

Автоволновая самоорганизация в неоднородных природно-антропогенных экосистемах

А. Э. Сидорова^{1,a}, Н. Т. Левашова^{1,b}, А. А. Мельникова^{2,c},
Н. Н. Дерюгина², А. Е. Семина¹

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет,

¹кафедра биофизики; ²кафедра математики.

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

E-mail: ^asky314bone@mail.ru, ^bnatasha@npanalytica.ru, ^cmelnikova@physics.msu.ru

Статья поступила 17.05.2016, подписана в печать 20.06.2016.

Рассмотрена пространственно-временная модель природно-антропогенных экосистем как сопряженных активных сред, учитывающая неоднородности антропогенных и природных факторов. Подход направлен на выявление пороговых значений управляющих параметров. Теоретической базой системного анализа устойчивости экосистем служат синергетические представления об автоволновой самоорганизации в активных средах. Математическая модель базируется на модифицированной системе уравнений ФитцХью–Нагумо.

Ключевые слова: урбоэкосистемы, самоорганизация, активные среды, автоволны, внутренний переходный слой.

УДК: 577.0 PACS: 89.75.-k

Введение

Развитие современных моделей, касающихся базовых принципов эволюции сложных биосферных систем, основано на использовании физико-математических подходов, показавших свою эффективность при описании процессов самоорганизации в относительно простых диссипативных системах. С позиций теории автоволновой самоорганизации в активных средах природно-антропогенные экосистемы и урбоэкосистемы (УЭС) как их наиболее концентрированное выражение могут быть рассмотрены как взаимодействующие природная и антропогенная подсистемы со значительной неоднородностью источников антропогенных воздействий и городских геобиоценозов.

Вопросу морфологии УЭС уделяется немало внимания в литературе. Однако наблюдается достаточно одностороннее рассмотрение этих систем. Так, многие авторы концентрируются на исследовании исключительно плотности населения с единственным центром функция плотности распределения [1, 2]. Но такой подход не учитывает многочисленные нелинейные эффекты, характерные для УЭС, и описывается сравнительно малым числом параметров. С одной стороны, это упрощает аналитическую задачу, но, с другой стороны, сводит процессы в сложных системах к линейным. Одним из перспективных комплексных методов исследования УЭС является эмпирический метод исследования, представляющий собой комбинацию теории клеточных автоматов и цепей Маркова [3]. Метод был применен для исследования вероятности последовательных случайных событий, связанных с городской инфраструктурой. Применение теории фракталов для описания морфологии городских паттернов позволяет исключить представления об однородном пространстве [4].

Перечисленные 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.

Природно-антропогенные экосистемы, в отличие от природных, характеризуются высокой скоростью роста, активным энерго- и массообменом, значительной средней плотностью народонаселения и высокой интенсивностью метаболизма. Перечисленные условия нарушают динамическое равновесие потоков энергии, вещества и информации, снижают «буферную емкость» природных подсистем и увеличивают нелинейность, а значит, и неустойчивость системных процессов.

Для УЭС характерны общие закономерности многоплановых перекрестных антропогенных воздействий, генерируемых территориально связанными промышленными и жилыми объектами, буферная емкость природных подсистем, значительная фрагментированность антропогенных воздействий и геобиоценозов. Эти особенности развития УЭС способны формировать в границах УЭС необратимые системные процессы. Необходимой предпосылкой возникновения эффекта самоорганизации в границах природно-антропогенных экосистем является соответствие социума, биотических и абиотических факторов масштабам антропогенного воздействия. В случае доминирования природных процессов экосистема способна к естественной автоволновой самоорганизации. А в случае доминирования антропогенных процессов возникают, как правило, необратимые системные процессы. (Условия самоорганизации и свойства УЭС как иерархий сопряженных активных среды были рассмотрены авторами в [5–7].)

Но крупные города и промышленные центры не способны самостоятельно обеспечить оптимальные условия естественной самоорганизации: воспроизводство основных компонентов природной среды, обеспечивающее баланс вещества и энергии в системе, и, следовательно, компенсаторное соответствие устойчивости природной подсистемы 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.

