

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧЕЛОВЕКА
И ОБЪЕКТА ТЕХНОСФЕРЫ
В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ЭКОЛОГИЧЕСКОГО БЛАГОПОЛУЧИЯ ЧЕЛОВЕКА**

О. Е. Безбородова

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
oxana243@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Имитационное моделирование является мощным инструментом исследования поведения различных систем, в том числе и системы «объект техносферы – человек». Одна из причин использования имитационного моделирования – это необходимость повышения уровня автоматизации обработки исходных данных для оперативного принятия управленческих решений. Цель проведенного исследования – это разработка имитационной модели взаимодействия элементов в системе «объект техносферы – человек» на основе риска с использованием системы дифференциальных уравнений Лотки – Вольтерры средствами MatLAB/Simulink. *Материалы и методы.* Исследование проведено с использованием комплексного экосистемного подхода и методов анализа и синтеза, группировки и обобщения, а также математического и имитационного моделирования. *Результаты.* В результате моделирования с использованием фазовой плоскости получили две особых точки: «центр» или «фокус», устойчивость которой необходимо дополнительно исследовать математическими методами, и «седло», которая в этой системе неустойчива. *Выводы.* Исходя из этого, следует отметить, что если какое-либо состояние системы «объект техносферы – человек» удовлетворяет нас с точки зрения соотношения значений техногенного риска и риска для здоровья человека, то во всех случаях для его поддержания необходимо прикладывать усилия и затрачивать ресурсы, осуществляя лечебно-профилактические, природоохранные и технологические мероприятия.

Ключевые слова: информационно-измерительная и управляющая система, имитационное моделирование, система дифференциальных уравнений Лотки – Вольтерры

Для цитирования: Безбородова О. Е. Имитационное моделирование взаимодействия человека и объекта техносферы в информационно-измерительных и управляющих системах обеспечения экологического благополучия человека // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 1. С. 164–177. doi:10.21685/2227-8486-2023-1-11

**SIMULATION MODELING OF THE INTERACTION
OF A HUMAN AND AN OBJECT OF TECHNOGENICS
ON THE BASIS OF RISK**

O.E. Bezborodova

Penza State University, Penza, Russia
oxana243@yandex.ru

© Безбородова О. Е., 2023. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Abstract. *Background.* Simulation modeling is a powerful tool for studying the behavior of various systems, including the «technosphere object – human» system. One of the reasons for the use of simulation modeling is the need to increase the level of automation of the processing of initial data for the rapid adoption of managerial decisions. The purpose of the study is to develop a simulation model for the interaction of elements in the «technosphere object – human» system based on risk using the Lotka – Volterra system of differential equations using MatLAB/Simulink. *Materials and methods.* The study was carried out using an integrated ecosystem approach and methods of analysis and synthesis, grouping and generalization, as well as mathematical and simulation modeling. *Results.* As a result of modeling using the phase plane, two singular points were obtained: the «center» or «focus», the stability of which must be further investigated by mathematical methods, and the «saddle», which is unstable in this system. *Conclusions.* Proceeding from this, it should be noted that if any state of the «technosphere object – human» system satisfies us from the point of view of the correlation between the values of technogenic risk and the risk to human health, then in all cases it is necessary to make efforts and spend resources to maintain it, carrying out medical treatment, preventive, environmental and technological measures.

Keywords: information-measuring and control system, simulation modeling, system of Lotka – Volterra differential equations

For citation: Bezborodova O.E. Simulation modeling of the interaction of a human and an object of technogenics on the basis of risk. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(1):164–177. (In Russ.). doi:10.21685/2227-8486-2023-1-11

Введение

Всемирная организация здравоохранения отмечает, что здоровье каждого человека на 50 % зависит от образа жизни, на 20 % – от состояния окружающей среды, на 20 % – от наследственности и 10 % – от медицины [1]. По прогнозам экспертов эти значения изменятся в ближайшие 30–40 лет, и зависимость физического состояния и самочувствия человека от состояния окружающей среды возрастет до 50–70 %, проявляясь и через наследственность, и через образ жизни [2]. В связи с этим очень важно контролировать воздействие объекта техносферы на человека и окружающую среду и управлять состоянием экологического благополучия человека с использованием современных технологий [3], к которым относят и различные виды моделирования.

