

БИОФИЗИКА И МЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА

Урбоэкосистемы как суперпозиция сопряженных активных средА. Э. Сидорова^{1,a}, Ю. В. Мухартова^{2,b}, Л. В. Яковенко¹*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет,*¹*кафедра биофизики; ²кафедра математики.**Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.**E-mail: ^asky314bone@mail.ru, ^bmuhartova@yandex.ru*

Статья поступила 26.05.2014, подписана в печать 16.06.2014.

В настоящей статье рассмотрена пространственно-временная модель урбоэкосистем (УЭС) как суперпозиции активных сред, учитывающая неоднородности антропогенных и природных факторов. Подход основан на представлении урбоэкосистем как сопряженных активных сред и направлен на выявление пороговых значений управляющих параметров. Теоретической базой системного анализа устойчивости УЭС служат синергетические представления об автоволновой самоорганизации в активных средах.

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

УДК: 577. PACS: 87.23.-n, 87.50.-a.

Введение

Урбоэкосистемы (УЭС) — экосистемы, которые могут быть рассмотрены как взаимодействующие природная и антропогенная подсистемы со значительной неоднородностью источников антропогенных воздействий и городских геобиоценозов. Теоретической базой представляемого системного анализа является анализ устойчивости УЭС на основе синергетических представлений об автоволновой самоорганизации в сопряженных активных средах [1].

Необходимой предпосылкой возникновения эффекта самоорганизации в границах природно-антропогенных экосистем является синергетическое соответствие социума, биотических и абиотических факторов, т. е. биологической, геохимической, гидрологической и физической ипостасей экосистемы масштабам антропогенного воздействия [2]. В настоящее время данный вид экосистем, в отличие от природных, характеризуется высокой скоростью роста, активным энерго- и массообменом, а также 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. В случае доминирования природных процессов экосистема способна к естественной автоволновой самоорганизации [1]. А в случае значительного дисбаланса в сторону антропогенного воздействия доминирующий водитель

ритма постепенно захватывает все пространство [1], что вызывает, как правило, необратимые системные процессы. Взаимодействие сопряженных природно-антропогенных подсистем в общей распределенной активной среде позволяет учитывать экологически опасные антропогенные воздействия и способности к естественной самоорганизации городских геобиоценозов [3, 4]. Условия самоорганизации и свойства УЭС как иерархий сопряженных активных сред были рассмотрены авторами в [3].

Известно, что нелинейные взаимодействия в открытых системах характеризуются дальнедействующими корреляциями, амплитуды которых растут по мере приближения к точке бифуркации и тем самым организуют систему (от статистической независимости к когерентности элементов). Этот процесс связан с зависимостью критических параметров экосистемы от свойств сопряженных подсистем. Особое место в этом ряду занимает контринтуитивный характер реакции природных систем на внешнее (антропогенное) воздействие, определяемый степенью структурно-функциональной сложности системы: чем сложнее структура экосистемы, тем большему количеству перемежающихся устойчивых и неустойчивых состояний одновременно она может быть подвержена (мультистабильность).

Порог устойчивости экосистемы непосредственным образом связан с суперпозицией флуктуаций в неравновесных открытых системах, которые преобразуются в «гигантские» [5]. За счет прямых и обратных 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 автоволнового фронта (доминирует отрицательная обратная связь), приводящее к его разрыву или уничтожению.

В [3] авторами были рассмотрены УЭС как иерархические сопряженные активные среды на базе модифицированной авторами системы уравнений Фитц-Хью–Нагумо [6]:

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

где u — функция интенсивности активатора (антропогенные процессы), v — функция интенсивности ингибитора (природные процессы). Предложенное авторами произведение uv простейшим способом расширяет возможности математического анализа перекрестных взаимодействий. $0.05 < \alpha < 0.25$ — параметр активации системы определяется в зависимости от численности населения и плотности в соответствии с кривой Гаусса; γ — кинетический параметр затухания потенциала ингибитора, $\gamma > 0$; β — кинетический параметр взаимодействия активатора и ингибитора, $\beta > 0$.

Параметр активации системы α является функцией координаты x :

$$\alpha = \alpha_{\max} - (\alpha_{\max} - \alpha_{\min}) \exp\left(-\frac{(x - x_0)^2}{\delta^2}\right). \quad (2)$$

Зависимость параметра α от координаты x представлена на рис. 1.

