

## Автоволновая модель структурообразования урбоэкосистем с пространственными неоднородностями

А. Е. Семина,<sup>\*</sup> А. Э. Сидорова,<sup>†</sup> Н. Т. Левашова,<sup>‡</sup> А. А. Мельникова<sup>§</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра биофизики  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Статья поступила 30.06.2018; Подписана в печать 09.08.2018)

Рассмотрена модель пространственно-временной самоорганизации урбоэкосистем как суперпозиция сопряженных активных сред, учитывающая пространственные неоднородности развития антропогенных и природных факторов. Антропогенным фактором считается высокая скорость роста численности и плотности населения за счет концентрации жилых, промышленных, торговых и иных объектов, а также средств коммуникации, природным — уменьшение площадей естественных биоценозов. В основе модели — модифицированное авторами уравнение ФитцХью–Нагумо. Обоснованность применения уравнения данного типа определяется относительной простотой системного анализа двух уравнений типа «активатор–ингибитор». В работе проводится 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 гг. Модель с пространственными неоднородностями позволяет выявлять пороговые значения управляющих параметров и рассмотреть основные принципы развития автоволновых процессов, формирующих структуру урбоэкосистем.

PACS: 89.75

УДК: 577

Ключевые слова: урбоэкосистемы, самоорганизация, активные среды, автоволны, неоднородные структуры.

### ВВЕДЕНИЕ

Вопросу морфологии распределения населения в городских условиях уделяется немало внимания в литературе. Известно, что города с единственным центром функции плотности распределения населения хорошо описываются законом экспоненциального роста [1, 2], однако данные модели не применимы для крупных городов, обладающих множественными пиками плотности населения. Одним из перспективных комплексных методов исследования городской структуры является комбинация теории клеточных автоматов и цепей Маркова, где правила перехода одинаковы для всех ячеек инфраструктуры, а вероятность последовательных случайных событий вычисляется при фиксированном состоянии системы [3]. Применение теории фракталов для описания морфологии городских паттернов позволяет исключить представления об однородном пространстве и использовать аналогии между структурой городских паттернов и фрактальными структурами [4]. Данные методы позволяют описывать морфологию города с точки зрения пространственной и социально-экономической структуры, но не учитывают нелинейный эффект взаимодействия многочисленных антропогенных и природных факторов в границах описываемой системы, а следовательно, не рассматривают города в качестве общей экосистемы, что сводит процессы в сложных системах к линейным.

С нашей точки зрения, процесс структурообразования городов целесообразно рассматривать с позиций теории самоорганизации в активных средах, а сами города в качестве урбоэкосистем (УЭС), составленных сопряженными подсистемами — антропогенной и природной [5–10]. Данный вид экосистем характеризуется высокой скоростью роста численности и плотности населения за счет концентрации жилых, промышленных, торговых и иных объектов, а также средств коммуникации. В результате, в границах УЭС наблюдается более активный энерго- и массообмен и высокая интенсивность процессов метаболизма. Перечисленные условия нарушают динамическое равновесие потоков энергии, вещества и информации, снижают «буферную емкость» природных подсистем и увеличивают нелинейность, а, следовательно, и неустойчивость, системных процессов.

УЭС, как сопряженные активные среды, относятся к нелинейным динамическим макроструктурам, состоящим из сопряженных во времени и пространстве природных и антропогенных подсистем [5–10]. 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. В результате увеличения численности и плотности населения растет плотность застройки, увеличивается количество транспорта, промышленных предприятий, торговых и других сопутствующих росту населения структур, протяженность коммуникаций. Эти процессы приводят к расширению границ УЭС и к их слиянию в общие системы.

Самоорганизация проявляется в образовании автоволновых диссипативных структур [11–13], способных поддерживать устойчивость УЭС в допороговом состо-

\*E-mail: [syoanya@yandex.ru](mailto:syoanya@yandex.ru)

†E-mail: [sky314bone@mail.ru](mailto:sky314bone@mail.ru)

‡E-mail: [natasha@npanalytica.ru](mailto:natasha@npanalytica.ru)

§E-mail: [melnikova@physics.msu.ru](mailto:melnikova@physics.msu.ru)

янии. Порог устойчивости системы непосредственным образом связан с суперпозицией малых флуктуаций в слабозбудимых зонах открытых систем. В этих зонах возможно возникновение незатухающих источников импульсов, распространяющихся в различных направлениях с одинаковой частотой — латентных источников автоволн.

