

МОДЕЛЬ УРБОЭКОСИСТЕМ КАК ПРОЦЕСС АВТОВОЛНОВОЙ САМООРГАНИЗАЦИИ

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

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
ул. Ленинские Горы, 1, стр. 2, г. Москва, 119234, РФ; e-mail: sky314bone@mail.ru
Поступила в редакцию: 09.07.2018.

Аннотация. В работе предложена модель пространственно-временной самоорганизации урбоэкосистем как суперпозиций сопряженных активных сред. В основе модели лежат модифицированное авторами уравнение ФитцХью–Нагумо, учитывающее неоднородности антропогенных (активатор) и природных (ингибитор) факторов в природно-антропогенных экосистемах. Обоснованность применения уравнения данного типа определяется относительной простотой системного анализа двух уравнений типа «активатор – ингибитор». Представлено аналитическое и численное исследование стационарных решений системы. 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. Предложенная модель позволяет выявлять пороговые значения управляющих параметров и основные принципы развития автоволновых процессов, формирующих структуры урбоэкосистем.

Ключевые слова: активные среды, автоволновая самоорганизация, урбоэкосистемы.

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 в активных средах

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

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

где u – функция интенсивности антропогенных процессов (активатор); v – функция интенсивности природных процессов (ингибитор). Введенное 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 $-L \leq x \leq L$; $-L \leq y \leq L$, 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.

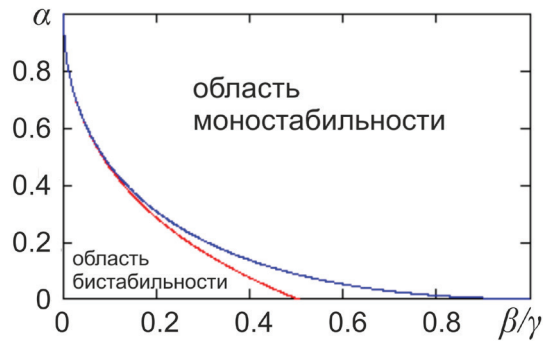


Рисунок 1. Диаграмма состояния активной среды в зависимости от соотношения параметров α , β и γ

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.

Модель была проверена на примере присоединения населенных пунктов Фили, Мазилово и Кунцево к Москве (1952-1968 гг.) [3]. На основе картографических данных 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:

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

где u (км²) – площадь, застроенная на квадратный километр; v (км²) – ингибитор негативных процессов застройки – площадь уничтоженных геобиоценозов – ингибитор (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; $N_B = 80$ – число зданий на квадратный километр; $\alpha(x, y, t)$ – функция, убывающая с ростом плотности населения:

$\alpha = K N_B \exp(-0.05K \rho)$. 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; $\beta = 100/N_B$ – 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. 2а, г). В ходе расширения территории Москвы лесопарковая территория вдоль реки и пруд стали естественными барьерами (рис. 2б, д), а застраивались небольшие естественные биоценозы (рис. 3 в, е). При этом малоэтажная застройка уступила место многоэтажной (рис. 3 б, д), что автокатализировало процесс увеличения численности и плотности населения на присоединенных территориях.

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 $\rho = 0$, $\alpha = K N_B \exp(-0.05K \rho)$

– параметр, характеризующий тип застройки. Планируемые лесопарковые территории составляют 10 % от общей площади. 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; $\gamma = 0,75$ для плотной застройки [8]; $\gamma = 0,85$ – для промышленных зон. Анализ картографических данных проведен