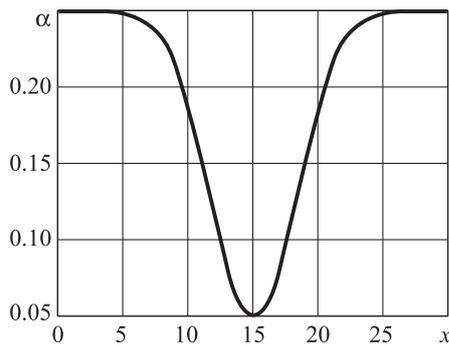


Рис. 1. Зависимость параметра α от координаты x при условии, что начальное значение u в области с минимальными значениями α выше порогового значения активации системы, $\alpha_{\max} = 2.5$, $\alpha_{\min} = 0.05$. По оси x отложено расстояние в условных единицах: при $x = 15$ параметр $\alpha = \alpha_{\min}$, а на границах области $\alpha = \alpha_{\max}$

Исследования показали, что для параметров: $\varepsilon = 0.1$, $\gamma = 0.5$, $D_u = 0.25$, $D_v = 0.01$ при $\alpha = 0.1$ границе затухания функции u и формированию бегущих импульсов соответствует $\beta_{\text{кр}} \approx 2.12$, а при $\alpha = 0.25$ соответствующее критическое значение $\beta_{\text{кр}} \approx 0.6$.

Интенсивность антропогенного воздействия непосредственным образом связана с плотностью и численностью населения в УЭС, а следовательно, с плотностью застройки, и в частности с формированием неоднородных электромагнитных полей (ЭМП) промышленных частот, которые генерируются многочисленными электробытовыми приборами в жилых и офисных сооружениях.

ЭМП от наземных источников частично отражаются от земной поверхности, но значительная часть энергии

ЭМП переходит в почвогрунты [7]. В отличие от высокочастотных полей, характеризующихся скин-эффектом, ЭМП промышленных частот способны проникать в верхние слои литосферы на значительную глубину — до десятков и сотен метров [8]. Данные исследования модели отражают автоволновые процессы в природно-антропогенных экосистемах — активных средах. Конкретным примером может служить формирование неоднородных участков ЭМП промышленных частот и городских биоценозов. Все «мишени» воздействия ЭМП (магнитная, электрическая, тепловая, химическая и др.), взаимодействуя нелинейно, проявляют свойство неаддитивности. Поэтому в зонах воздействия ЭМП может существенно изменяться качественный состав биоценозов — это трудно прогнозируемая обратная связь (как по знаку, так и по величине) между природной и антропогенной подсистемами общей экосистемы УЭС [4].

Существование в крупных городах неоднородных низкочастотных ЭМП является известным фактом. Но интерпретация эффектов неоднородных полей на жизнедеятельность организмов вызывает затруднения из-за неопределенности значений действующих факторов и неоднозначности результатов. С другой стороны, неоднородное поле можно рассматривать как суперпозицию локально однородных полей, поэтому экспериментально обычно исследуют влияние однородных полей на организмы [9, 10].

Влияние переменного магнитного поля промышленной частоты (50 Гц) на состояние организма было проверено на пресноводной гидре *Hydra oligactis*, известной своей способностью к регенерации. Животных в чашках Петри помещали в однородное магнитное поле в середине соленоида диаметром 5 см и длиной 60 см, содержащего 3 тыс. витков равномерной катушки медного провода. Соленоид ориентировали по горизонтальной составляющей геомагнитного поля (0.2 Э, или 15.9 А/м). Значения напряженности магнитного поля выбирали, основываясь на предельно допустимом значении для производственных помещений 1400 А/м (СанПиН 2.2.4.1191-03 для магнитного поля частотой 50 Гц устанавливает ПДУ 80 или 1600 А/м в течение 1 ч).

В качестве контроля использовали неповрежденных животных, помещенных в те же условия, что и травмированные, а также разрезанных пополам гидр в отсутствие магнитного поля. Неповрежденные гидры во всех экспериментах оставались живыми, но при максимальных использованных напряженностях проявляли признаки угнетенности, которую количественно характеризовать было затруднительно. Разрезанные пополам, но не подвергаемые воздействию поля животные во всех случаях регенерировали нормально: через 24 ч на подошвенных частях появлялись зачатки щупалец, а через 48 ч животные восстанавливались почти полностью. Регенерация подошв у головных частей гидр занимала большее время и в контроле, и в опыте, и за двое суток не завершалась (таблица).

