

ПОПУЛЯЦИОННАЯ МОДЕЛЬ УРБОЭКОСИСТЕМ В ПРЕДСТАВЛЕНИЯХ АКТИВНЫХ СРЕД

© 2015 г. А.Э. Сидорова, Н.Т. Левашова, А.А. Мельникова, Л.В. Яковенко

Физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,
119991, Москва, Ленинские горы, 1/2

E-mail: sky314bone@mail.ru, natasha@npanalytica.ru, melnikova@physics.msu.ru, leo.yakovenko@mail.ru

Поступила в редакцию 23.03.15 г.

Представления об активных средах использованы в качестве биофизической основы для построения модели пространственно-временной самоорганизации в природно-антропогенных экосистемах, проявляющейся в образовании регулярных динамических структур, которые характеризуются устойчивыми или неустойчивыми режимами развития. Урбоэкосистемы составлены иерархиями сопряженных активных сред, и 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 обратных связей между подсистемами. В основе представленной, заведомо упрощенной, модели лежит модифицированное уравнение Фитц-Хью-Нагумо. Разрабатываемый подход носит общий характер и систематизирует описание пространственно-временного развития урбоэкосистем как распределенных диссипативных систем.

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

Человек в процессе популяционной экспансии осваивал все большие пространства Земли, оставаясь в границах вида и биосферы. Динамика расселения *Homo sapiens* в значительной степени связана с социально-экономической самоорганизацией общества [1]. Рассматривая проблему с позиций синергетики, можно считать, что антропосфера сформировала мозаичную диссипативную структуру [2]. Согласно исследованиям, 2009 год стал точкой бифуркации: впервые за всю историю человечества численность городского населения сравнялась с численностью сельского населения. Согласно прогнозам, к 2050 году доля численности городского населения увеличится до 65–68% [3]. Поэтому Н.Н. Моисеев связывал проблему организации жизненного пространства на планете с проблемой устойчивости биосферы [1].

В настоящее время широко применяемые для анализа динамики урбоэкосистем (УЭС) модели базируются на устоявшихся представлениях этих экосистем с точки зрения «экономического ландшафта» ([4] и др.). С нашей точки зрения УЭС целесообразно рассматривать как иерархии активных сред от геобиосферного до социосферного уровней. Особенности эволюционного развития сделали УЭС

существенно нелинейными многокомпонентными системами, с большим трудом поддающимися математическому моделированию, заведомо необходимому для выработки цивилизационно приемлемой траектории их управляемого устойчивого развития. Вместе с тем даже упрощенные модели, от биогеосферных до антропосферных, базирующиеся на разумных междисциплинарных посылах, позволяют осмыслить принципиальные особенности динамики и адаптационной способности УЭС.

Целью развиваемого системного подхода является анализ устойчивости УЭС, который строится на основе синергетических представлений об автоволновой самоорганизации в распределенных активных средах [5–7]. Порог устойчивости УЭС непосредственным образом связан с интерференцией флуктуаций в неравновесных открытых системах, которые преобразуются в «гигантские» [8]. Формирование городских агломераций начинается в форме поселений-флуктуаций. Эти системы пропускают через себя энергию и вещество, преобразуя их. Но по мере накопления малых флуктуаций формируются гигантские флуктуации – мегаполисы, в которых в ходе разрушения естественных геобиоценозов происходит фрагментация структуры экосистем. (Простейшей моделью могут служить ячейки Бенара.) За счет прямых и обрат-

Сокращение: УЭС – урбоэкосистема.

ных связей в общей системе допустимы два основных варианта развития эффекта:

усиление антропогенного воздействия (доминирует положительная обратная связь), способствующее формированию самоподдерживающегося и распространяющегося возбуждения среды;

ослабление антропогенного воздействия (доминирует отрицательная обратная связь), приводящее к разрыву или уничтожению автоволнового фронта.

Качественно обобщенный критерий устойчивости биосферы/антросферы можно сформулировать следующим образом: оптимальное сочетание латерального распределения биоразнообразия и иерархической стратификации форм жизни, сопряженных прямыми и обратными положительными и отрицательными связями, образованными потоками вещества, энергии и информации. В этом отношении первичным фактором устойчивого или же неустойчивого развития антросферы становятся особенности расселения человеческой популяции.

ОБЩИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ МОДЕЛИ

Как известно, основным свойством открытых экосистем является способность переходить к устойчивой структуре через флуктуации и бифуркации. В зависимости от того, лежат ли размеры начальной области флуктуации ниже или выше критических значений параметров экосистемы, флуктуация либо затухает, либо распространяется в границах системы. Этот процесс связан с зависимостью критических параметров экосистемы от свойств и режимов функционирования экосистемы данного вида. Вместе с тем необходимо отметить, что состояние сложных систем есть результат конкуренции между устойчивостью, которая обеспечивает связь между ее элементами, и неустойчивостью, порождаемой флуктуацией. И чем сложнее структура экосистемы, тем больше возникает в ней устойчивых и неустойчивых состояний. Это свойство мультистабильности характеризует процессы самоорганизации природно-антропогенных систем [5,6].

УЭС крупных городов, в первую очередь мегаполисов, относятся к нелинейным системам, характеризующимся множественностью режимов самоорганизации и, вследствие этого, сложностью оперативного и стратегического управления ими. В реальных урбо- и природных экосистемах ресурс энергии распределен по системе, это – «активная среда». Локальные транс-

форматоры энергии преобразуют формы энергии сопряженно с преобразованием вещества при наличии «возмущения» в соседних элементах или при получении управляющего сигнала через обратную положительную или отрицательную связь. Таким образом, в общем случае УЭС можно отнести к реакционно-диффузионно-автокаталитическим системам. (Канализация взаимодействий, наличие структуры связей, по которым оно осуществляется, не позволяет в общем случае описывать такую систему как диффузионную. Это такая же ситуация, как с взаимодействиями в белковых комплексах фотосистем и митохондрий или в нейронных системах.) В целом УЭС как системы сопряженных иерархических активных сред обладают следующими свойствами [5–7].

1. Наличием распределенного ресурса (энергии, вещества, информации) и источников воздействия, модулирующих системные процессы. Вследствие существования рефрактерных зон исключены явления суперпозиции. Возможно наличие различных динамических режимов (регулярных автоколебательных и автоволновых и нерегулярных – хаотических).

2. УЭС – нелинейные динамические макроструктуры, образующие иерархические системы из сопряженных природных и антропогенных подсистем. Для упрощения трехмерная иерархическая структура упрощенно рассматривается как одномерная. Динамика УЭС определяется взаимодействиями прямых и обратных связей взаимодействующих подсистем.

3. Управляющие параметры – природные и антропогенные факторы, формирующие длину и форму автоволн.

4. Скорости природных процессов много меньше скоростей антропогенных процессов [9], поэтому антропогенные процессы можно считать активаторами, а природные – ингибиторами общесистемных изменений.

В отличие от используемого в области математического моделирования процессов в активных средах «правила», согласно которому в качестве активатора рассматриваются позитивные процессы, формирующие автоволны, для модели УЭС в качестве активатора мы предлагаем рассматривать негативные антропогенные процессы. Суть данного подхода состоит в следующем: для крупных УЭС характерно значительное количество необратимых процессов (до 50%). Это связано, во-первых, с доминированием антропогенных процессов (процессов, связанных с техногенным развитием человеческого сообщества и его жизнедеятельностью) и, во-вторых, с тем, что скорости ан-

тропогенных процессов значительно превосходят скорости природных процессов.

5. УЭС обладают свойством самоорганизации, проявляющимся в образовании автоволновых диссипативных структур.

Рассмотренные свойства позволяют качественно оценить пороговые и подпороговые условия распространения автоволнового процесса в зависимости от значений коэффициентов диффузии активатора и ингибитора, расположения возбудимых, слабозбудимых и невозбудимых зон, наличия латентных источников автоволн и от других факторов.

По изложенным выше соображениям модель, адекватно описывающая УЭС крупных городов и мегаполисов, должна включать уравнения, описывающие процессы в активных средах. Цель создания модели состоит в выявлении условий устойчивости режимов функционирования УЭС.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ МОДЕЛЬ

На базе уравнения Фитц-Хью–Нагумо [10] авторами предложена система уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} - \varepsilon D_u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = -\frac{1}{\varepsilon}(u(u - \alpha)(u - 1) + uv), \\ \frac{\partial v}{\partial t} - \varepsilon D_v \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = (-\gamma v + \beta u) \end{cases} \quad (1)$$

при следующих начальных и краевых условиях

$$\begin{aligned} u_x(0, t) = u_x(L, t) = 0, \quad v_x(0, t) = v_x(L, t) = 0, \\ t \in (0, T), \quad u(x, 0) = u_0(x), \quad v(x, 0) = v_0(x), \quad x \in [0, L], \end{aligned} \quad (2)$$

где u – функция интенсивности активатора (антропогенных процессов), v – функция интенсивности ингибитора (природных процессов).