Термодинамическая неравновесность, нелинейность, бифуркационное развитие — синергетическая база самоорганизации УЭС в моделях активных сред [5–7]. Распределенный ресурс системы утилизируется взаимосвязанными нелинейными локальными трансформаторами: для физико-химической системы это распространяющаяся в пространстве фаза процесса. Локальные трансформаторы энергии и вещества преобразуют энергию сопряженно с автокаталитическим преобразованием вещества при наличии «возмущения» в соседних ячейках или при получении управляющего сигнала через обратную положительную или отрицательную связь. Поэтому в УЭС (вне критических условий функционирования) за счет многоплановой и постоянно усложняющейся сети прямых и обратных связей увеличивается взаимовлияние элементов подсистем и возрастает множество возможных траекторий развития.

Самоорганизация проявляется в образовании автоволновых диссипативных структур [8–11], формирующих выделенные степени свободы [12]. Управляющими параметрами являются природные и антропогенные факторы (возбудимые элементы), формирующие длину и форму автоволн. Скорости природных процессов много меньше скоростей антропогенных процессов [13], поэтому антропогенные процессы в данной модели полагаем активаторами, а природные — ингибиторами общесистемных процессов. В УЭС как неоднородных активных средах возможно возникновение подпороговых взаимодействий соседних элементов. Рассмотренные свойства позволяют качественно оценить пороговые и подпороговые условия распространения автоволнового процесса в зависимости от интенсивности источников воздействия, расположения возбудимых, слабо-возбудимых и невозбудимых зон, наличия латентных источников автоволн, численности и плотности населения и других факторов.

1. Пространственно-временная модель автоволновой самоорганизации природно-антропогенных экосистем

Цель создания модели состоит в выявлении условий устойчивости режимов функционирования УЭС. В [5–7] рассмотрены УЭС как сопряженные активные среды на базе модифицированной авторами

системы уравнений ФитцХью–Нагумо [14]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} - \varepsilon D_u \Delta u &= -\frac{1}{\varepsilon}(u(u - \alpha)(u - 1) + uv), \\ \frac{\partial v}{\partial t} - \varepsilon D_v \Delta v &= (-\gamma v + \beta u),\end{aligned}\quad (1)$$

где u — функция интенсивности активатора (антропогенных процессов); v — функция интенсивности ингибитора (природных процессов); слагаемое uv , добавленное авторами в правую часть первого уравнения системы (1), расширяет возможности анализа перекрестных взаимодействий активатора и ингибитора; α — параметр активации системы (обратно пропорционален плотности населения); γ — кинетический параметр затухания потенциала ингибитора, $\gamma > 0$; β — кинетический параметр взаимодействия активатора и ингибитора, $\beta > 0$; D_u, D_v — коэффициенты диффузии активатора и ингибитора, $0.1 < \varepsilon D_u < 1$, $0.01 < \varepsilon D_v < 0.1$; ε — параметр, характеризующий скорость распространения активатора ($0 < \varepsilon < 1$), отражает значительное различие скоростей изменения функций интенсивности активатора и ингибитора.

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, численность и плотность населения и т. д. В качестве ингибиторов — удельное электрическое сопротивление, возрастание/уменьшение плотности и влажности почвогрунтов, скорость течения и перемешивания подземных вод, площадь природного каркаса и т. д.

Система (1) решается численно при помощи счета на установление в пространственной области D с границей ∂D . На границе задаются краевые условия Неймана $\frac{\partial u}{\partial n}|_{\partial D} = \frac{\partial v}{\partial n}|_{\partial D} = 0$. Распределение в начальный момент времени считается известным. Для численного решения нелинейного уравнения используется линеаризация Ньютона с последующим применением метода последовательных приближений. Для одномерной задачи вводится равномерная сетка на отрезке, где L — ширина расчетной области; расчет проводится при помощи схемы с полусуммой. Численное решение двумерной задачи проводится в прямоугольнике, в котором вводится равномерная сетка. Реализация численного счета производится при помощи схемы переменных направлений [15, 16].