Модель возбудимой среды позволяет с учетом диффузии, играющей значительную роль при формировании структур и функций в системе со множественными локальными неоднородностями, исследовать динамику природно-антропогенных потоков, характерных для урбозкосистем (УЭС). Исследования биологических систем показали, что при различных соотношениях коэффициентов диффузии активатора и ингибитора системных процессов возможно существование как нестационарных, так и стационарных структур. При этом качественный переход в режимах происходит уже при близких по значению соотношениях коэффициентов диффузии активатора и ингибитора. В случае доминирования природных процессов экосистема однозначно способна к естественной автоволновой самоорганизации. А в случае значительного дисбаланса в сторону антропогенного воздействия водителем ритма постепенно захватывает все пространство, что вызывает, как правило, необратимые системные процессы, поскольку, например, сокращение площадей биоценозов приводит к образованию качественно новых экосистем с катастрофически и непропорционально уменьшающимся количеством видов.

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 [14], поэтому антропогенные процессы в 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, слабозбудимых и невозбудимых зон, наличия латентных

источников автоволн, численности и плотности населения и от других факторов.

Величина эффективной скорости распространения волны активатора в потоке активной среды будет зависеть от гетерогенности среды (пространственного соотношения размеров возбудимых, слабозбудимых и невозбудимых зон). Мозаичность распределения слабозбудимых и невозбудимых зон, размер которых существенно меньше длины волны, а также структурно-функциональная сложность УЭС, связанная с наличием сети прямых и обратных связей, способны усиливать или подавлять антропогенные воздействия на автоволновую самоорганизацию экосистемы. В этом случае возможно формирование множественных латентных источников автоволн, туннельных эффектов и «запирающих» автоволн. В результате возможно возникновение хаотического режима самоподдерживающихся возбуждений в ограниченной области пространства. Регулярность развития этого процесса определяется взаимным расположением зон различной возбудимости и размерами зон туннелирования и запирающих.

В качестве активаторов системных процессов предлагается рассматривать: загрязнение химическими веществами, техногенные электромагнитные излучения, коррозию подземных сооружений и коммуникаций, изменение температуры, кислотности (рН) и окислительно-восстановительного потенциала (Еh) подземных вод, акустические и вибрационные нагрузки на верхний слой литосферы, рост концентрации тяжелых металлов в биогенном веществе и т.д. В качестве ингибиторов — удельное электрическое сопротивление, возрастание/уменьшение плотности и влажности почво-грунтов, скорость течения и перемешивания подземных вод, площадь природного каркаса и т.д. [5–10].

## 1. АВТОВОЛНОВАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УРБОЭКОСИСТЕМ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ

На базе уравнения ФитцХью–Нагумо [15] авторами предложена система уравнений [5–10]:

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

где  $u$  — функция интенсивности антропогенных процессов (активатор),  $v$  — функция интенсивности природных процессов (ингибитор).

Введённое авторами произведение  $uv$  расширяет возможности математического анализа перекрестных вза-

имодействий активатора и ингибитора. Решения уравнения относительно  $u$  и  $v$  неотрицательны. Здесь  $\alpha$  — параметр активации системы (этот параметр уменьшается с увеличением плотности населения),  $\alpha < 1$ ,  $\gamma$  — кинетический параметр затухания ингибитора,  $\gamma > 0$ ,

$\beta$  — кинетический параметр взаимодействия активатора и ингибитора,  $\varepsilon D_u$ ,  $\varepsilon D_v$  — коэффициенты диффузии активатора и ингибитора,  $\varepsilon$  — параметр, отражающий значительное различие скоростей изменения функций активатора и ингибитора [14], ( $0 < \varepsilon < 1$ ).

На границе расчетной области задаются краевые условия Неймана. Распределение в начальный момент времени считается известным.

