

УДК 577

АВТОВОЛНОВАЯ МОДЕЛЬ МОРФОГЕНЕЗА МЕГАПОЛИСОВ В ПРЕДСТАВЛЕНИЯХ НЕОДНОРОДНЫХ АКТИВНЫХ СРЕД

© 2019 г. А. Э. Сидорова^{1, *}, Н. Т. Левашова¹, А. Е. Семина¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: sky314bone@mail.ru

Морфогенез мегаполисов рассмотрен как процесс автоволновой самоорганизации в пространственно неоднородных средах. Представлены модели динамики развития Москвы и Шанхая. В основе модели – модифицированное авторами уравнение ФитцХью–Нагумо. Обоснованность модели подтверждена статистическими и картографическими данными. Модель позволяет прогнозировать развитие мегаполисов.

DOI: 10.1134/S0367676519010253

Вопросу морфологии распределения населения в городских условиях уделяется немало внимания в научной литературе. Наиболее перспективными методами исследования городской структуры являются комбинация теории клеточных автоматов и цепей Маркова [1] и теория фракталов, позволяющая моделировать неоднородные структуры городов [2].

Авторами в качестве биофизической основы для построения модели пространственно-временной самоорганизации урбоэкосистем (УЭС) использованы представления об активных средах [3–6]. УЭС, и в первую очередь о мегаполисах, которые характеризуются множественными режимами самоорганизации и, следовательно, сложностью оперативного и стратегического управления. Их нелинейность объективно формируется экстремальностью антропогенных нагрузок, несоответствием характерных времен и масштабов эволюции природной и антропогенной компонент, а также наличием сложной системы положительных и отрицательных связей между подсистемами. Формирование городских агломераций начинается в форме поселений – малых флуктуаций, по мере развития которых, в результате роста численности населения, формируются гигантские флуктуации – мегаполисы; в границах последних происходит фрагментация структуры экосистем. В УЭС возможны два основных варианта развития: усиление антропогенного воздействия, способствующего формированию самоподдерживающегося возбуждения среды, и ослабление антропогенного воздействия, приводящее к разрыву или уничтожению автоволнового фронта. Первый вариант – результат расширения территории УЭС.

Именно таким образом происходит формирование мегаполисов в пространстве и времени.

Аналогично происходит пространственно-временное развитие микромицетов – самой крупной группы слизевиков, тело которых является гигантской многоядерной клеткой, распространяющейся в направлении ресурса со скоростью порядка $10 \text{ мкм} \cdot \text{с}^{-1}$ [7]. (рис. 1а), а траектория движения хорошо описывается уравнениями автоволновой самоорганизации.

УЭС как системы сопряженных иерархических активных сред обладают следующими свойствами [3–6]:

1. Наличием распределенного ресурса (населения, инфраструктуры, экономических стимуляторов – стоимости жилых и нежилых объектов, территории) и источников воздействия, модулирующих системные процессы.

2. Это нелинейные макроструктуры, образующие иерархические системы из сопряженных природных и антропогенных подсистем.

3. Управляющие параметры – природные и антропогенные факторы.

На базе уравнения ФитцХью–Нагумо [10] авторами предложена пространственно-временная система уравнений [3–6]:

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

Здесь u – функция интенсивности активатора (антропогенных процессов); v – функция интен-