Из приведенных в таблице данных видно, что совместное воздействие двух факторов — травматического стресса и магнитного поля — приводит к гибели животных, причем вероятность гибели зависит от

Влияние магнитного поля частотой 50 Гц различной напряженности на регенерацию гидр

| <i>H</i> , А/м | Число гидр, шт. | | Наблюдения за ходом регенерации | |
|----------------|-----------------|--------|--|---|
| | Голов | Подошв | Через 24 ч | Через 48 ч |
| 1960 | 15 | 15 | Обнаружено 8–15 частей, признаков регенерации не отмечено | Все животные погибли |
| 1400 | 5 | 5 | 1 голова, 1 подошва, вялые, без признаков регенерации | Все животные погибли |
| 1050 | 10 | 10 | 0–3 головы, 2–3 подошвы с зачатками щупалец, животные вялые, признаков регенерации нет | 1. Подошв нет, 1 голова без признаков регенерации. 2. Все животные погибли |
| 1162 | 5 | 5 | 1 голова, 2 подошвы (одна с зачатками щупалец) | Нет ни одного экземпляра |
| 880 | 5 | 5 | Голов нет, 2 подошвы, зачатков щупалец нет | 2 подошвы, признаков регенерации не отмечено |
| 740 | 5 | 5 | Голов нет, 2 подошвы (одна с зачатками щупалец) | 1 подошва с 6 щупальцами размером в 1/3 длины туловища |
| 580 | 15 | 15 | 0–2 голов нет, 3–4 подошвы с зачатками щупалец | 1–2 подошвы с 6 щупальцами длиной 1/2–2/3 длины туловища |

дозы облучения. Стресс, вызванный травмой, резко повышает чувствительность гидр к магнитному полю. Выживаемость, видимо, обусловлена успехом регенерации. Чувствительность головных и подошвенных частей гидры к магнитному полю разная, что может быть связано с различными механизмами регенерации. В первом случае происходит миграция клеток к месту повреждения и их трансдифференцировка, а во втором возникает волна апоптоза, которая инициирует пролиферацию клеток [11].

Мозаичность распределения возбудимых зон, 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. Регулярность развития этого процесса определяется взаимным расположением зон различной возбудимости и размерами барьеров (в нашем случае — городских биоценозов), участвующих в формировании автоволнового процесса распространения негативных антропогенных воздействий (рис. 2).

Если значение кинетического параметра взаимодействия активатора и ингибитора (β) таково, что функция интенсивности антропогенных процессов (u) затухает, то в зависимости от ширины барьера возможно либо запуск автоволны, либо ее туннелирование через барьер (рис. 3, 4).

При наличии последовательности барьеров, ширина каждого из которых допускает туннелирование волны активатора u , прохождение или запуск расширяющегося импульса u зависит от расстояния между барьерами.

Если расстояние между барьерами меньше некоторого критического значения или длина импульса много больше этого критического значения, то импульс u проходит через «гребенчатый» барьер. Однако в области «гребенки» u затухает и с течением времени остается нулевым (эффект «сплошного барьера») (рис. 5).

Если же расстояние между барьерами больше крити-

ческого или длина импульса много меньше этого критического значения, то происходит запуск импульса u (рис. 6).

Поскольку в местах локализации наземных источников низкочастотных ЭМП мы имеем дело с пространственно не сформировавшимися электромагнитными волнами, необходим учет потока мощности, что позволяет учитывать область перекрытия ЭМП от различных источников в активных средах. 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% [2, 4]. Однако в настоящее время в мегаполисах расстояние между высотными жилыми сооружениями уменьшается, их высота и интенсивность развития подземных коммуникаций растут, что значительно увеличивает неоднородность электромагнитного фона.

Как видно из изложенного материала, устойчивость УЭС зависит не только от интенсивности антропогенных воздействий — активатора автоволновых процессов в общей активной среде, но и от возможностей природной подсистемы ингибировать эти процессы. Большая часть биомассы в биоценозах УЭС (включая население городов) сосредоточена именно в верхних слоях литосферы. Масштабы качественных изменений биоценозов зависят от многих факторов:

- размеров (чем больше природная подсистема, тем более развита сеть прямых и обратных горизонтальных и вертикальных связей, и тем устойчивее система);
- интенсивности обмена веществом, энергией и информацией (система должна быть проточной);
- массы продуцентов и т. д.

Вместе с тем биоценозы не являются самодостаточными образованиями. Так, нарушение физико-химических параметров почв — первичной активной среды в условиях антропогенного прессинга — с большой вероятностью может привести к дисбалансу между олиготрофными, эутрофными и мезотрофными растениями.