В работе [9] авторами получены соотношения между параметрами  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ , в зависимости от которых система уравнений (1) описывает бистабильную или моностабильную среду. Достаточным условием для формирования автоволнового фронта активатора является соотношение параметров, соответствующее области возбудимой среды (рис. 1). На диаграмме: 1 — область моностабильности; 2 — область с внутренними переходными слоями; 3 — область бистабильности [9]. В [16–18] сформулированы условия и приведено строгое математическое обоснование существования автоволнового решения уравнения (1).

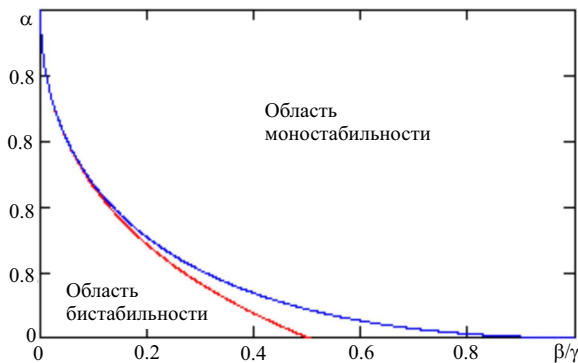


Рис. 1: Диаграмма состояния активной среды в зависимости от соотношения параметров  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$

Для УЭС факторами, определяющими пространственную неоднородность, могут являться: распределение населения в зависимости от координаты, наличие естественных барьеров (городских геобиоценозов, непригодных для строительства ландшафтов, водоемов, транспортных развязок и т.д.). Наиболее характерным распределением плотности населения для небольшого города является распределение по Гауссу. В случае двух соседних городов функцию плотности населения можно задать как суперпозицию двух распределений Гаусса с различными центрами. В [10] доказано, что в случае активного роста плотности населения происходит расширение границ города, и воз-

можно образование экосистемы с общим автоволновым фронтом. Данные аэрофотосъемки и расчеты математического моделирования подтвердили значительную вероятность слияния двух городов в общую УЭС. Таким же образом, за счет присоединения близлежащих территорий с меньшей плотностью населения к основной территории УЭС, происходит формирование мегаполисов.

## 2. АВТОВОЛНОВАЯ МОДЕЛЬ РАСШИРЕНИЯ ТЕРРИТОРИИ МОСКВЫ В РАЙОНЕ КУНЦЕВО (1952–1968 гг.) С УЧЕТОМ БАРЬЕРОВ

Барьер — это область пространства активной среды, в которой фронт волны активатора нивелируется при ширине барьера большей, чем ширина переходного слоя (запирание автоволны). Соотношение коэффициентов  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  вне барьера в нашем случае соответствует области 3 (рис. 1), а в зоне барьера — области 1. Барьерами в математической модели расширения границ Москвы являются территории, непригодные для застройки (активатор) и геобиоценозы, в границах которых отмечены необратимые экосистемные процессы (ингибитор).

Для проверки модели была рассмотрена территория застройки г. Фили, поселка Мазилово и района Кунцево с 1952 г. по 1968 г. Для проведения расчетов, согласно модели, авторами был разработан программный код, использующий метод эволюционной факторизации [19]. На основе данных аэрофотосъемки и карт [20] с использованием приложения авторской разработки на языке C++, позволяющей создавать текстовые файлы с данными на основе изображений, была получена матрица значений параметра  $\alpha$  размера [70x70], 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».

Начальные условия вводились на основе карты Москвы и Московской области в 1952 г.: поселок Мазилово уже соединился с городом Фили, и начался процесс слияния Кунцево с Москвой. На рис. 2 продемонстрирован скриншот работы программы, формирующей матрицу с начальными условиями. При моделировании вводились следующие барьеры: река и пруд (синий цвет, рис. 2), Суворовский и Филевский парки (расположены вдоль реки, отмечены желтым цветом).