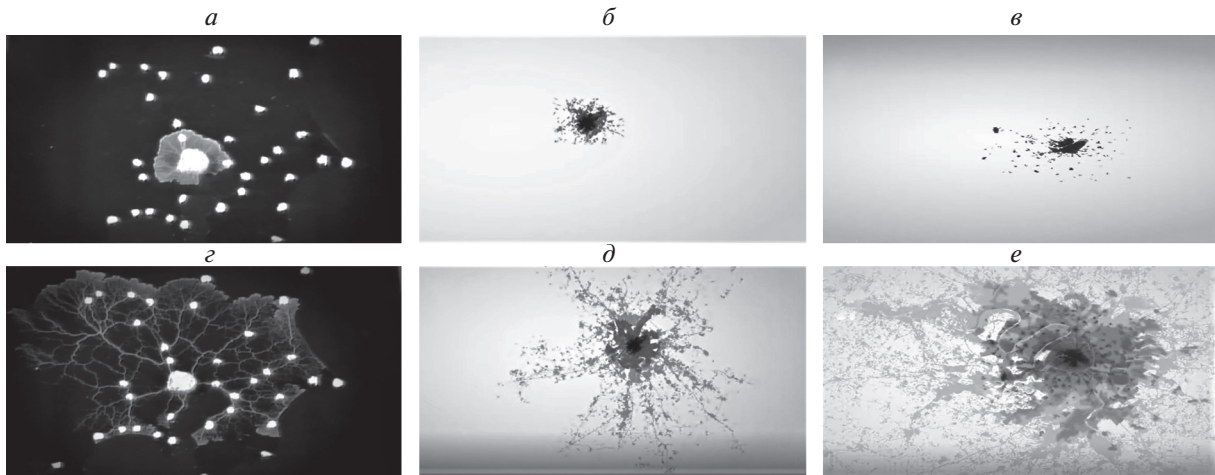


Рис. 1. Пространственно-временное распределение микромицетов (а, б) [8], Москвы (в, г) и Парижа (д, е) в зависимости от наличия ресурса [9].

сивности ингибитора (природных процессов); α – параметр активации системы; β и γ – кинетические параметры связи активатора и ингибитора D_u и D_v – коэффициенты диффузии активатора и ингибитора; ε – параметр, характеризующий скорость распространения активатора ($0 < \varepsilon < 1$), отражает значительное различие скоростей изменения функций активатора и ингибитора. На границе расчетной области задаются однородные краевые условия Неймана.

Распределение в начальный момент времени считается известным. Реализация численного счета производится при помощи схемы с эволюционной факторизацией [11].

Вырожденная система уравнений $u(u - \alpha(x, y)) \times (u - 1) + uv = 0$, $-\gamma v + \beta u = 0$ в зависимости от выбора величины α может иметь либо три, либо одно вещественное решение. В последнем случае единственное возможное устойчивое состояние системы – нулевое, то есть, любая начальная флуктуация затухает со временем. Применительно к УЭС это означает, что параметры природной подсистемы способны ингибировать негативные антропогенные процессы. В случае наличия трех вещественных решений у вырожденной системы, система (1) описывает бистабильное состояние, и в нем возможно образование устойчивых стационарных решений, содержащих внутренние переходные слои (контрастные структуры [12]) и описывающих качественное изменение состояния системы. Такая модель бистабильной среды позволяет учитывать условия туннелирования или запираания автоволны в активной среде. Достаточным условием для формирования автоволнового фронта активатора является такое соотношение параметров α , β и γ ,

которое соответствует области возбудимой среды. Система становится невозбудимой, как только кинетические параметры системы (γ и β) становятся сравнимыми [3, 6]. Необходимо учитывать, что самоорганизация возможна только в подпороговой зоне устойчивости системы (имеются в виду границы УЭС, количество, направленность и взаимодействие природных и антропогенных факторов).

Модель была проверена на примере присоединения населенных пунктов Филя, Мазилово и Кунцево к Москве (1952–1968 гг.) [5]. На основе данных аэрофотосъемки и карт [13] с использованием приложения авторской разработки на языке C++, позволяющей создавать текстовые файлы с данными на основе изображений, была получена матрица значений параметра α размера $[70 \times 70]$, 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:

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

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

Где u (км²) – площадь, застроенная на квадратный километр; v (км²) – ингибитор негатив-