В зависимости от соотношения параметров α , β и γ многочлен в правой части первого уравнения (1) может иметь либо три вещественных корня — возбудимая среда, либо один вещественный корень, равный нулю. В последнем случае единственное возможное устойчивое состояние систе-

мы — нулевое. В такой системе любая начальная флуктуация затухает со временем: природные факторы способны ингибировать негативные антропогенные процессы — невозбудимая среда. В случае такого соотношения параметров α , β и γ , при котором модель описывает возбудимую среду, решение системы (1) имеет вид автоволны. При этом волна активатора поддерживается за счет наличия распределенных ней источников энергии вещества информации. Пороговое значение параметра α_c как функции отношения β/γ задается неявно уравнением $(\alpha_c - 1)^2 + (\beta/\gamma)^2 - 2(1 + \alpha_c)\beta/\gamma = 0$. Если $\alpha(\beta/\gamma) > \alpha_c(\beta/\gamma)$, то система (1) описывает невозбудимую среду; если $\alpha_c(\beta/\gamma) < \alpha(\beta/\gamma)$ — возбудимую (рис. 1). И чем больше численность и плотность населения, тем больше в общей системе формируется прямых и обратных связей и, следовательно, тем больше значение кинетического параметра взаимодействия активатора и ингибитора (β).

В случае неоднородности пространственного распределения возбудимых и невозбудимых зон на границах этих зон, что характерно для УЭС, происходит резкое изменение функций интенсивностей активатора и ингибитора. В этом случае говорят, что на границах зон формируются внутренние переходные слои. Неоднородность системы определяется ее структурно-функциональной сложностью, связанной с сетью прямых и обратных связей, а также наличием барьеров (городских биоценозов). Барьер — это область пространства активной среды, в которой

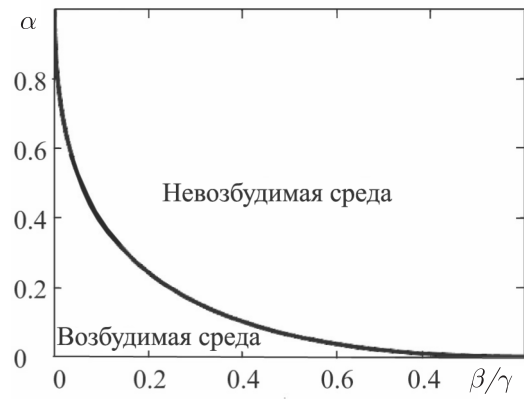


Рис. 1. Диаграмма состояния активной среды в зависимости от соотношения параметров α , β , γ

фронт волны активатора нивелируется при ширине барьера большей, чем ширина переходного слоя (запирание автоволны). При меньшей ширине барьера происходит туннелирование через барьер (рис. 2, 3) [5].

Соотношение коэффициентов α , β и γ в зоне барьера в нашем случае должно соответствовать области невозбудимой среды на диаграмме (рис. 1). Параметры системы представлены в табл. 1. Через L обозначена ширина расчетной области.

Рассмотренные эффекты поведения автоволнового процесса связаны с синергизмом воздействий на экосистему различных факторов: фрагментированности и площади биоценозов, их количественного и качественного составов, плотности размещения

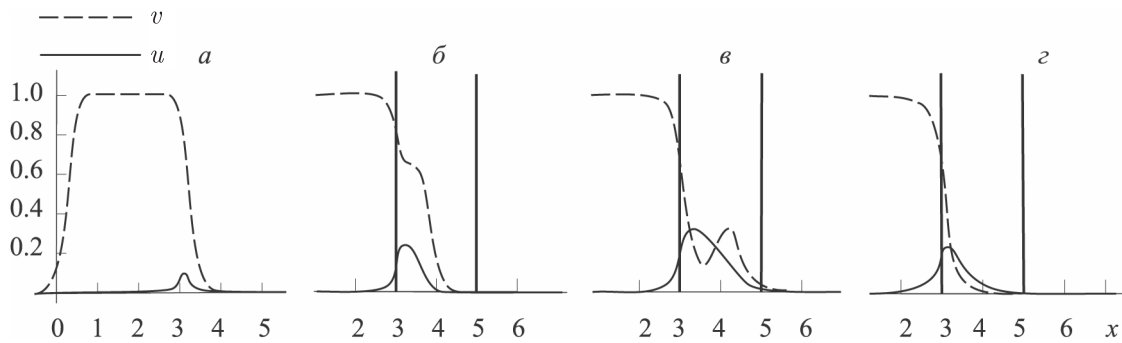


Рис. 2. Эффект записывания импульса активатора: а, б, в — стадии процесса; г — установившееся стационарное распределение. Ширина барьера $2L/25$. Положение барьера отмечено вертикальными линиями