Расчеты проводились согласно следующей модели:

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



где  $u = [\text{км}^2]$  — застроенная площадь;  $v = [\text{км}^2]$  — площадь уничтоженных зеленых насаждений на квадратный километр;  $\alpha(x, y, t)$  — величина, убывающая с ростом плотности населения ( $\rho$ ). Функция  $\alpha(x, y, t)$  выбиралась с учетом диаграммы (рис. 1) в виде  $\alpha(x, y, t) = \exp(-0,05K\rho(x, y, t))$ .  $D_u = \left[\frac{\text{км}^2}{\text{год}}\right]$  — скорость роста площадей застройки;  $D_v = \left[\frac{\text{км}^2}{\text{год}}\right]$  — скорость уменьшения площадей зеленых насаждений  $D_v/D_u = 1/50$ ;  $T^* = 1(\text{год})$  — характерный масштаб времени;  $K = [\text{км}^2]$  — характерная площадь

$K = 10^{-2}\text{км}^2$  — средний одноподъездный дом с зеленой придомовой территорией;  $\gamma$  — доля уничтоженной зелени от площади застройки,  $(0,1-0) \leq \gamma \leq 0,8$ ;  $\beta = 100/N_B$  — нормировочный коэффициент согласования локальной площади застройки с общей площадью застраиваемого района.  $N_B = 80$  (среднее количество зданий на  $\text{км}^2$ ).

Введем безразмерные величины:  $u \leftrightarrow \frac{u}{K}$ ,  $v \leftrightarrow \frac{v}{K}$ ,  $D_{u,v} \leftrightarrow D_{u,v}T^*/K$ .

В безразмерных величинах система уравнений (2) приобретает вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} - D_u \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) &= -u \left( u - N_B \alpha \left( \frac{x}{\sqrt{K}}, \frac{y}{\sqrt{K}}, \frac{t}{T^*} \right) \right) (u - N_B) - uv, \\ \frac{\partial v}{\partial t} - D_v \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) &= \left( -\frac{1}{\gamma}v + \beta u \right), \quad \beta = \frac{100}{N_B}. \end{aligned} \quad (3)$$

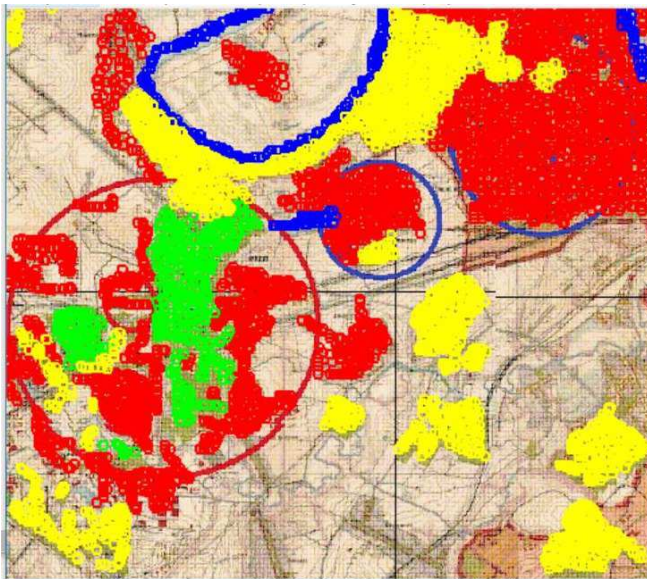


Рис. 2: Картографические данные распределения зон застройки (активатор) и естественных биоценозов (ингибитор) в 1952 г. Красным маркером отмечены зоны плотной городской застройки, зеленым — малоэтажной застройки (сельская местность), желтым — зоны парков и лесов, синим — река Москва и Мазилковский пруд, неомеченные зоны — непригодные для жилья (промышленная застройка)

В ходе разработки модели было сделано предположение, что плотность населения линейно увеличивалась с 1952 г. — 2000 чел/км<sup>2</sup> до 13000 чел/км<sup>2</sup> в 1968 г. Рост численности населения на этих территориях был связан с созданием рабочих мест, и в первую очередь благодаря формированию крупных кардиоцентров: в 1945 г. — Институт экспериментальной и клинической терапии (Институт кардиологии им.