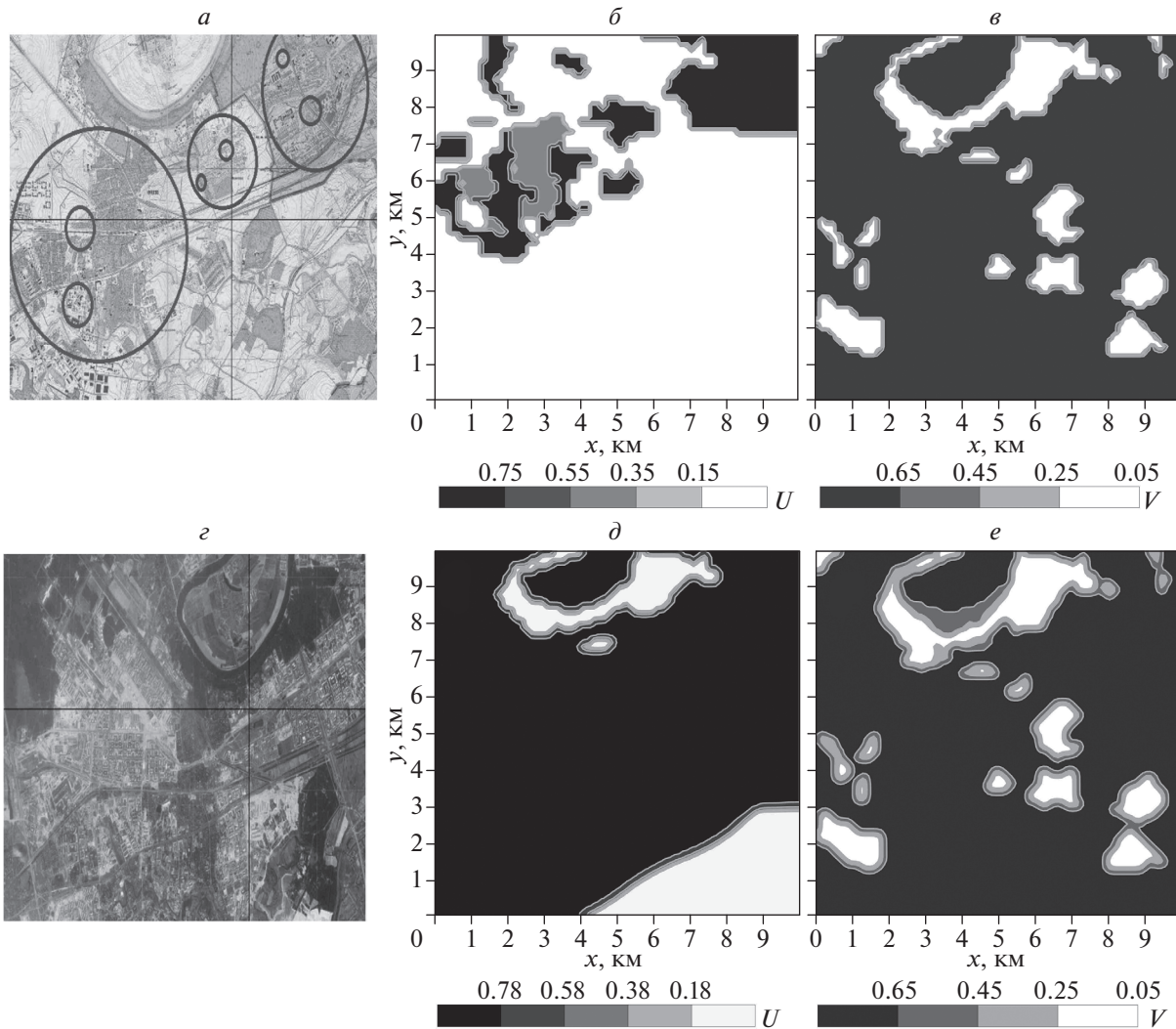


Рис. 2. Модель расширения границ Москвы за счет присоединения г. Фили и поселка Мазилово к району Кунцево: *а, б* – начальные условия, 1952 г.; *г, д, е* – 1968 г.

ных процессов застройки – площадь уничтоженных зеленых насаждений на квадратный километр; $T^* = 1$ год – характерный масштаб времени, $K = 10 \text{ км}^2$ – 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: $\alpha = KN_B \exp(-0.05K\rho)$. Начальное распределение плотности населения: жилая застройка – $\rho = 2000 \text{ чел.} \cdot \text{км}^{-2}$, промышленная территория – $\rho = 200 \text{ чел.} \cdot \text{км}^{-2}$, парки, леса и водные преграды – $\rho = 0$; $D_u = 5 \text{ км}^2 \cdot \text{год}^{-1}$ – скорость роста площадей застройки; $D_v = 0.1 \text{ км}^2 \cdot \text{год}^{-1}$ – скорость уменьшения площадей зеленых насаждений; γ – доля уничтоженной зелени от площади застройки. В области интенсивной застройки и

промышленных зон полагаем $\gamma = 0.75$: согласно нормативам, площадь биоценозов должна составлять не менее 25% от общей площади [14]; $\beta = 100/N_B$ – нормировочный коэффициент согласования локальной площади застройки с общей площадью застраиваемого района. Результаты численных расчетов представлены на рис. 2.