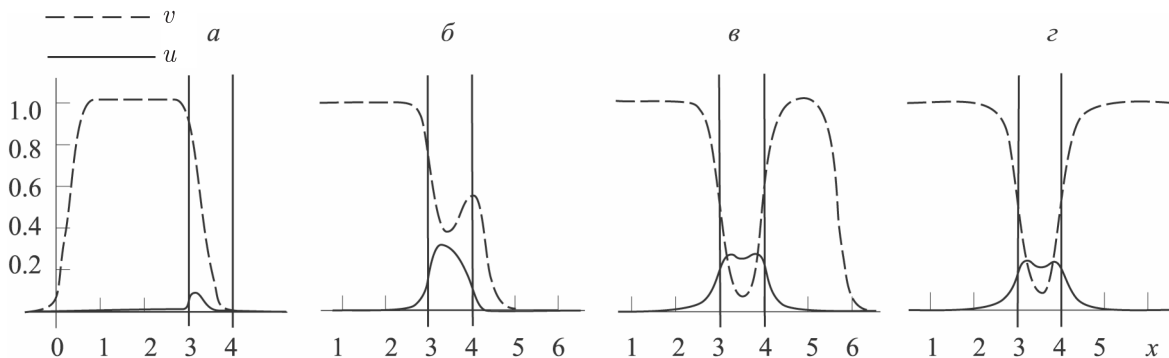


Рис. 3. Эффект туннелирования импульса активатора: а, б, в — стадии процесса; г — установившееся стационарное распределение. Ширина барьера $L/25$. Положение барьера отмечено вертикальными линиями

Таблица 1
**Параметры задачи, принятые для описания
 барьера в урбоэкосистеме**

ε	D_u	D_v	α	γ	L	β/γ вне барьера	β/γ в области барьера
0.04	5	1	0.1	0.5	25	0.02	1.4

промышленных и жилых объектов, различного рода антропогенных факторов (как результата функционирования промышленных и жилых объектов), численности и плотности населения и др. В большинстве случаев характерные для УЭС антропогенные факторы связаны с формированием техногенных полей, охватывающих практически всю верхнюю часть литосферы (в границах экосистемы) и оказывающих совокупное неаддитивное воздействие на формирование структуры и функций экосистемы.

Так, интенсивность антропогенного воздействия в УЭС непосредственным образом связана с плотностью застройки и соответственно с формированием неоднородных электромагнитных полей (ЭМП) промышленных частот, которые генерируются многочисленными электробытовыми приборами в жилых и офисных сооружениях [5]. Размеры характерных зон неоднородностей интенсивности ЭМП промышленных частот соответствуют размерам биоценозов УЭС (от 30 до 100 м в зависимости от этажности застроек), а средняя величина энергии, поглощаемой почвенно-грунтовыми средами от энергии, излучаемой наземными источниками, составляет до 20%. Уменьшение расстояния между высотными жилыми сооружениями, увеличение их высоты и интенсивности развития подземных коммуникаций значительно увеличивает неоднородность не только электромагнитного фона, но и природной подсистемы. С ростом фрагментированности городских геобиоценозов уменьшается площадь локальных участков и нелинейным образом качественно изменяются сами геобиоценозы.

По сравнению с атмосферой и водами суши почва как часть окружающей среды гораздо более уязвима в отношении антропогенных воздействий, что обусловлено ее гетерогенностью и многочисленностью процессов, ответственных за перемещение различных веществ. Звено (или звенья) трофической цепи могут выпадать не только в результате воздействия электромагнитных излучений, но и в результате химических воздействий и инфекционных заболеваний почвы, механических травм почвенного тела. Нарушение физико-химических параметров почв — первичной активной среды — с большой вероятностью может привести к качественному и количественному дисбалансу трофических сетей. Так, периодическое движение солевого раствора грунтовых вод по ионообменнику (каковым в определенной степени является почва), чередование процессов сорбции–десорбции растворенных веществ

почвой из водного раствора, вызванное синхронным периодическим изменением температуры, приводят к разделению и перераспределению растворенных веществ и ионов в почвенных горизонтах [17].