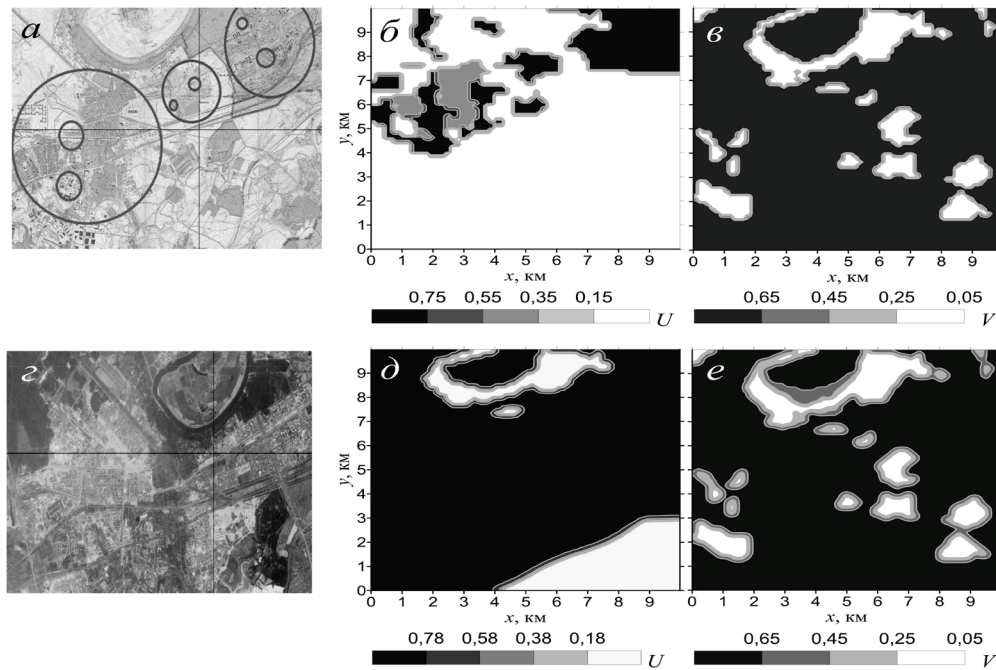


Рисунок 2. Модель расширения границ Москвы за счет присоединения г. Фили и поселка Мазилово к району Кунцево: а, б, в – начальные условия, 1952 г.; г, д, е – 1968 г.

с использованием приложения авторской разработки на языке C++, позволяющей создавать текстовые файлы с данными на основе изображений.

Анализ данных модели показывает, что по мере расширения площади застройки будут сокращаться площади биоценозов (рис. 3б), и антропогенно преобразованные территории увеличатся на 5-10 %. Это приведет к снижению потенциала самоорганизации природных биоценозов и росту вероятности возникновения необратимых процессов в границах мегаполиса.

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

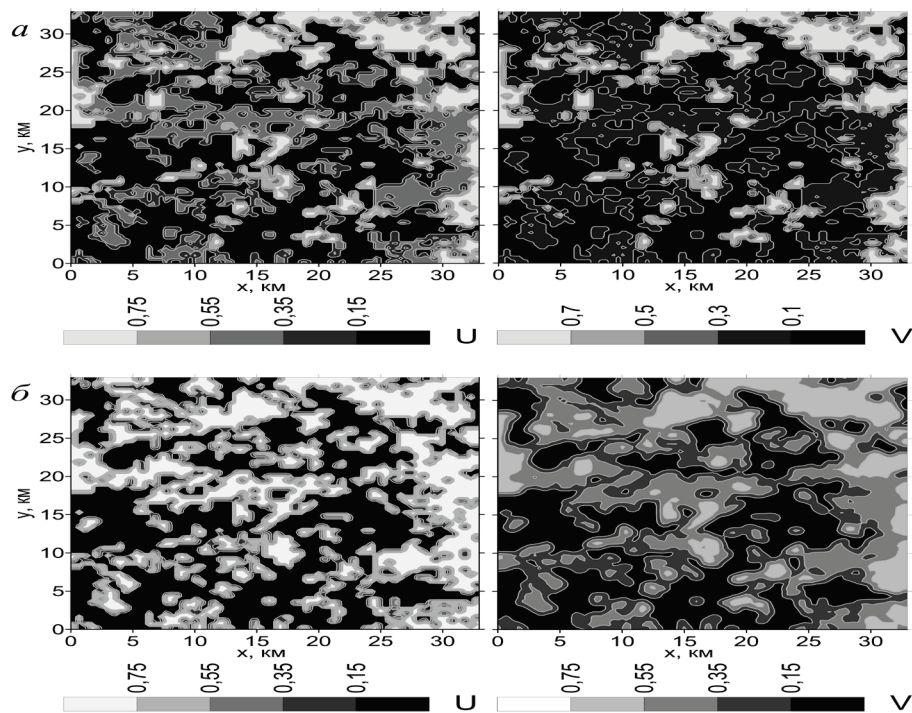


Рисунок 3. Модель развития Новой Москвы до 2030 года: U – пространственное распределение застройки, V – пространственное распределение биоценозов. а) 2017 г. – начальные условия; б) 2030 г. 0,85-0,75 – плотная застройка, 0,65-0,25 – коттеджная застройка, 0,1- 0,05 – лесопарковая зона

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

$$\frac{\partial v}{\partial t} - D_v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) = \frac{1}{T^*} (-v + \gamma(x, y, t)u).$$

Здесь 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. 4б): 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 принимаем следующие значения: внутри круга меньшего радиуса на рисунке 4а $D_u = 5067$ га·год⁻¹, внутри круга большего радиуса (рис. 4б) $D_u = 930$ га·год⁻¹, $D_v = 0,22D_u$.