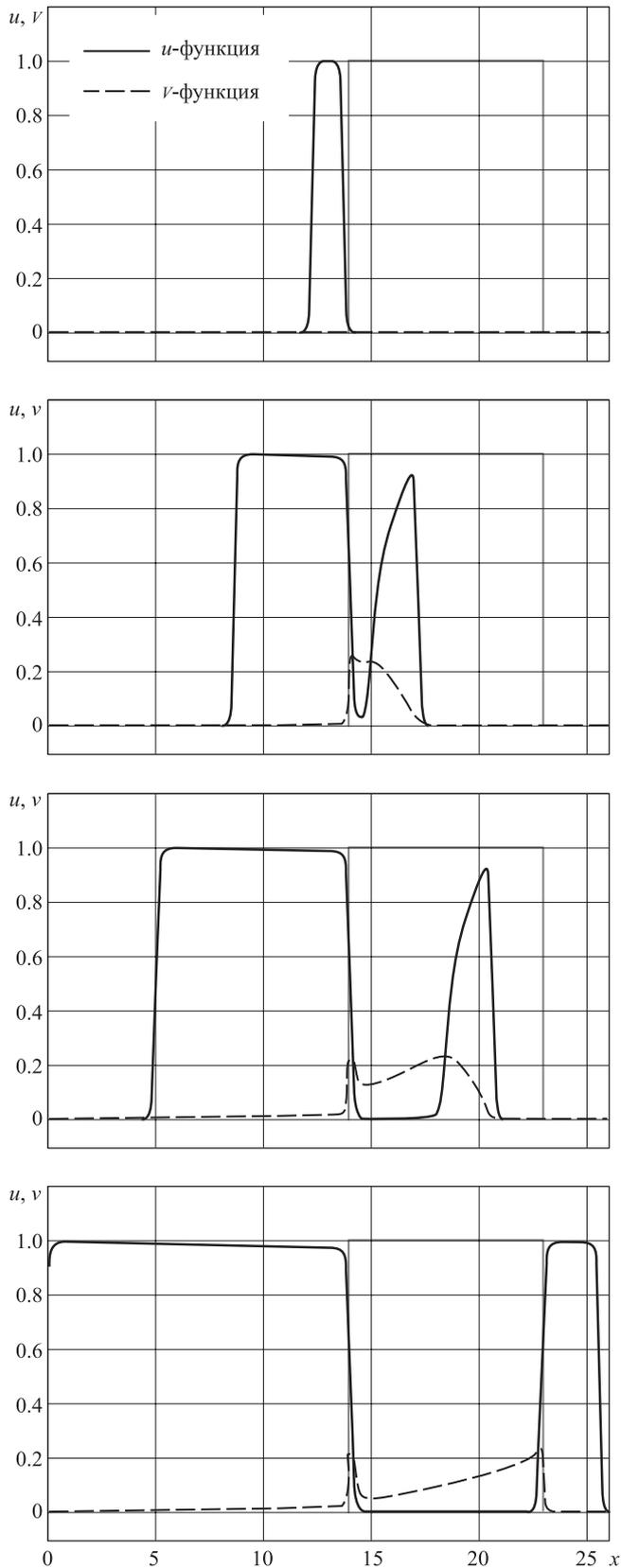


Рис. 2. Прохождение автоволны через барьер: а, б, в, г — стадии процесса (сплошная линия — функция активатора, пунктирная — ингибитора). Расчет проведен для параметров: $\varepsilon = 0.1$, $\gamma = 0.5$, $\beta_{\text{ground}} = 0.01$, $\beta_{\text{max}} = 0.5$, $\alpha = 0.1$, $l = 1$, $D_u = 0.25$, $D_v = 0.01$. По оси x отложено расстояние в условных единицах