А. Л. Мясникова, 1967 г.); в 1956 г. — кардиоцентр им. А. Н. Бакулева. Расширение рассматриваемого района Москвы происходило поэтапно: в 1952 г. — Фили и Мазилово (коттеджный поселок), в 1968 г. — Кунцево (рис. 2, 3). На основе обработанных картографических данных (рис. 2) получены начальные условия распределения активатора и ингибитора (рис. 3, б, в) и проведены численные модельные расчеты расширения границ Москвы до 1968 г. (рис. 3, д, е).

Результаты численных расчетов согласно представленной модели хорошо согласуются с картографическими данными. Так, начальные условия, представленные на рис. 2, адекватны начальным условиям развития активатора и ингибитора (рис. 3, а). Парковые и лесные зоны, а также водные преграды, отмеченные на рис. 2 желтым и синим цветом, полностью соответствуют зеленым пятнам на рис. 3, а; а зоны жилой застройки, отмеченные красным цветом на рис. 2, отмечены светло- и темно-коричневым пятнам малоэтажной застройки. Далее мы видим, что небольшие естественные биоценозы под натиском жилой застройки постепенно исчезали (рис. 3, е, з), а лесопарковая территория вдоль реки и пруд (рис. 3, г, е, з), стали естественными барьерами (рис. 3, в, д, ж). Застройка постепенно захватывала не только небольшие биоценозы, но и пустыри, а, кроме того, увеличивалась ее этажность: малоэтажная застройка (коричневая цветовая гамма на рис. 3, а) сменилась плотной городской застройкой (желтый цвет на рис. 3, г, е, з). Таким образом, численная реализация модели (рис. 3) показала адекватность применения модели с барьерами для описания расширения границ Москвы за счет присоединения близлежащих территорий.