Микроорганизмы — важнейший фактор в процессе почвообразования — могут интенсивно развиваться только при определенных температурных условиях, влажности и pH среды. Оптимальный температурный режим находится чаще всего в пределах $+20-35^{\circ}\text{C}$. Что касается pH среды, то они различны для различных групп микроорганизмов. Процесс нитрификации происходит в результате совместной деятельности бактерий двух групп (*Nitrosomonas*, *Nitrocystus*, *Nitrosospira* и *Nitrobacter*) в хорошо аэрируемых почвах с нейтральной или щелочной реакцией (pH от 6.2 до 9) при наличии значительного количества перегноя и достаточного содержания влаги. С другой стороны, изменение соотношения CO_2 в почвах и подземных вод приводит к изменению pH среды, продуктивности и видового состава биоценозов. Еще одним важным фактором является редокс-потенциал Eh. За пределами области $Eh_{\min} \leq Eh \leq Eh_{\max}$ среда становится термодинамически неустойчивой: $0.5 \leq Eh_{\max} \leq 10$, $0.5 \leq Eh_{\min} \leq 0.7$ [18]. Изменение естественного Eh ведет к нарушению соотношения растворенных и нерастворенных форм некоторых минералов, мигрирующих веществ и анаэробов. По мере биодegradации органических веществ (при отсутствии свободного газообмена с атмосферой) в подземных водах и почвогрунтах возможно формирование редокс-зон: образование метана в результате восстановления CO_2 , сульфатредукция, восстановление Fe^{3+} и Mn^{4+} .

Амплитуды колебаний уровня подземных вод на урботерриториях значительно выше, чем в естественных экосистемах, и, как правило, не подвержены сезонным изменениям. По мере роста интенсивности антропогенных нагрузок на водный бассейн резко возрастают обратные реакции гидросферы — скачкообразное или постепенное снижение качества и уровня подземных вод: гидродинамическая, температурная, гидрохимическая и гидробиологическая аномалии. А загрязнение подземных вод влияет на изменение свойств естественных геохимических барьеров (pH, глеевые, сорбционные), гидродинамических ловушек (бессточные водоемы, болота), донных отложений. В этих условиях даже при максимальной влагоемкости происходит нарушение гидробиологических процессов (вода менее доступна для всасывания растениями, снижается активность почвенных бактерий) [18].

Характерной особенностью крупных городских агломераций является нарушение теплового режима на глубине до 100–300 м. При этом температура пород и подземных вод часто превышает фоновую на $10-40^{\circ}\text{C}$, а под «горячим производством», в зонах подземных транспортных и других ком-

муникаций 60–100°С [19]. Увеличение теплового потока в 2–3 раза относительно фоновой составляющей приводит к нарушению физико-химических свойств среды, росту многопрофильного воздействия загрязняющих веществ и скорости биодеструкции (увеличение температуры верхнего слоя литосферы на 10°С ведет к увеличению скорости биодеструкции в 1.5–2 раза) [18]. А если источник теплового воздействия находится вблизи уровня грунтовых вод, наблюдается конвективный перенос тепла (увеличение диссипации), что приводит к расширению зон тепловых аномалий до 30–50%, в зависимости от скорости потока подземных вод.

Приведенные примеры раскрывают содержательную часть модели и суть неаддитивности многокомпонентных системных процессов в УЭС, формируемой петлями отрицательных и положительных обратных связей.

Таким образом, первичным фактором устойчивого или же неустойчивого развития антропосферы становятся особенности расселения человеческой популяции. В рамках рассматриваемой модели были рассмотрены два основных типа формирования плот-

ности населения в городских поселениях: по Гауссу и «пятнистая» — суперпозиция двух распределений Гаусса с различными центрами, характерная для больших городов. В последнем случае максимумы функции распределения плотности расположены в точках с координатами $x = x_i$, $i = 1, 2$ (табл. 2, рис. 4).