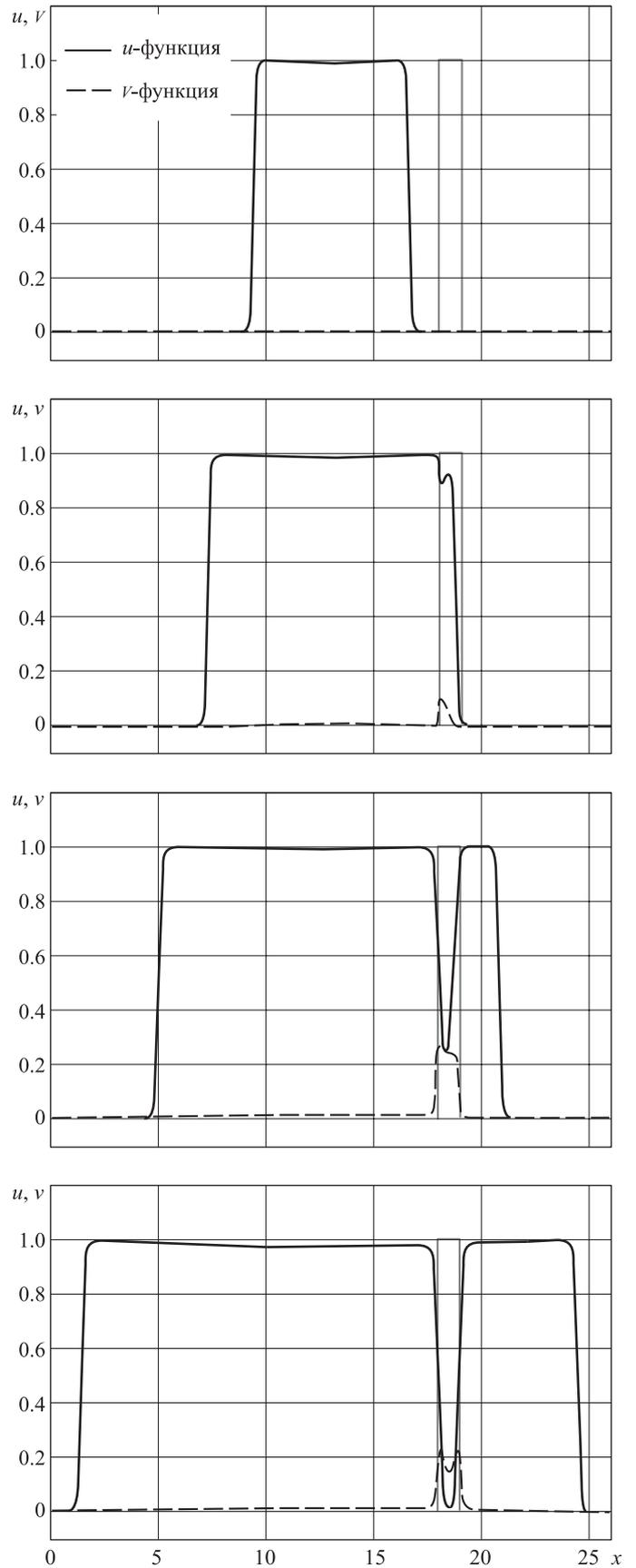


Рис. 3. Эффект туннелирования: а, б, в, д — стадии процесса. Параметры — как на рис. 2