В качестве активаторов системных процессов можно рассматривать: техногенные электромагнитные излучения, коррозию подземных сооружений и коммуникаций, изменение температуры, кислотности (рН) и окислительно-восстановительный потенциал (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, а также возрастание/уменьшение плотности и влажности почвогрунтов, скорость течения и перемешивания подземных вод, площадь природного каркаса и т.д.

Предложенное авторами произведение uv расширяет возможности анализа перекрестных взаимодействий активатора и ингибитора.

В приведенной выше системе уравнений параметры имеют следующий смысл:

$0,05 < \alpha < 0,25$ – параметр активации системы (определяется в зависимости от численности и плотности населения);

γ – кинетический параметр затухания потенциала ингибитора, $\gamma > 0$;

β – кинетический параметр затухания потенциала активатора, $\beta > 0$;

D_u и D_v – коэффициенты диффузии активатора и ингибитора;

$0,1 < \varepsilon D_u < 1$; $0,01 < \varepsilon D_v < 0,1$, где ε – параметр, характеризующий скорость распространения активатора ($0 < \varepsilon < 1$), отражает значительное различие скоростей изменения функций активатора и ингибитора. Наличие множителя $\frac{1}{\varepsilon}$ в правой части уравнения (1)

означает, что скорость изменения u значительно больше скорости изменения v .

Решения уравнений относительно u и v неотрицательны.

Для нелинейных систем характерно наличие резких внутренних переходных слоев в пространстве, т.е. таких пространственных областей, в которых происходит резкое изменение функций интенсивности активатора и ингибитора. На практике эти области можно интерпретировать как окраины «спальных районов» в городе или граничные области между мегаполисами и соседними «городами-спутниками». Условия существования стационарных решений с внутренними переходными слоями у начально-краевой задачи (1)–(2) сформулированы в работе [11].

Как известно, важную роль в определении возможных состояний среды, описываемой уравнениями (1), играет так называемая вырожденная точечная система

$$u(u - 1)(u - \alpha) + uv = 0, \quad -\gamma v + \beta u = 0. \quad (3)$$

Первое уравнение этой системы – кубическое относительно функции u , причем один из корней этого уравнения $u_1 = 0$. Два других корня даются выражениями

$$\begin{aligned} u_2(v) &= \frac{1}{2}(\alpha + 1 - \sqrt{(\alpha - 1)^2 - 4v}), \\ u_3(v) &= \frac{1}{2}(\alpha + 1 + \sqrt{(\alpha - 1)^2 - 4v}). \end{aligned} \quad (4)$$

В зависимости от выбора величины α эти корни могут быть вещественными или комплексными. В последнем случае единственное

возможное устойчивое состояние системы – нулевое. В такой системе любая начальная флуктуация затухает со временем. Применительно к УЭС это означает, что параметры природной подсистемы способны ингибировать негативные антропогенные процессы.

В случае вещественных корней у уравнений (4), система становится бистабильной, и в ней возможно образование устойчивых стационарных решений, содержащих внутренние переходные слои (контрастные структуры), в которых происходит резкое изменение системы от состояния $u_1 = 0$ к состоянию $u = u_3$. Такая модель бистабильной среды [12] позволяет учитывать прохождение автоволны через невозбужденные участки активной среды. В этом случае (после исключения диффузии) кинетика автоволнового процесса такова: локальное возмущение состояния $u = u_1$ (если амплитуда этого возмущения не превышает u_2), релаксирует к исходному невозмущенному состоянию ($u_1 = 0$), если амплитуда возмущения превысит некоторое пороговое значение, «притягивающим» состоянием становится $u = u_3$. Таким образом, для возникновения волнового режима необходимо начальное возмущение, превышающее пороговый уровень.

НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ УСТОЙЧИВЫХ КОНТРАСТНЫХ СТРУКТУР

Существенен вопрос о том, при каких начальных условиях возможно формирование устойчивых контрастных структур.

В качестве начальной флуктуации активатора в настоящей работе используется функция, имеющая вид «пика» или «всплеска» (рис. 1).