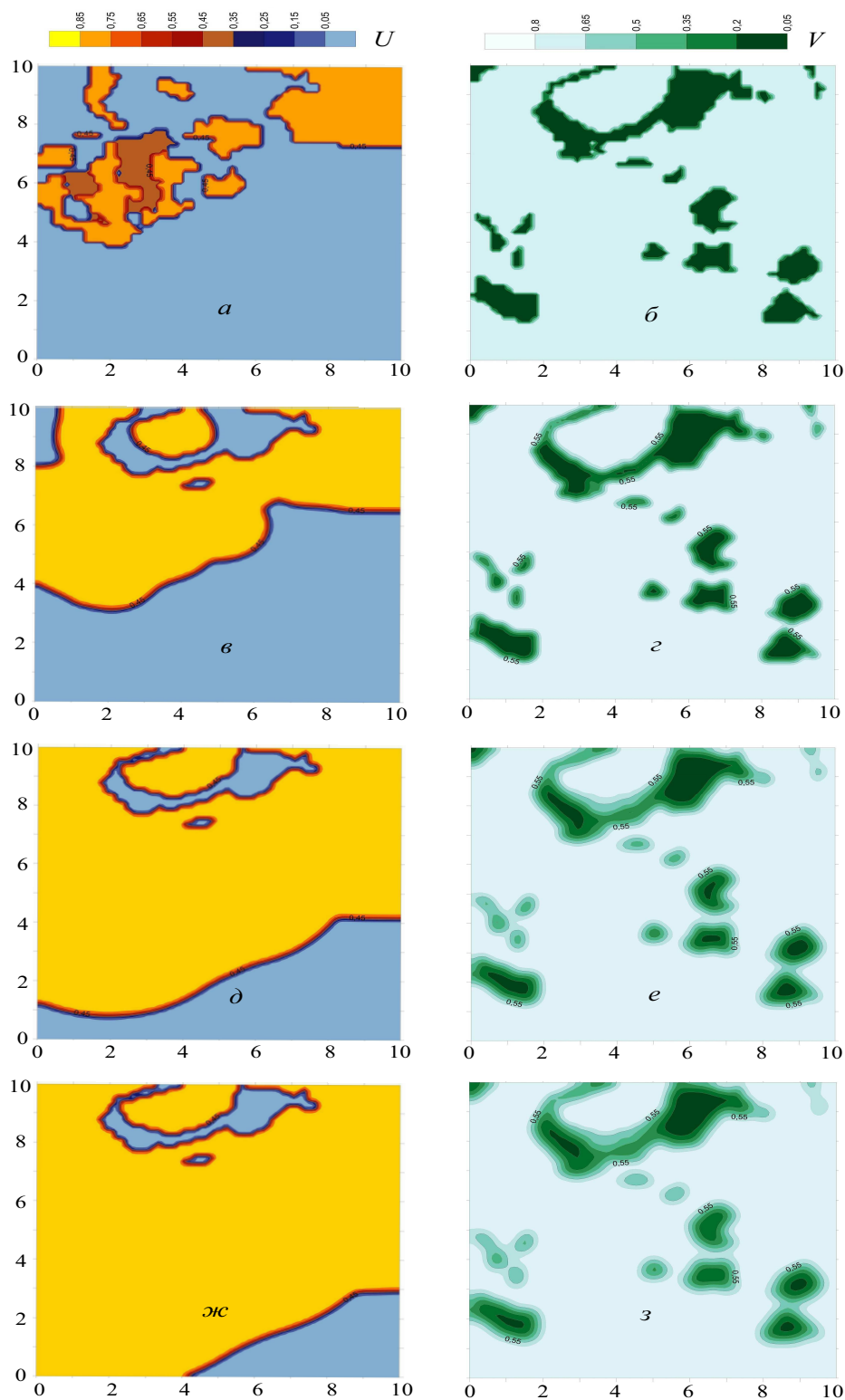


Рис. 3: Модель расширения границ Москвы за счет присоединения г. Фили и поселка Мазилово к району Кунцево: *a, б* — начальные условия, *в, г* — 1956 г., *д, е* — 1964 г., *ж, з* — 1968 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторами построена автоволновая модель развития западной части Москвы с пространственными неоднородностями (с 1952 г. по 1968 г.). Барьерами в математической модели расширения границ Москвы являются территории непригодные для застройки (активатор) и геобиоценозы, в границах которых отмечены необратимые экосистемные процессы (ингибитор). Для проведения расчетов, согласно модели, авторами был разработан программный код, использующий метод эволюционной факторизации. Численная реализация модели показала адекватность применения моде-

ли с барьерами для описания развития УЭС в пространстве и времени. Модель показала, что управление параметрами автоволновой среды посредством локальных воздействий активатора может иметь широкие перспективы, поскольку способно влиять на макроскопическую картину автоволновой динамики самоорганизации УЭС. Предложенная модель позволяет описывать характерные свойства УЭС, а обоснованность ее применения подтверждается аналитическими и численными методами.

Исследование выполнено в рамках реализации проекта РФФИ: проект 18-01-00424.