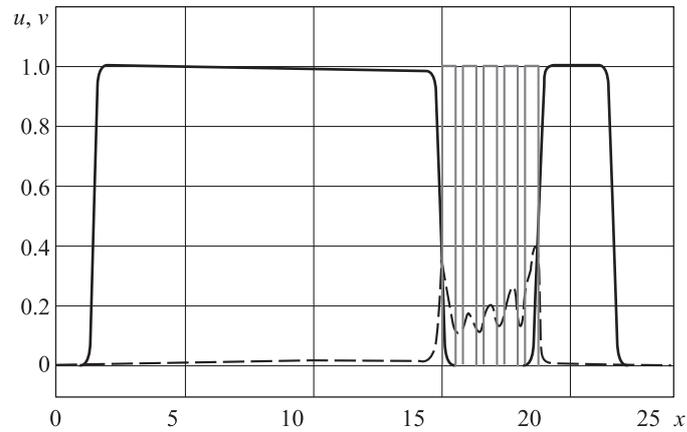
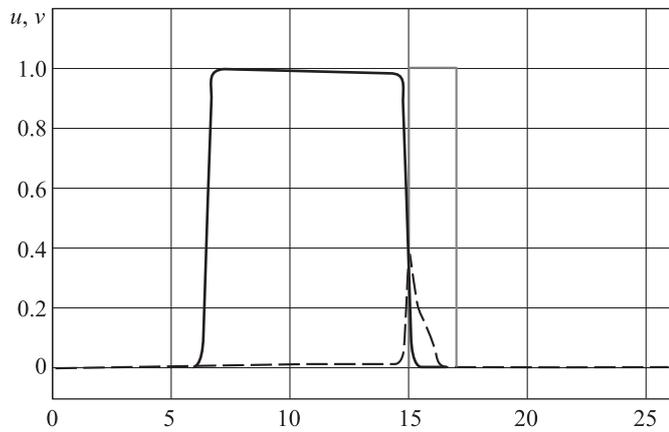
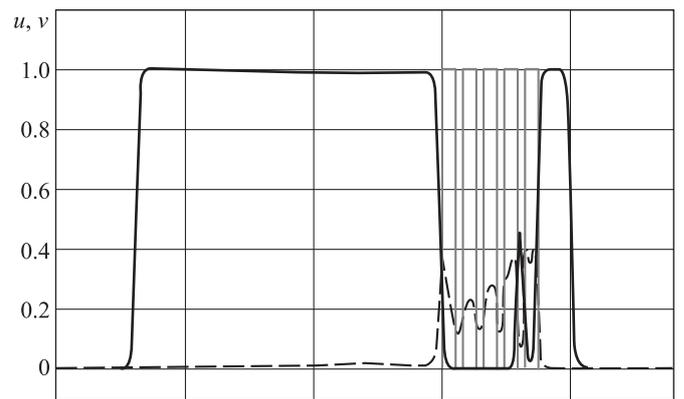
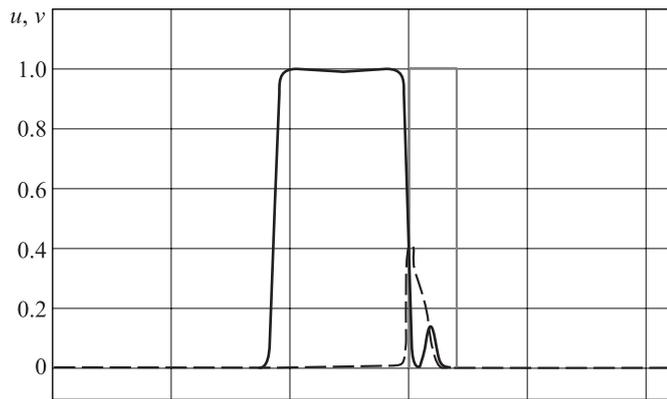
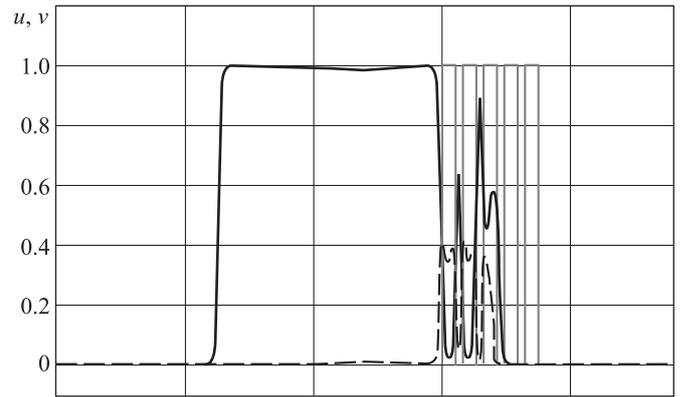
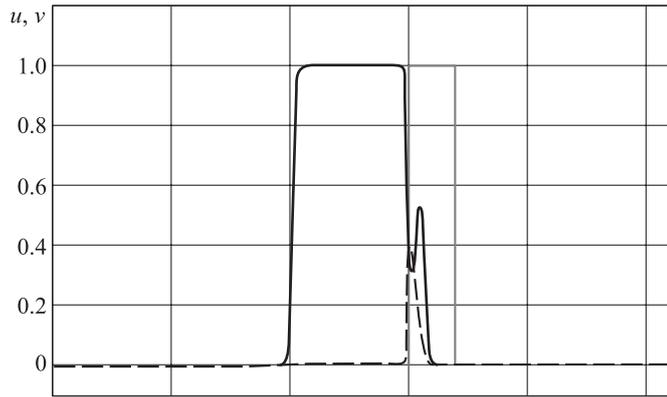
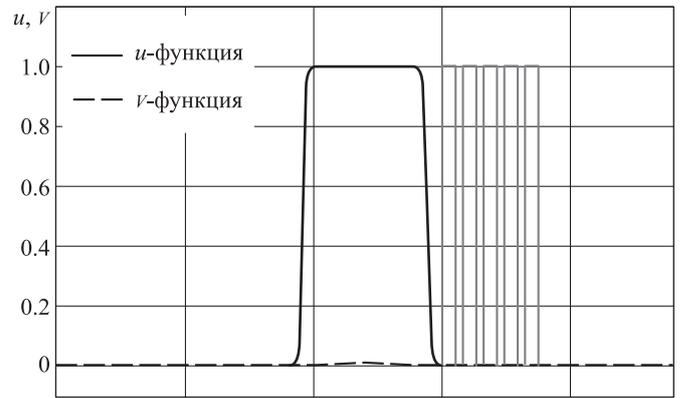
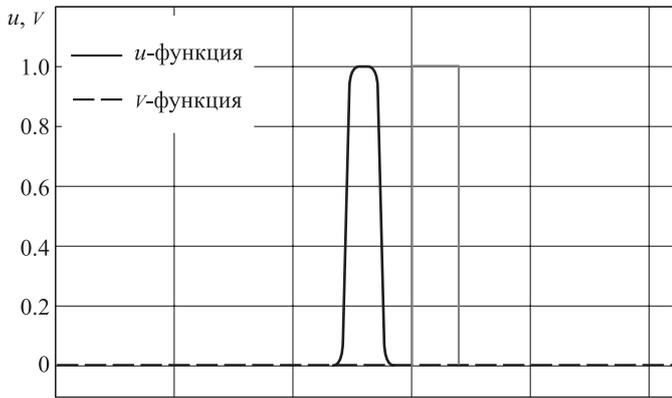