Существенным является вопрос о высоте «всплеска», достаточной для формирования устойчивых контрастных структур в случае наличия у первого уравнения (4) трех вещественных корней. Согласно проведенным авторами численным экспериментам, устойчивые переходы формируются из такой начальной функции, максимальное значение которой выше некоторого порогового значения. Величина порогового значения в каждой точке $x \in [0; L]$ определяется так называемой пороговой функцией $\psi(x)$. Опираясь на результаты работы [13], мы предположили, что эта функция может быть определена из следующего условия:

$$\int_{u_1}^{\psi(x)} u((u - \alpha(x))(u - 1) + v(x)) du = 0. \quad (5)$$

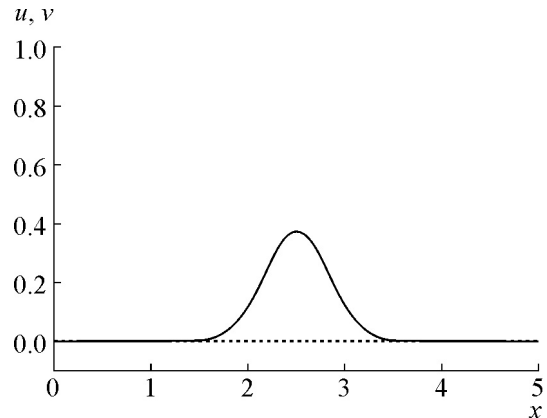


Рис. 1. График начального распределения функции интенсивности активатора.

Вычисляя интеграл при $u_1 = 0$, получаем выражение для функции $\psi(x) := \psi(v(x), \alpha(x))$

$$\psi(v(x), \alpha(x)) = \frac{2}{3}(\alpha(x) + 1 - \sqrt{(\alpha(x))^2 - 2,5\alpha(x) + 1 - 4,5v(x)}). \quad (6)$$

Согласно проведенным численным экспериментам, функция $\psi(v(x), \alpha(x))$ играет роль пороговой. Отметим, что в данной работе удалось получить уточненное выражение для пороговой функции, опираясь на результаты математических исследований, приведенных в работе [13]. Общепринятым считается, что пороговой функцией является u_2 .

ФОРМИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВЫХ СТРУКТУР В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТИПА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ НАСЕЛЕНИЯ

Важно отметить, что мегаполисы, в принципе, неспособны самостоятельно обеспечить оптимальные условия естественной самоорганизации:

воспроизводство основных компонентов природной среды, обеспечивающее баланс вещества и энергии в системе;

компенсаторное соответствие степени биогеохимической, гидрологической и физической устойчивости экосистемы уровню антропогенного воздействия.

В значительной степени это связано с высокой плотностью и численностью населения, что, в свою очередь, определяет повышенную интенсивность потоков энергии, вещества и информации в общей системе. Эти условия нарушают динамическое сопряжение локальных трансформаторов энергии, вещества и информа-

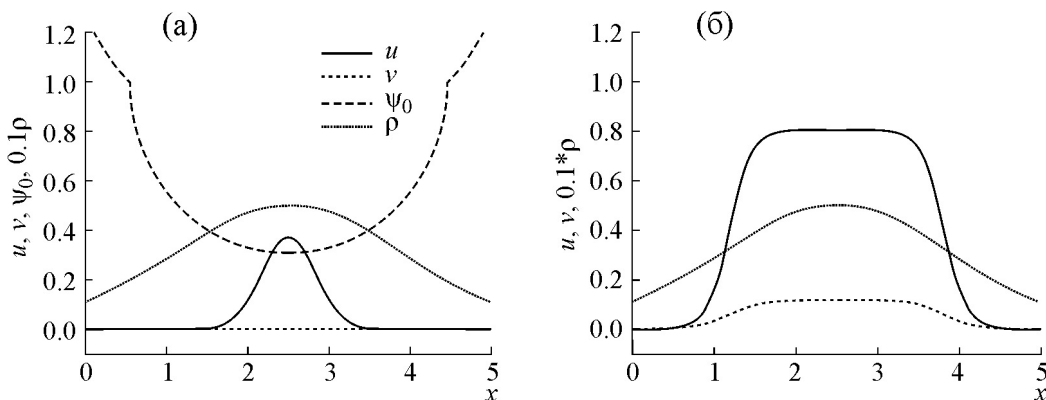


Рис. 2. Графики зависимостей функций активатора и ингибитора, распределения плотности и пороговой функции от координаты x : (а) – начальное распределение, (б) – установившееся стационарное распределение.