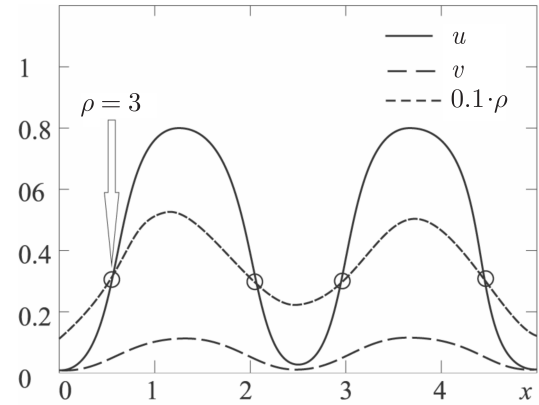


Рис. 4. График зависимости функций активатора, ингибитора, распределения плотности населения от координаты x при $\Delta x/d = 2$ (одномерная модель): установившееся стационарное распределение

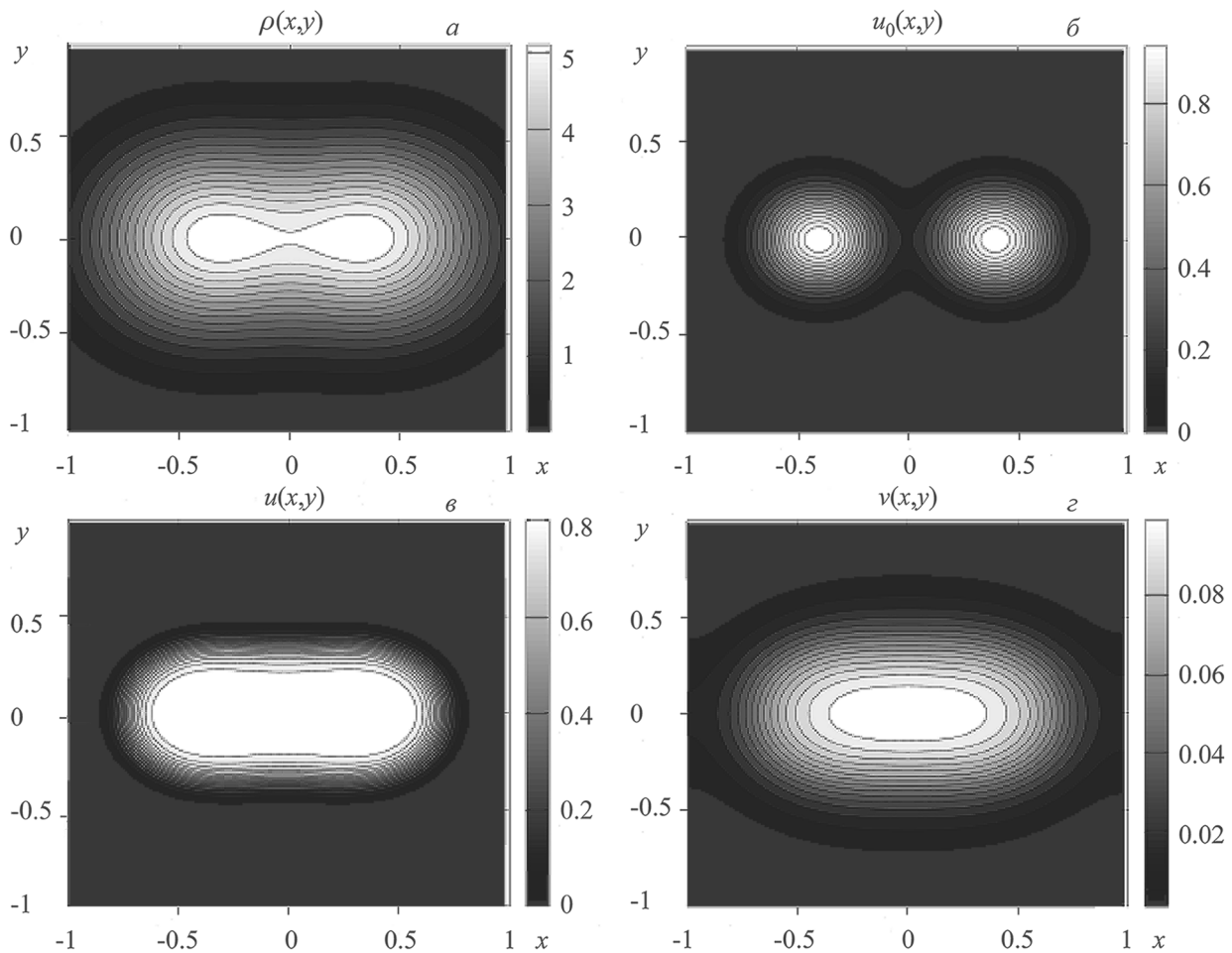


Рис. 5. График зависимости плотности населения и функций интенсивности активатора и ингибитора от координат x, y (двумерная модель): а — стационарное распределение плотности населения; б — начальное распределение функции интенсивности активатора, в — стационарное распределение функции интенсивности активатора, г — стационарное распределение функции интенсивности ингибитора