Рис. 4. Эффект запираия импульса u : $a, б, в, г$ — стадии процесса. Параметры — как на рис. 2

Рис. 5. Прохождение волны через гребенчатый барьер: $a, б, в, г$ — стадии процесса. Расстояние между барьерами меньше критического. По оси x отложено расстояние в условных единицах

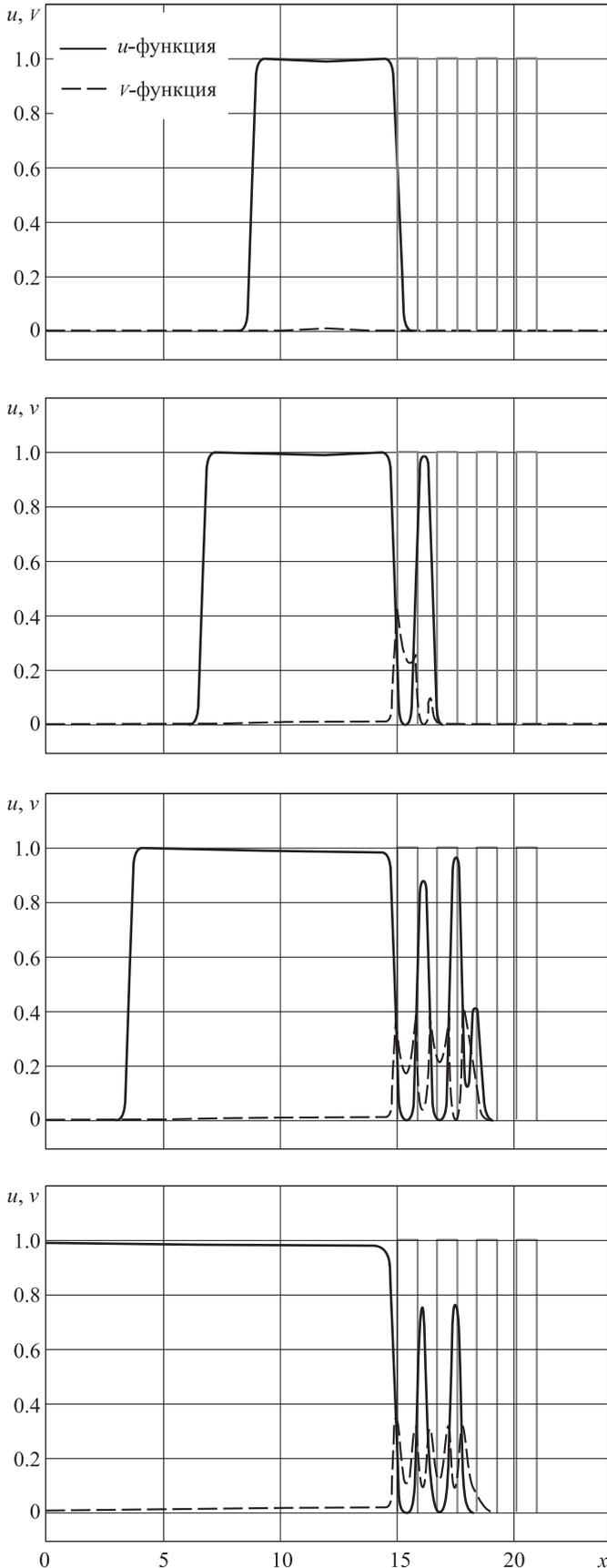


Рис. 6. Запирание расширяющегося импульса u гребенчатым барьером: $a, б, в, г$ — стадии процесса. По оси x отложено расстояние в условных единицах