- 
- [1] *Helbich M., Leitner M. Posturban Urban Geography.* 2010. **31**, N 8. P. 1100.
- [2] *Yorgos Y. Papageorgiou J. of Regional Sci.* 2014. **54**, Iss. 3. P. 450.
- [3] *Vaz E., Arsanjani J.J. J. of Env. Informatics.* 2015. **25**, N 2. P. 71.
- [4] *Frankhauser P. Discrete Dynamics in Nature and Society.* 1998. **2**, Iss. 2. P. 127.
- [5] *Сидорова А. Э., Левашова Н. Т., Мельникова А. А., Яковенко Л. В. Биофизика.* 2015. **60**, № 3. С. 574.
- [6] *Сидорова А. Э., Мухартова Ю. В., Яковенко Л. В. Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон.* 2014. № 5. С. 29. (*Sidorova A. E., Mukhartova Yu. V., Yakovenko L. V. Mosc. Univ. Phys. Bull.* 2014. **69**, N 5. P. 392).
- [7] *Сидорова А. Э., Левашова Н. Т., Мельникова А. А., Дерюгина Н. Н., Семина А. Е. Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон.* 2016. № 6. С. 39. (*Sidorova A. E., Mukhartova Yu. V., Yakovenko L. V. et al. Mosc. Univ. Phys. Bull.* 2016. **71**, N 6. P. 562).
- [8] *Levashova N., Melnikova A., Semina A., Sidorova A. Communication on Applied Mathematics and Computation.* **31**, N 1. P. 32.
- [9] *Левашова Н. Т., Мельникова А. А., Лукьяненко Д. В., Сидорова А. Э. Математическое моделирование.* 2017. **29**, № 11. С. 40.
- [10] *Сидорова А. Э., Левашова Н. Т., Мельникова А. А., Семина А. Е. Математическая биология и биоинформатика.* 2017. **12**, № 1. С. 186.
- [11] *Murray J.D. Mathematical Biology II: Spatial Models and Biomedical Applications.* Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2003.
- [12] *Елькин Ю. В. Математическая биология и биоинформатика.* 2006. **1**, № 1. С. 27.
- [13] *Васильев В. А., Романовский Ю. М., Яхно В. Г. Автоволновые процессы.* М.: Наука, 1987.
- [14] *Савенко В. С. Геохимические аспекты устойчивого развития.* М.: ГЕОС, 2003.
- [15] *FitzHugh R. A. Biophys. J.* 1961. P. 445.
- [16] *Бутузов В. Ф., Левашова Н. Т., Мельникова А. А. ЖВ-МиМФ.* 2013. **53**, № 9. С. 9.
- [17] *Левашова Н. Т., Нефедов Н. Н., Орлов А. О. ЖВ-МиМФ.* 2017. **57**, № 5. С. 945.
- [18] *Орлов А. О., Левашова Н. Т., Нефедов Н. Н. Дифференциальные уравнения.* 2018. **54**, № 5. С. 673.
- [19] *Калиткин Н. Н., Корякин П. В. Численные методы: в 2 кн. Кн 2. Методы математической физики.* М: Издательский центр «Академия», 2013.
- [20] Retromap: карта г. Москва, район Филевский парк. URL: <http://www.retromap.ru/m.php#l=051946&z=14&y=55.743646&x=37.478585>

---

## Autowave mathematical model of urban ecosystems with spatial inhomogeneities

A. E. Semina<sup>a</sup>, A. E. Sidorova<sup>b</sup>, N. Levashova<sup>c</sup>, A. Melnikova

Department of Biophysics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University  
Moscow 119191, Russia

E-mail: <sup>a</sup>syoanya@yandex.ru, <sup>b</sup>sky314bone@mail.ru, <sup>c</sup>natasha@npanalytica.ru

A model of spatio-temporal self-organization of urban ecosystems as a superposition of conjugated active media, taking into account the nonuniformity of anthropogenic and natural factors. The high rate of growth of population and density due to the concentration of residential, industrial, commercial and other objects, as well as communication media, leads to a reduction of areas of natural biocenoses, autocatalysis of the development of anthropogenic processes and, consequently, an increase in the nonlinearity of system-wide processes. The model is based on the FitzHugh-Nagumo equation, modified by the authors. The validity of this type of application is determined by the relative simplicity of the system analysis of the two equations of the «activator–inhibitor» type. The conditions for the formation of an excitable/unexcited state of the active medium depending on the population density and the kinetic parameters of the system, as well as the formation of barrier zones such as tunneling and locking in the course of the structure formation of urban ecosystems are obtained. Analytic and numerical investigation of stationary solutions of the

system is carried out. The dimensionless model is confirmed by the dynamics of population and population density and spatial data development of Moscow (Kuntsevo District) from 1952 to 1968. The model with spatial inhomogeneities allows to reveal threshold values of control parameters and to consider the basic principles of development of autowave processes forming the structure of urboecosystems.

PACS: 89.75

*Keywords:* urban ecosystem, self-organization, active medium, autowaves, heterogeneous structures.

*Received 30 June 2018.*

#### **Сведения об авторах**

1. Семина Анна Евгеньевна — студентка кафедры биофизики; e-mail: syoanya@yandex.ru.
  2. Сидорова Алла Эдуардовна — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-11-95, e-mail: sky314bone@mail.ru.
  3. Левашова Наталья Тимуровна — канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент; e-mail: natasha@npanalytica.ru.
  4. Мельникова Алина Александровна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: melnikova@physics.msu.ru.
-