ции, снижают «буферную емкость» природных подсистем и увеличивают нелинейность, а следовательно, и неустойчивость системных процессов.

Известны два основных типа формирования плотности населения в городских поселениях: по Гауссу и «пятнистая» – суперпозиция двух распределений Гаусса с различными центрами.

1. Рассмотрим случай, когда плотность населения распределена по Гауссу:

$$\rho(x) = \rho_0 \exp\left(-\eta \frac{(x - x_0)^2}{2}\right), \quad (7)$$

$\eta = \frac{2}{d^2} \ln \frac{\rho_0}{\rho_d}$, где ρ_0 – плотность населения в центре ($x = x_0$), ρ_d – плотность на расстоянии d от максимума: $\rho_d = \rho(x_0 \pm d)$.

Параметр d характеризует ширину распределения (ширину пика) для функции $\rho(x)$.

Определим $\alpha(x) = \frac{1}{\rho(x)}$, где $\rho(x)$ – плотность населения:

$$\alpha(x) = \frac{1}{\rho_0} \exp\left(\eta \frac{(x - x_0)^2}{2}\right). \quad (8)$$

Начальное возмущение активатора задается функцией $u_0(x) = \mu \psi(0, \alpha(x_0)) \exp(-\lambda(x - x_0)^2/2)$, график которой представлен на рис. 2а. Функция $\psi(v(x), \alpha(x))$ определена выражением (6) $\lambda = \frac{2}{d_1^2} \ln 2$. При таком значении λ величина начальной функции в точках $x = x_0 \pm d_1$ равна половине от максимального значения.

Параметр $\mu > 1$ характеризует превышение начального возмущения относительно порогового значения воздействия активатора в точке максимума $\mu = \frac{u_0(x_0)}{\psi(0, \alpha(x_0))}$. Численные значения параметров системы представлены в табл. 1.

Начальное распределение выбрано таким образом, чтобы при $t_0 = 0$ максимум функций активатора и плотности распределения населения совпадал с минимумом пороговой функции. Суть в следующем: чем больше плотность населения, тем больше антропогенных воздействий, сопряженных с жизнедеятельностью населения, и тем меньше устойчивость системы; функция ингибитора в начальный момент времени равна нулю, поскольку скорость изменения u значительно больше скорости изменения v .

Таблица 1. Параметры системы

Управляющие параметры системы уравнений							Параметры распределения $\rho(x)$					Параметры функции $u_0(x)$	
ϵ	β	γ	γ/β	D_u	D_v	D_u/D_v	α_0	α_d	L	d	x_0	μ	d_1
0,04	0,15	1	6,7	5	1	5	0,2	0,9	5	0,5L	0,5L	1,2	0,07L

Примечание. $\alpha_0 = \rho_0^{-1}$, где ρ_0 – максимальное значение плотности населения (в точке $x = x_0$), $\alpha_d = \rho_d^{-1}$, d_1 характеризует ширину пика для функции $u_0(x)$; L – расчетная область.

Таблица 2. Параметры системы

Управляющие параметры системы уравнений					Параметры распределения $\rho(x)$							Параметры функции $u_0(x)$	
ϵ	γ/β	D_u	D_v	D_u/D_v	α_0	α_d	L	d	x_1	x_2	$\Delta x/d$	μ	d_1
0,04	6,7	5	1	5	0,2	0,9	5	0,25L	0,3L	0,7L	1,6	1,2	0,07L
0,04	6,7	5	1	5	0,2	0,9	5	0,25L	0,25L	0,75L	2	1,2	0,07L
0,04	6,7	5	1	5	0,2	0,9	5	0,2L	0,3L	0,7L	2	1,2	0,07L

Примечание. $\Delta x = x_2 - x_1$ – расстояние между максимумами функции распределения плотности $\rho(x)$.

Рассмотрим случай, когда плотность населения имеет несколько максимумов. Пусть максимумы функции распределения плотности расположены в точках с координатами $x = x_i, i = 1, 2$ (табл. 2, рис. 3). Распределение задается функцией:

$$\rho = \rho_0(\exp(-\eta(x - x_1)^2/2) + \exp(-\eta(x - x_2)^2/2)), \tag{9}$$

где $\eta = \frac{2}{d^2} \ln \frac{\rho_0}{\rho_d} = \frac{2}{d^2} \ln \frac{\alpha_d}{\alpha_0}$, $\rho_0 = \alpha_0^{-1}$ – плотность в максимуме, $\rho_d = \alpha_d^{-1}$ – плотность на расстоянии d от максимума: $\rho(x_i \pm d) = \rho_d$.