А изменение кислотности почвы (рН) — к видовому замещению растений: расширяются зоны экологического пессимума, образуют зоны гибели организмов. В верхних слоях почвогрунтов (десятки метров) крупных УЭС, среды обитания почвенных организмов, источники теплового поля увеличивают тепловой поток в 2–3 раза относительно фоновой составляющей, что приводит к нарушению физико-химических свойств среды, росту многопрофильного воздействия загрязняющих веществ и скорости биодеструкции. Так, увеличение температуры верхнего слоя литосферы на 10°C ведет к увеличению скорости биодеструкции в 1.5-2 раза [12].

Заключение

Мы привели лишь отдельные примеры сопряжения природных и антропогенных процессов в общей экосистеме. В действительности таких перекрестных взаимодействий великое множество, и их количество возрастает по мере усложнения системы и увеличения числа системных связей. Поскольку мы имеем дело с существенно нелинейными процессами, в которых малые флуктуации способны вызвать гигантские всплески качественных изменений на системном уровне, необходимо изучать общие и частные закономерности сопряжения природных и антропогенных процессов.

Список литературы

1. Твердислов В.А., Сидорова А.Э., Яковенко Л.В. Биофизическая экология. М., 2011.
2. Твердислов В.А., Сидорова А.Э., Дмитриев А.В.. Синергетические аспекты региональной и глобальной экологии: Учеб. пособие. Липецк, 2009.
3. Сидорова А.Э., Мухартова Ю.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2013. № 5. С. 65 (Moscow University Phys. Bull. 2013. **68**, N 5. P. 405).
4. Сидорова А.Э., Твердислов В.А. // НТР. 2011. **90**, № 4. С. 3.
5. Пригожин И., Конденуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. М., 2002.
6. FitzHugh R.A. // Biophys. J. 1961. N 1. P. 445.
7. Сидорова А.Э., Твердислов В.А. Урбоэкосистемы как выраженный нелинейный элемент антропосферы // Физические проблемы экологии (экологическая физика). Вып. 16. М., 2010. С. 287.
8. Leitgeb N. Strahlen, Wellen, Felder // Ursachen und Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit. Deutscher Taschenbuch Verlag, 1990. P. 330.
9. Lednev V.V. // Bioelectromagnetics. 1991. **12**. P. 71.
10. Леднев В.В. // Биофизика. 1996. **41**. С. 224.
11. King R.S., Newmark P.A. // J. Cell Biol. 2012. **196**, N 5. P. 553.
12. Кузнецов А.Е., Градова Н.Б. Научные основы экобиотехнологии. М., 2006.

An urban ecosystem as a superposition of interrelated active media**A. E. Sidorova**^{1,a}, **Yu. V. Mukhartova**^{2,b}, **L. V. Yakovenko**¹¹ *Department of Biophysics;* ² *Department of Mathematics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.**E-mail:* ^a *sky314bone@mail.ru,* ^b *muhartova@yandex.ru.*

A space–time model that treats the urban ecosystem as a superposition of active media is expanded to take the heterogeneity of anthropogenic and natural factors into account. The approach is based on representation of urban ecosystems as conjugated active media and is aimed at identifying the threshold values of control parameters. The theoretical basis of the system analysis of the stability of urban ecosystems is provided by synergetic ideas concerning autowave self-organization in active media.

Keywords: self-organization, conjugated active media, autowaves, urban ecosystems.

PACS: 87.23.–n, 87.50.–a.

*Received 26 June 2014.*English version: *Moscow University Physics Bulletin* 5(2014).**Сведения об авторах**

1. Сидорова Алла Эдуардовна — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-11-95, e-mail: sky314bone@mail.ru.
2. Мухартова Юлия Вячеславовна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-10-33, e-mail: muhartova@yandex.ru.
3. Яковенко Леонид Владимирович — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-30-07, e-mail: leo.yakovenko@mail.ru.