Таблица 2

**Параметры одномерной задачи, принятые для описания
урбоэкосистемы с «пятнистой» плотностью населения**

Управляющие параметры системы уравнений (1)					Параметры функции распределения $\rho(x)$					
ε	γ/β	D_u	D_v	L	α_0	α_d	d	x_1	x_2	$\Delta x/d$
0.04	6.7	5	1	5	0.2	0.9	0.25L	0.25L	0.75L	2

Таблица 3

**Параметры двумерной задачи, принятые для описания
урбоэкосистемы с «пятнистой» плотностью населения**

ε	γ	β	D_u	D_v	L	d	Δx	$\Delta x/d$	ρ_0	ρ_d
0.007	1	0.15	5	1	2	0.3L	0.4L	1.3	5	1.1

Для одномерной модели (1) распределение плотности задается функцией

$$\rho = \rho_0 \left(\exp \left(-\frac{\eta}{2} (x - x_1)^2 \right) + \exp \left(-\frac{\eta}{2} (x - x_2)^2 \right) \right),$$

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: $\rho(x_i \pm d) = \rho_d$. Параметры системы представлены в табл. 2. Через L обозначена ширина расчетной области; $\Delta x = x_1 - x_2$ — расстояние между максимумами функции распределения плотности населения.

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 при заданном выражении для $\alpha(x) = \rho^{-1}(x)$ [20], показывает, что для образования устойчивого стационарного решения с внутренним переходным слоем определяющую роль играет величина отношения $\Delta x/d$. В возбудимой среде условием существования переходных слоев между пиками при значениях параметров α_0 и α_d , указанных в табл. 2, является $\Delta x/d \geq 1.8$. Величине $\Delta x/d = 1.8$ соответствует значение $\alpha = 0.336$. Это значение параметра α играет роль критического: согласно предложенной модели при $\alpha > 0.336$ формируется городская среда с устойчивой во времени и пространстве локализацией. При $\Delta x/d = 2$ (рис. 4) решение имеет четко выраженные внутренние переходные слои при $\rho = 1/0.336$, локализованные между точками x_1 и x_2 .

Все приведенные выше рассуждения имеют место и для двумерной модели (1) [21]. На рис. 5 показан результат численного эксперимента для двумерного

случая с «пятнистой» плотностью населения

$$\rho = \rho_0 \left(\exp \left(-\frac{\eta}{2} ((x - x_1)^2 + (y - y_1)^2) \right) + \exp \left(-\frac{\eta}{2} ((x - x_2)^2 + (y - y_1)^2) \right) \right)$$

и начальным распределением

$$u_0(x, y) = \exp(-15((x - x_1)^2 + (y - y_1)^2)) + \exp(-15((x - x_2)^2 + (y - y_1)^2)), \quad v_0 = 0.$$

Параметры системы представлены в табл. 3.

Заключение

Представленный в работе подход дает возможность разработки прямой и адекватной оценки антропогенных воздействий в возбудимой среде природно-антропогенных экосистем как сложных структур, которые сопрягают различающиеся на порядки величин масштабы систем и событий. Управление параметрами автоволновой самоорганизации в природно-антропогенных экосистемах посредством локальных воздействий может иметь широкие перспективы, поскольку способно влиять на макроскопическую картину всей системы. В принципе, модель позволяет при введении конкретных данных по природным характеристикам и антропогенным воздействиям анализировать и прогнозировать экологическую динамику региона.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант 15-01-04619).