Результаты численных расчетов согласно модели (2) хорошо согласуются с картографическими данными (рис. 2*а, г*). В ходе расширения территории Москвы лесопарковая территория вдоль реки и пруд стали естественными барьерами (рис. 2*б, д*), а застраивались небольшие естественные биоценозы (рис. 2*в, е*). При этом малоэтажная застройка уступила место многоэтажной (рис. 2*б, д*), что автокатализовало процесс уве-

личения 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 допущения, принятые в модели:

1. Планируемые территории застройки и плотность населения приняты согласно [14], ρ – планируемая плотность населения на этих территориях, согласно их назначению. Для жилого фонда плотной застройки и промышленной зоны $\rho = 4000$ чел. · км⁻², для коттеджной застройки $\rho = 2000$ чел. · км⁻², для территорий парков $\rho = 0$, $\alpha = KN_B \exp(-0.05K\rho)$ – параметр, характеризующий назначение земель (наличие и тип застройки).

2. Планируемые лесопарковые территории составляют 10% от общей площади [15]. К 2030 году общая площадь лесопарковой территории должна составить 12 тыс. га, что составляет 8% от площади Новой Москвы. 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 ($D_v/D_u = 1/50$).

3. Численное значение кинетического параметра: $\gamma = 0$ для естественных биоценозов; $\gamma = 0.1$ для парков (согласно анализу картографических данных характерных парковых территорий Москвы [16] посредством их обработки с помощью авторской программы, площадь естественных биоценозов составила примерно 10%); $\gamma = 0.5$ – для коттеджной застройки (согласно [14, 15]); $\gamma = 0.75$ для плотной застройки (согласно [14]); $\gamma = 0.85$ – для промышленных зон (согласно [14] и обработке картографических данных с помощью авторской программы).

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 года

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

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 [17], в зоне моря $\alpha \approx 1$, в районе 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 [17] принимаем следующие значения: внутри круга меньшего радиуса на (рис. 4б) $D_u = 5067$ 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 [18]. 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. 4б) позволит не только удовлетворить спрос на жилье значительной массы населения, но и устойчиво развиваться в соответствии с нормативами сохранения естественных биоценозов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разрабатываемый подход носит общий характер и систематизирует описание пространственно-временного развития урбоэкосистем как распределенных диссипативных систем. В настоящей работе в качестве антропогенных факторов, контролирующих пространственно-временную структуру развития урбоэкосистем, рассмотрены факторы социально-экономического и физико-химического характера. Численная реализация модели показала адекватность применения модели с барьерами для описания расширения границ мегаполисов за счет присоединения близлежащих территорий.