Начальный вид функции интенсивности антропогенных факторов $u(0) = u_0$:

$$u_0 = \mu(\psi(0, \alpha(x_1)) + \psi(0, \alpha(x_2))) \times (\exp(-\lambda(x - x_1)^2/2) + \exp(-\lambda(x - x_2)^2/2)). \tag{10}$$

Пороговая функция $\psi(v(x), \alpha(x))$ вычисляется согласно формуле (6).

$$\mu > 1, \quad \lambda = \frac{2}{d_1^2} \ln 2.$$

Функция $u_0(x)$ имеет два максимума, расположенных в точках $x = x_i, i = 1, 2$.

Анализ графиков при наличии нескольких пиков плотности населения показывает, что в системе отмечается формирование автоволн как активатора, так и ингибитора. С течением времени распределение становится стационарным.

Анализ условий существования стационарного переходного слоя, полученных в работе [11] при заданном выражении для $\alpha(x) = \rho^{-1}(x)$ (ρ определяется выражением (9)) показывает, что для образования устойчивого стационарного решения с внутренним переходным слоем определяющую роль играет величина отношения $\Delta x/d$ (d характеризует ширину пика для функции $\rho(x)$, $\Delta x = x_2 - x_1$ – расстояние между максимумами функции распределения плотно-

сти). При значении параметров $\gamma/\beta = 6,7$ (соотношение, достаточное для формирования автоволны); $\alpha_0 = 0,2, \alpha_d = 0,9$, расчет дает следующее условие существования переходных слоев между пиками: $\Delta x/d \geq 1/8$. Численный расчет для случая $\Delta x/d = 1,6$ приведен на рис. 3а,б. Стационарное распределение функций интенсивности активатора и ингибитора между пиками плотности населения в этом случае близко к насыщению. Графики на рис. 3в–е соответствуют значению $\Delta x/d = 2$. В этом случае решение имеет четко выраженные внутренние переходные слои, локализованные между точками x_1 и x_2 . Таким образом, согласно предложенной модели существует некоторая критическая величина отношения $\Delta x/d$. В случае превышения этой величины, с точки зрения данной модели, возможно формирование промежуточных зон (с меньшей плотностью населения) между двумя пространственными областями с большой плотностью населения.

Сравнивая графики на рис. 3в–е, можно отследить эффект влияния диффузии. На рис. 3в,г наблюдается «проседание» функции интенсивности ингибитора практически до нуля. На рис. 3д,е это «проседание» заметно меньше. Данный эффект связан с перекрытием переходных слоев, имеющим место в случае, приведенном на рис. 3д,е. Действительно, согласно теоретическим исследованиям [14], ширина переходного слоя для функции u имеет порядок $\sqrt{\epsilon D_u}$. Условие перекрытия переходных слоев можно сформулировать как $\frac{\Delta x}{\sqrt{\epsilon D_u}} \leq 1$. В случае на рис. 3д,е $\left(\frac{\Delta x}{\sqrt{\epsilon D_u}} \cong 0,89\right)$ переходные слои перекрываются. В случае графика 2 при $\frac{\Delta x}{\sqrt{\epsilon D_u}} \cong 1,1$ перекрытие переходных слоев не происходит.

Полученные в модельном исследовании результаты свидетельствуют о том, что в предельно упрощенной системе при опоре на адекватные основополагающие принципы могут

