

Урбоэкосистемы как критические зоны глобализации: модель автоволновой самоорганизации*Мельникова А.А.¹, Семина А.Е.²*1 - , E-mail: *aa-melnikova@yandex.ru*; 2 - , E-mail: *syoanya@yandex.ru*

К середине XX века в мире обозначилась очень серьезная и актуальная и сегодня проблема, - процесс урбанизации сопровождается неконтролируемым ростом численности и плотности населения городов во времени и пространстве. Согласно данным ООН, к 2050 году 68% мирового населения и 86% населения развитых стран будет сосредоточено в городах [1]. Этот дисбаланс приводит к деградации природных экосистем и ухудшению условий существования человека.

УЭС как сопряженные активные среды относятся к нелинейным динамическим макро-структурам, состоящим из сопряженных во времени и пространстве природных и антропогенных подсистем [2-4]. 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 (подобный процесс протекает в химической реакции Белоусова–Жаботинского). 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 т.д. Более того, растущие города имеют тенденцию к слиянию в общие системы. И результатом расширения и слияния УЭС является изменение площадей геобиоценозов (как городских, так и между городами), количественного (флуктуации) и качественного (бифуркации) состава трофических сетей.

Самоорганизация проявляется в образовании автоволновых диссипативных структур, и способна поддерживать устойчивость УЭС в допороговом состоянии. Управляющими параметрами данного процесса являются природные и антропогенные факторы (возбуждаемые элементы), 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.

На базе уравнения ФитцХью–Нагумо авторами предложена система уравнений [2-4]:

$$\begin{cases} u_t - \varepsilon D_u u_{xx} = -\frac{1}{\varepsilon} (u(u - \alpha(x, y, t))(u - 1) + uv), \\ v_t - \varepsilon D_v v_{xx} = -\gamma v + \beta u, \quad x \in [-L; L], \quad y \in [-L; L], \quad t \in (0; T), \end{cases}$$

На границе расчетной области задаются краевые условия Неймана. Здесь u – функция интенсивности антропогенных процессов (активатор); v – функция интенсивности природных процессов (ингибитор); $\alpha(x, y, t)$ – функция, описывающая зависимость параметра активации системы от координаты, определяется как функция, обратная плотности населения, $0 < \alpha < 1$; $\gamma > 0$ – кинетический параметр затухания потенциала ингибитора; $\beta > 0$ – кинетический параметр взаимодействия активатора и ингибитора; εD_u , εD_v – коэффициенты диффузии активатора и ингибитора; ε – параметр, характеризующий скорость распространения активатора ($0 < \varepsilon < 1$), отражает значительное различие скоростей изменения функций активатора и ингибитора.

Распределение в начальный момент времени считается известным. Реализация численного счета производится при помощи схемы с эволюционной факторизацией. Распределенные компьютерные вычисления были проведены с помощью графических процессоров AMD и компилятора OpenCL.

По модели была рассчитана динамика присоединения к Москве населенных пунктов Фили, Мазилово и Кунцево (1946–1968 гг.). Данные расчета посредством безразмерной модели согласуются с динамикой развития Москвы.

Также авторами была разработана размерная модель, описывающая динамику изменения площади застройки и площади зеленых насаждений в городской среде:

$$\begin{cases} u_t - D_u(u_{xx} + u_{yy}) = -\frac{1}{K^2 T^*} u(u - \alpha(x, y, t))(u - 50K) - \frac{1}{K T^*} uv, \\ v_t - D_v(v_{xx} + v_{yy}) = \frac{1}{T^*} (-\gamma v + u), \\ x \in [-L; L], \quad y \in [-L; L], \quad t \in (0; T]. \end{cases}$$

На границе расчетной области задаются краевые условия Неймана. Здесь активатор $u(x, y, t)$ - застроенные площади (на км²), ингибитор - $v(x, y, t)$ площади оставшихся зеленых насаждений (на км²), функция $\alpha(x, y, t)$ характеризует назначение земель, $T^* = 1$ год - характерный масштаб времени, $K = 0.01$ км² - характерная площадь.

Численный расчет по модели дает возможность спрогнозировать изменение количества зеленых насаждений в Новой Москве, основываясь на застройке Новомосковского Административного Округа Москвы (НАО) на 2017 год.

Модель позволила выявить пороговые значения критических процессов, характерных для развития УЭС, а также рассмотреть основные математические принципы развития автоволновых явлений, формирующих их структуры.

Список литературы

1. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2012). World Urbanization Prospects: The 2011 Revision.
2. А.Е. Сидорова, Н.Т. Левашова, А.А. Мельникова, Н.Н. Дeryugina, А.Е. Семина. Autowave Self-Organization in Heterogeneous Natural–Anthropogenic Ecosystems // Moscow University Physics Bulletin, 2016, Vol. 71, No. 6, pp. 562-568.
3. Levashova N., Melnikova A., Semina A., Sidorova A. Autowave mechanisms of structure formation in urban ecosystems as the process of self-organization in active media // Communication on Applied Mathematics and Computation, 2017, Vol. 31, No. 1, с. 32-42.
4. Сидорова А.Э., Левашова Н.Т., Мельникова А.А., Семина А.Е. Модель структурообразования урбозкоосистем как процесс автоволновой самоорганизации в активных средах. // Математическая биология и биоинформатика, 2017, Т.12. N 1. С. 186-198.