зависимость стоимости м² жилья от района застройки. D_u – скорость изменения площади застройки, м²·год⁻¹; D_v – скорость изменения цены на жилье в зависимости от района застройки и спроса на жилье (в юанях в год). На основании анализа данных за 2005–2017 годы [9] принимаем следующие значения: внутри красной окружности (рис. 4,а) $D_u = 5067$ га·год⁻¹, внутри синей окружности (рис. 4,б) $D_u = 930$ га·год⁻¹, $D_v = 0.22D_u$.

Результаты численного моделирования с помощью авторской программы на языке C++, позволяющей создавать текстовые файлы на основе картографических данных, представлены на рисунках 4 и 5.

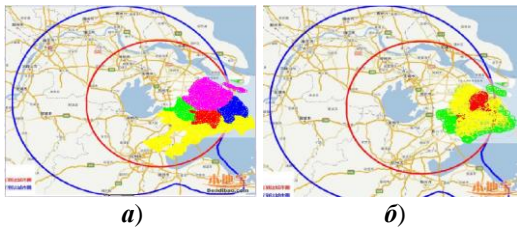


Рис. 4. Планы застройки Шанхая: красная окружность – ядро Шанхая; синяя – пригороды; а) цены на жилье; б) плотность населения.

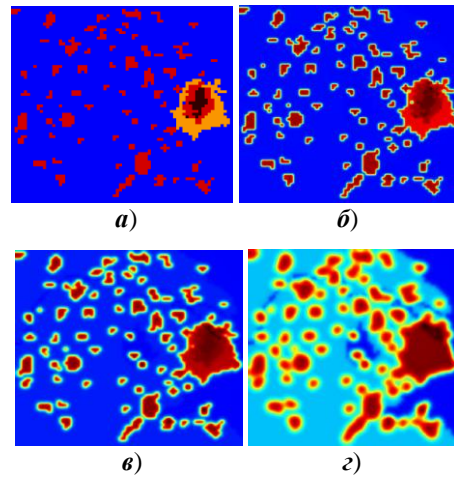


Рис. 5. Модель развития Шанхая до 2030 года: а) застройка (u) 2016 г. [9]; б) застройка (u) 2030 г.; в) цена м² жилой площади (v) 2016 г.; г) цена м² жилой площади (v) 2030 г.

Реализация численного моделирования проведена посредством графических процессоров AMD FIREPRO с использованием программы «Serfer». Сохранение постоянной величины соотношения скорости изменения площади застройки и спроса ($D_v = 0.22D_u$), то есть, вне зависимости от места застройки, возможен в случае значительного роста численности населения и, соответственно, спроса на жилье. Сохранение сложившейся к 2017 г. зональности застройки и, следовательно, дифференциального подхода к стоимости жилья позволит удовлетворить спрос на жилье и сохранить естественные геобиоценозы согласно нормативам [9].

Заключение

В работе в качестве антропогенных факторов, контролирующих пространственно-временную структуру развития урбоэкосистем, рассмотрены факторы социально-экономического и физико-химического характера. Установлено, что при переходе из одной УЭС в другую плотность населения и соотношение γ/β изменяется скачкообразно. Этот вывод соответствует теории самоорганизации: при переходе на новый уровень происходит качественный скачок в структуре и функциях системы. Особенно это характерно для развития мегаполисов за счет прилегающих территорий, которые в результате присоединения попадают на новый иерархический уровень эволюции УЭС. Предложенная модель позволяет описывать характерные свойства УЭС, а обоснованность ее применения подтверждается аналитическими и численными методами.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках реализации проекта Российского Научного Фонда (грант 18-11-00042).

Список литературы

1. Сидорова А.Э., Левашова Н.Т., Мельникова А.А., Дерюгина Н.Н., Семина А.Е. *Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия*. 2016. № 6. С. 39–45.
2. Levashova N., Melnikova A., Semina A., Sidorova A. *Communication on Applied Mathematics and Computation*. Т. 31. № 1. С. 32–42.
3. Сидорова А.Э., Левашова Н.Т., Мельникова А.А. и др. *Математическая биология и биоинформатика*. 2017. Т. 12. № 1. С. 186–198.
4. FitzHugh R.A. Impulses and physiological states in theoretical model of nerve membrane. *Biophys. J.* 1961. P. 445–466.
5. Калиткин Н.Н., Корякин П.В. *Численные методы: методы математической физики*. М: Издательский центр «Академия», 2013. 303 с.
6. URL: <https://yandex.ru/maps/213/moscow/> (дата обращения: 03.09.2018).
7. URL: <https://investmoscow.ru/city-projects/aip/план-развития-новых-территорий/> (дата обращения: 03.09.2018).
8. URL: <https://stroj.mos.ru/infographics/novoi-moskvie-piat-liet-1> (дата обращения: 03.09.2018).
9. URL: <http://www.stats-sh.gov.cn/tjnj/zgsh/nj2011.html> (дата обращения: 03.09.2018).