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

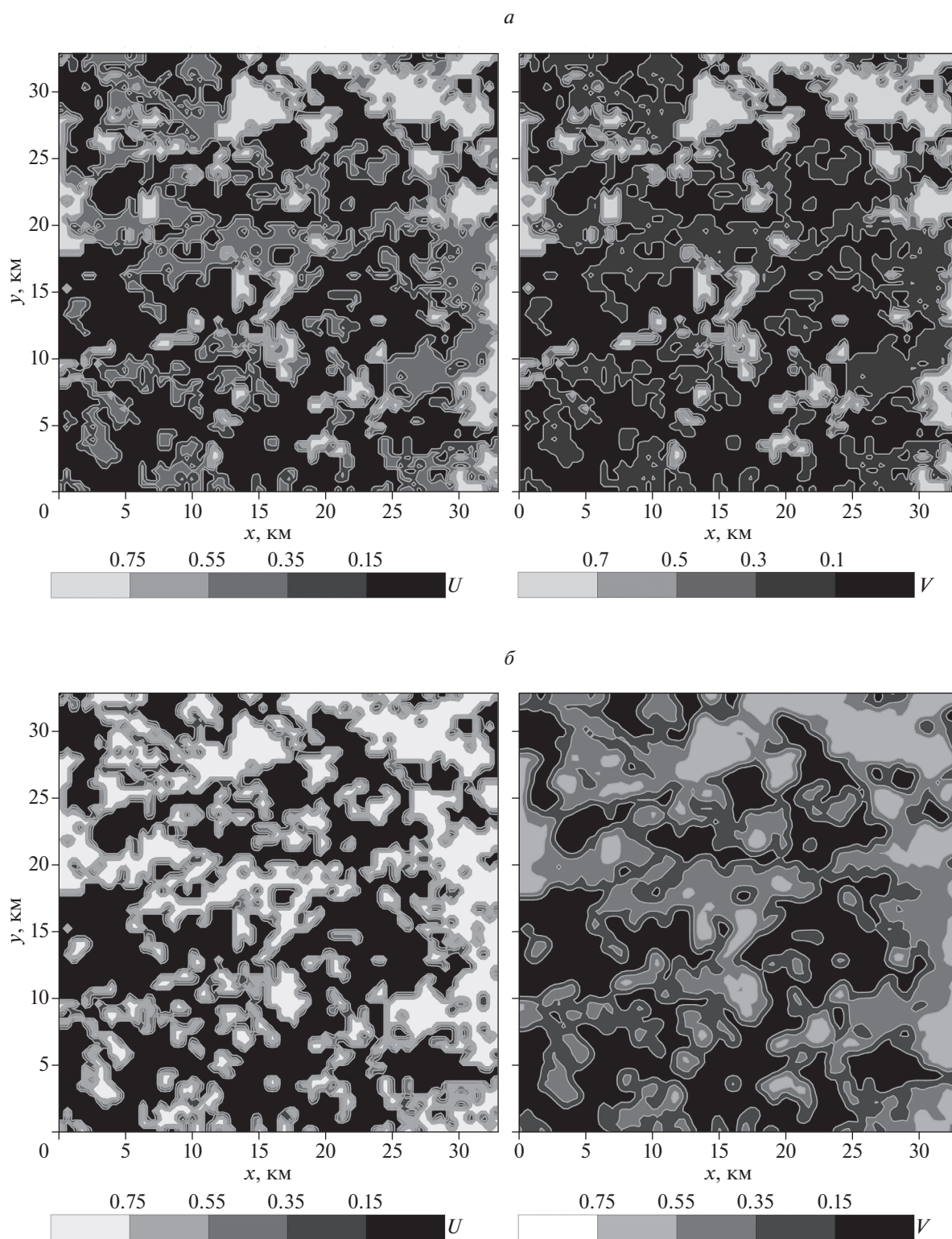


Рис. 3. Модель развития Новой Москвы до 2030 года: U – пространственное распределение застройки, V – пространственное распределение биоценозов; *a* – 2017 г. начальные условия; *b* – 2030 г. 0.85–0.75 – плотная застройка, 0.65–0.25 – коттеджная застройка, 0.1–0.05 – лесопарковая зона.