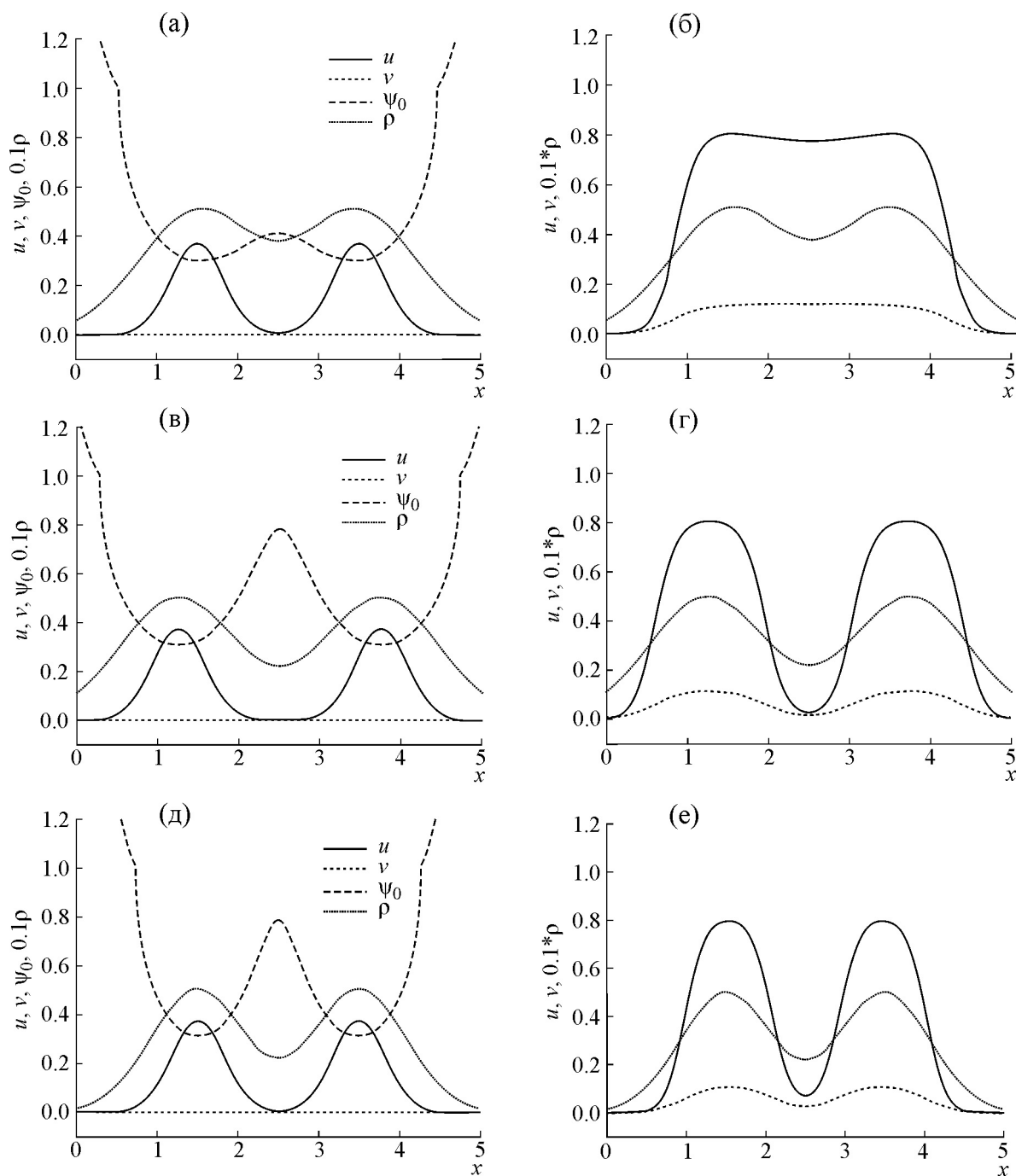


Рис. 3. Графики зависимостей функций активатора, ингибитора, распределения плотности пятнами (несколько максимумов) и пороговой функции от координаты x : (а), (в), (д) – начальное распределение, (б), (г), (е) – установившееся стационарное распределение.

быть получены принципиальные свидетельства того, что малые возмущения способны приводить к значительным и необратимым отклонениям системы от состояния устойчивости.

Человеческое сообщество как элемент «антропосферы» характеризуется мозаичностью расселения (в зависимости от природных условий и социально-экономических задач) и мно-

гогранностью взаимодействия с окружающей средой. Вследствие этого, суммарная антропогенная нагрузка крайне неоднородна, а ее оценка чрезвычайно затруднена. Если представления о синергетической природе биосферы получили в научной литературе достаточно широкое распространение, то представления о природно-антропогенных активных средах как методоло-

гической основе развития экосферы находятся лишь в стадии становления. В настоящее время наиболее востребованным направлением биофизики макросистем определенно становится выработка стратегических системных критериев устойчивого развития экосферы и ее основных элементов (например, УЭС), чему в значительной степени может способствовать разработка новых теоретических подходов, связанных с синергетическими представлениями современного естествознания.