С 2000 по 2010 годы расширение границ Шанхая происходило, в основном, за счет сельскохозяйственных земель и прибрежной территории [9]. Но для сбалансированного экономического развития региона необходимо сохранение баланса между антропогенными и природными процессами в условиях роста численности населения. Особенно при условии увеличения спроса на улучшение качества жизни. Анализ разработанной модели показал, что сохранение сложившейся к 2017 г. зональности застройки (рис. 4 б) позволит не только удовлетворить спрос на жилье значительной массы населения, но и устойчиво развиваться в соответствие с нормативами сохранения естественных биоценозов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использованный нами подход основан на представлениях об автоволновой самоорганизации в активных средах. В настоящей 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

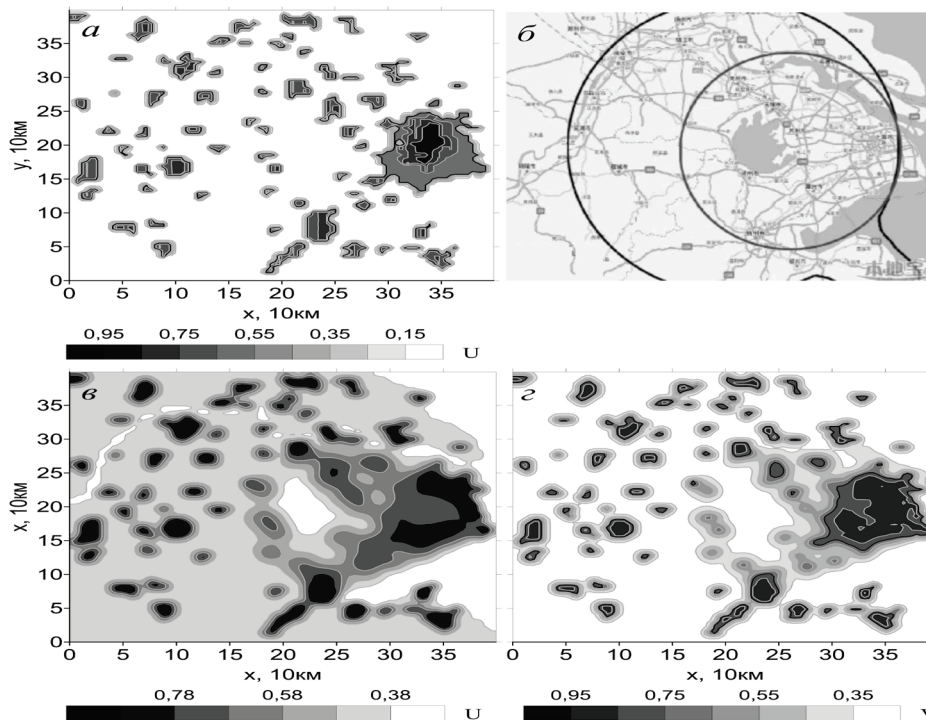


Рисунок 4. Модель развития Шанхая до 2030 года: а) карта застройки, согласно планам развития Шанхая, 2015 г.; б) карта плотности населения, 2016 г.; в) застройка (u), 2016 г.; г) застройка (u), 2030 г. а) плотность застройки в 2017 г.; б) карта застройки; в) плотность застройки, прогнозируемая согласно модели, к 2030 году; г) цена квадратного метра жилой площади, нормированная на максимум, прогнозируемая согласно модели, к 2030 году.

мегаполисов за счет прилегающих территорий – небольших городов, которые в результате присоединения попадают на новый иерархический уровень эволюции УЭС – мегаполисов. Предложенная модель позволяет описывать характерные свойства УЭС, а обоснованность ее применения подтверждается аналитическими и численными методами.

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

Список литературы / References:

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. [Sidorova A.E., Levashova N.T., Melnikova A.A., Deryugina N.N., Semina A.E. *Moscow University Physics Bulletin*, 2016, vol. 71, no. 6, pp. 562-568 (In Russ.)]
2. Levashova N., Melnikova A., Semina A., Sidorova A. *Communication on Applied Mathematics and Computation*, vol. 31, no. 1, pp. 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. [Sidorova A.E., Levashova N.T., Melnikova A.A., Semina A.E. *Mathematical Biology and Bioinformatics*, 2017, vol. 12, no. 1, pp. 186-198. (In Russ.)]
4. FitzHugh R.A. Impulses and physiological states in theoretical model of nerve membrane. *Biophys. J.*, 1961, pp. 445-466.
5. Калиткин Н.Н., Корякин П.В. *Численные методы: Методы математической физики*. М: Издательский центр «Академия», 2013, 303 с. [Kalitkin N.N., Koryakin P.V. *Numerical methods: Methods of mathematical physics*. М: Publishing Center "Academy", 2013, 303 p. (In Russ.)]

MODEL OF UBO-ECOSYSTEMS AS A PROCESS AUTOMOBILE SELF-ORGANIZATION

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

Lomonosov Moscow State University

Leninskie Gory St., 1/2, Moscow, 119234, Russia; e-mail: syoanya@yandex.ru

Abstract. A model of spatio-temporal self-organization of uranean ecosystems as superpositions of conjugate active media is proposed. At the heart of the model is the modified FitzHugh-Nagumo equation, which takes into account the inhomogeneities of anthropogenic (activator) and natural (inhibitor) factors in the human-anthropogenic ecosystems. 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 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. The proposed model makes it possible to identify threshold values of control parameters and the main principles of the development of autowave processes forming the structures of urineecosystems

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