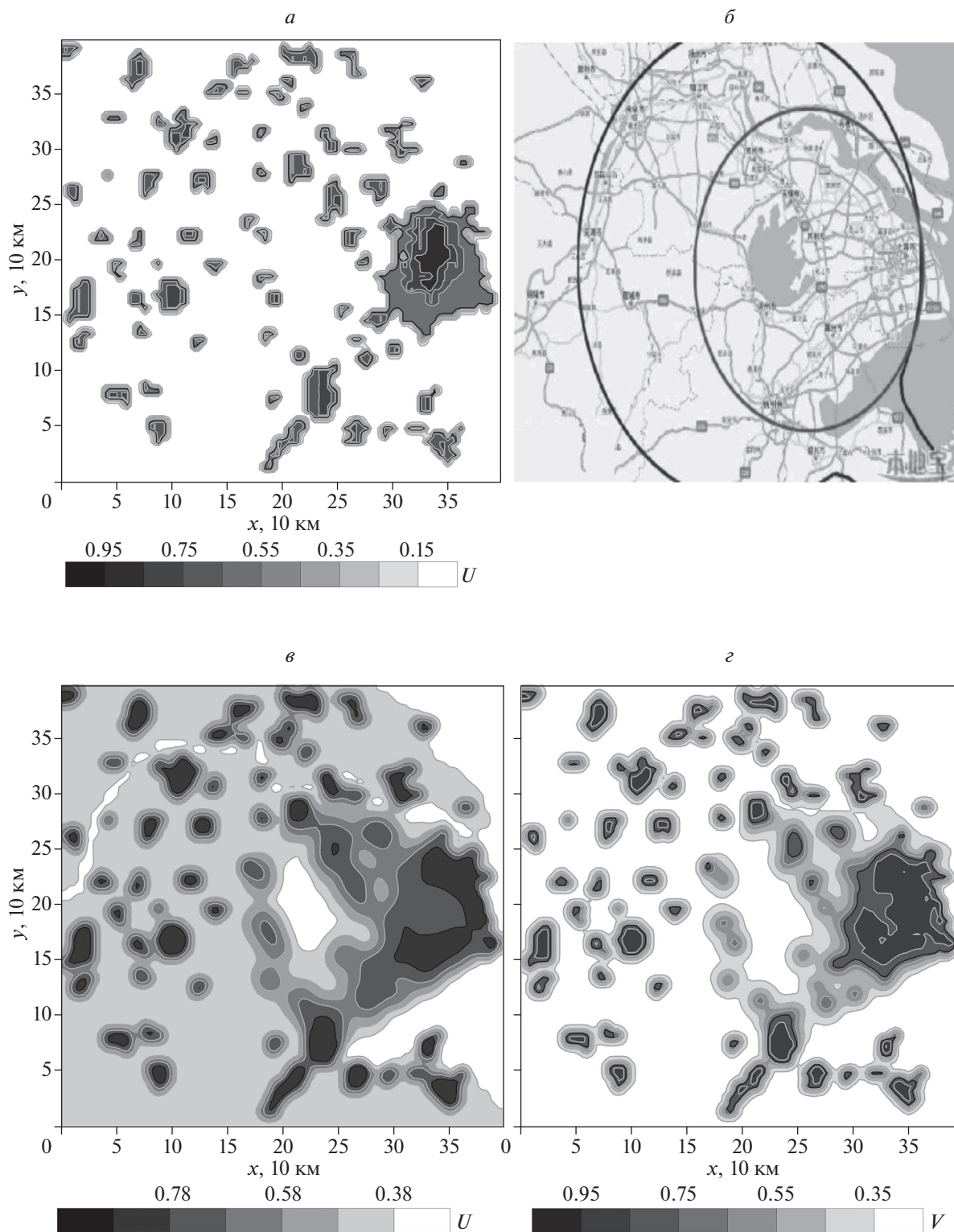


Рис. 4. Модель развития Шанхая до 2030 года: *a* – плотность застройки в 2017 году согласно картографическим данным [17]; *б* – карта застройки, согласно планам развития Шанхая [17]; *в* – плотность застройки, прогнозируемая согласно модели, к 2030 году; *г* – цена квадратного метра жилой площади, нормированная на максимум, прогнозируемая согласно модели, к 2030 году.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vaz E., Arsanjani J.J.* // J. Environmental Inform. 2015. V. 25. № 2. P. 71.
2. *Frankhauser P.* // Dynamics in Nature and Society. 1998. V. 2. № 2. P. 127.
3. *Сидорова А.Э., Левашова Н.Т., Мельникова А.А. и др.* // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 3. Физ. Астр. 2016. № 6. С. 39.
4. *Levashova N., Melnikova A., Semina A.* // Comm. on Appl. Mathematics and Computation. 2017. V. 31. № 1. P. 32.
5. *Сидорова А.Э., Левашова Н.Т., Мельникова А.А. и др.* // Матем. биол. и биоинформ. 2017. Т. 12. № 1. С. 186.
6. *Левашова Н.Т., Мельникова А.А., Лукьяненко А.А. и др.* // Матем. моделир. 2017. Т. 29. № 11. С. 40.
7. *Stephenson S.L., Seppelt R.D., Laursen G.A.* // Antarctic Sci. 1992. V. 4. P. 431.
8. <https://www.youtube.com/watch?v=MosO2HрJkBo>.
9. <https://bestmaps.ru>.
10. *FitzHugh R.A.* // Biophys. J. 1961. V. 1. № 6. P. 445.
11. *Калиткин Н.Н., Корякин П.В.* Численные методы: в 2 кн. Кн 2. Методы математической физики. М: Издательский центр "Академия", 2013. 303 с.
12. *Бутузов В.Ф., Левашова Н.Т., Мельникова А.А.* // Журн. вычислит. матем. и матем. физ. 2012. Т. 52. № 11. С. 1983.
13. <https://yandex.ru/maps/213/moscow/>.
14. <https://stroi.mos.ru/infographics/novoi-moskvie-piat-liet-1>.
15. <https://investmoscow.ru/city-projects/aip/план-развития-новых-территорий/>.
16. <https://stroi.mos.ru/new-moscow/obustroistvo-par-kov>.
17. <http://www.stats-sh.gov.cn/tjnj/zgsh/nj2011.html>.
18. *Jinghui Li, Wei Fang, Tao Wang. et al.* // Sustainability 2017. № 9. P. 1199.