Список литературы

1. Helbich M., Leitner M. // Urban Geogr. Taylor & Francis Group. 2013. **31**, N 8. P. 1100.
2. Papageorgiou Y.Y. // J. Reg. Sci. 2014. **54**, N 3. P. 450.
3. Vaz E., Arsanjani J.J. // J. Environ. Informatics. 2015. **25**, N 2. P. 71.
4. Frankhauser P. // Discret. Dyn. Nat. Soc. 1998. **2**, N 2. P. 127.
5. Сидорова А.Э., Мухартова Ю.В., Яковенко Л.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2014. № 5. С. 29. (Sidorova A.E., Mukhartova Yu.V., Yakovenko L.V. // Moscow University Phys. Bull. 2014. **69**, N 5. P. 392.)

6. Сидорова А.Э., Мухартова Ю.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2013. № 5. С. 65. (Sidorova A.E., Mukhartova Yu.V. // Moscow University Phys. Bull. 2013. **68**, N 5. P. 405.)
7. Сидорова А.Э., Левашова Н.Т., Мельникова А.А., Яковенко Л.В. // Биофизика. 2015. **60**, № 3. С. 574. (Sidorova A.E., Levashova N.T., Mel'nikova A.A., Yakovenko L.V. // Biophysics (Oxf.). 2015. **60**, N 3. P. 466.)
8. Barkley D. // Physica D. 1991. **49**. P. 61.
9. Murray J.D. Mathematical Biology. Vol. II. N. Y.: Springer-Verlag, 2003.
10. Елькин Ю.Е. // Математическая биология и биоинформатика. 2006. **1**, № 1. С. 27.
11. Васильев В.А., Романовский Ю.М., Яхно В.Г. Автоволновые процессы. М.: Наука, 1987.
12. Твердислов В.А., Малышко Е.В., Ильченко С.А. // Известия РАН. Сер. физ. 2015. **79**, № 3. С. 1728. (Tverdislov V.A., Malysheko E.V., Ilchenko S.A. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. **79**, N 12. P. 1516.)
13. Савенко В.С. Геохимические аспекты устойчивого развития. М.: ГЕОС, 2003.
14. FitzHugh R. // Biophys. J. 1961. **1**, N 6. P. 445.
15. Калиткин Н.Н., Корякин П.В. Численные методы: в 2 кн. Кн. 2. Методы математической физики. М.: Академия, 2013.
16. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы математической физики. М.: Научный мир, 2000.
17. Яковенко Л.В., Салов Д.В., Твердислов В.А. // Нелинейные явления в открытых системах: Сб. науч. тр. М.: Гос. ИФТП, 1995. С. 67.
18. Кузнецов А.Е., Градова Н.Б. Научные основы экобиотехнологии. М.: Мир, 2006.
19. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Экологическая безопасность, устойчивое развитие и природоохранные проблемы. ММГФ «Знание», 1999.
20. Бутузов В.Ф., Левашова Н.Т., Мельникова А.А. // Журн. вычисл. матем. и матем. физики. 2012. **52**, № 11. С. 1983. (Butuzov V.F., Levashova N.T., Mel'nikova A.A. // Comput. Math. Math. Phys. 2012. **52**, N 11. P. 1526.)
21. Бутузов В.Ф., Левашова Н.Т., Мельникова А.А. // Журн. вычисл. матем. и матем. физики. 2013. **53**, № 9. С. 9. (Butuzov V.F., Levashova N.T., Mel'nikova A.A. // Comput. Math. Math. Phys. 2013. **53**, N 9. P. 1239.)

Autowave self-organization in heterogeneous natural–anthropogenic ecosystems

A. E. Sidorova^{1,a}, N. T. Levashova^{1,b}, A. A. Mel'nikova^{2,c}, N. N. Deryugina², A. E. Semina¹

¹ Department of Biophysics; ² Department of Mathematics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.
E-mail: ^asky314bone@mail.ru, ^bnatasha@npanalytica.ru, ^cmelnikova@physics.msu.ru.

This article considers the spatio–temporal model of natural–anthropogenic ecosystems as a conjugated active media that takes the heterogeneity of anthropogenic and natural factors into account. The approach aims to identify the threshold values of the control parameters. The theoretical basis of the system analysis of the sustainability of the ecosystems is synergistic data on autowave self-organization in active media. The mathematical model is based on the modified FitzHugh–Nagumo system of equations.

Keywords: urban ecosystems, self-organization, active media, autowaves, internal transition layer.

PACS: 89.75.

Received 17 May 2016.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2016. **71**, No. 6. Pp. 562–568.

Сведения об авторах

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