Известно, что сложные системы, состоящие из значительного количества взаимодействующих элементов, эволюционируют к критическому состоянию – явление самоорганизованной критичности [15]. И именно к таким системам относятся все более усложняющиеся урбоэко-системы, в которых цепные/автокаталитические реакции – неотъемлемая часть динамики. Поэтому лишь рассмотрение общих закономерностей и воздействие на систему с помощью управляющих параметров (в данном случае – численности и плотности населения) позволяет обнаружить признаки самоорганизованной критичности и, следовательно, найти возможности устойчивого развития систем на каждом временном отрезке с учетом сети прямых и обратных связей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В перспективе предложенная модель, объясняющая основные закономерности развития УЭС, может быть усовершенствована путем учета различных факторов, влияющих на систему путем соответствующей модификации функций в правых частях уравнений системы (1). Такой подход позволит изучать как влияние каждого фактора по отдельности, так и совокупности факторов. Данная модель напрямую применима для описания биоценозов в латеральной и шельфовой зонах в представлениях активных сред.

Авторы выражают глубокую признательность профессору В.А. Твердислову за помощь в работе.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 13-05-01174-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Н. Н. Моисеев, *Судьба цивилизации. Путь Разума* (Языки рус. культуры, М., 2000).
2. В. А. Твердислов, А. Э. Сидорова и Л. В. Яковенко, *Биофизическая экология* (УРСС КРАСАНДР, М., 2011).
3. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2012). World Urbanization Prospects: The 2011 Revision, CD-ROM Edition. POP/DB/WUP/Rev.2011/1/F3-F4
4. W. Christaller, *Die zentralen Orte in Süddeutschland* (Jena, 1933); A. Lösch, *Die zentralische Ordnung der Wirtschaft* (Jena, 1940); P.M. Allen and M. Sanglier, *J. Soc. Biol. Struct.* **1**, 265 (1978).
5. В. А. Твердислов, А. Э. Сидорова и А. В. Дмитриев, *Синергетические аспекты глобальной и региональной экологии* (Издательский дом «Липецкая газета», Липецк, 2009).
6. А. Э. Сидорова и В. А. Твердислов, в сб. *Физические проблемы экологии (экологическая физика)* (МАКС Пресс, М., 2010), вып. 16, сс. 287–299.
7. А. Э. Сидорова и Ю. В. Мухартова, ВМУ. Сер. 3. Физика. Астрономия, № 5, 65 (2013).
8. В. А. Твердислов, в сб. *Активная среда. От физико-химических к социальным системам* (Книжный дом «Университет», М., 2001), сс. 193–215.
9. В. С. Савенко, *Геохимические аспекты устойчивого развития* (ГЕОС, М., 2003).
10. R. A. FitzHugh, *Biophys. J.* **1**, 445 (1961); L. Onsager, *Phys. Rev.* **38** (12), 2265 (1931).
11. В. Ф. Бутузов, Н. Т. Левашова и А. А. Мельникова, *Журн. вычисл. матем. и матем. физ.* **52** (11), 1983 (2012).
12. Я. Б. Зельдович и Д. А. Франк-Каменецкий, *Журн. физ. химии* **22**, 1 (1938).
13. В. Ф. Бутузов, *Журн. вычисл. матем. и матем. физ.* **37** (4), 415 (1997).
14. Н. Е. Грачев, А. В. Дмитриев, Д. С. Сенин и др., *Вычисл. методы и программирование* **11**, 306 (2010).
15. Пер Бак, *Как работает природа: теория самоорганизованной критичности* (2014).

A Model of a Human-dominated Urban Ecosystem as an Active Medium

A.E. Sidorova, N.T. Levashova, A.A. Melnikova, and L.V. Yakovenko

Department of Physics, Lomonosov Moscow State University, Leninskiye Gory 1/2, Moscow, 119991 Russia

The concept of active medium is used as a biophysical basis for modeling spatial and temporal self-organization in anthropogenic ecosystems that results in formation of regular dynamic structures with stable or unstable modes of development. Urban ecosystem is represented as a hierarchy of interacting active media, and their non-linearity is the result of extreme anthropogenic load and mismatch between characteristic times and scales in evolution of the natural and anthropogenic components together with the complex set of positive and negative feedbacks between the subsystems. Description of the presented model is deliberately simplified so as to use a modified Fitz-Hugh-Nagumo equation. The approach developed here is quite general and allows for systematic description of urban ecosystems as distributed dissipative systems.

Key words: urban ecosystems, population dynamics, self-organization, active media, autowaves