Имитационное моделирование является мощным инструментом исследования поведения различных систем, в том числе и системы «объект техносферы – человек». Методы имитационного моделирования позволяют собрать необходимые данные об изменении состояния системы «объект техносферы – человек» в результате внешних воздействий путем исследования ее компьютерной модели. Одна из причин использования имитационного моделирования – это необходимость повышения уровня автоматизации обработки исходных данных для оперативного принятия управленческих решений. Проблемы, возникающие в системах такой сложности, могут быть проанализированы только с применением компьютерного моделирования.

Использование математического моделирования при изучении конкурирующих элементов системы «объект техносферы – человек» имеет преимущество, суть которого состоит в компьютерном моделировании реальных ситуаций и возможности многократного их повторения при различных исходных данных. Именно это позволит найти оптимальные решения проблем обеспечения экологического благополучия человека.

Цель проведенного исследования – это разработка имитационной модели взаимодействия элементов в системе «объект техносферы – человек» на основе риска с использованием системы дифференциальных уравнений Лотки – Вольтерры.

Для достижения цели автором поставлены и решены следующие задачи: провести анализ моделей и средств моделирования в экологии; обосновать выбор модели системы «объект техносферы – человек»; провести имитационное моделирование системы «объект техносферы – человек» с использованием системы дифференциальных уравнений Лотки – Вольтерры средствами *MatLAB/Simulink*; проанализировать результаты моделирования.

Объектом исследования является имитационная модель системы «объект техносферы – человек» на основе системы дифференциальных уравнений Лотки – Вольтерры, предметом исследования являются закономерности процесса взаимодействия в системе «объект техносферы – человек».

Исследование проведено с использованием комплексного экосистемного подхода и методов анализа и синтеза, группировки и обобщения, а также математического и имитационного моделирования.

Материалы и методы

Начало использования информационных технологий и математического моделирования для решения задач экологии, охраны окружающей среды и природопользования датируется 80-ми гг. XX в. В это время публикуется большое количество исследований по моделированию различных систем (биологических, медицинских, технических, социальных), подверженных случайным воздействиям. В них описание моделируемых объектов проводится дифференциальными уравнениями или системами дифференциальных уравнений. Дифференциальные уравнения достаточно адекватно моделируют динамические системы, но требуют введения дополнительных слагаемых и коэффициентов, учитывающих взаимное влияние элементов моделируемых систем и динамику параметров во времени [4–8].

Исследования динамических объектов с параметрами, меняющимися во времени случайным образом, представлены в работах [9–14].

Исходя из этого, актуальными являются исследования и разработка математических моделей (фактически цифровых двойников) для описания, исследования возможных состояний и выбора и формирования управляющих воздействий для таких объектов. В большей степени это актуально для элементов территориальной техносферы (человек, окружающая среда, объект техносферы), когда физические эксперименты громоздки, дороги и опасны.

Работы по моделированию в экологии условно можно подразделить следующим образом.

Во-первых, самые ранние работы, посвященные моделированию состояния отдельных сред и систем: сообществ фитопланктона и бактериальных сообществ [15], формирования урожая в агроэкосистемах, взаимодействия элементов в системе «пестициды – агробиоценоз» [13], изменения состояния атмосферы вблизи объекта техносферы [10, 12]. В работе [16] предложены динамические модели процессов развития эпидемий, предназначенные для оценивания заболеваемости и болезненности. В работе [8] проведено исследование традиционной модели взаимодействия биологических видов по типу «хищник – жертва» на качественном уровне, а также проведена идентификация особой

точки системы и анализ фазовых траекторий, получен общий аттрактор системы.

Во-вторых, более поздние работы, посвященные комплексной оценке состояния экологических систем, в которых представлены теория и методология имитационного моделирования в области охраны окружающей среды [17, 18]. В большинстве из них авторы предлагают для анализа и обеспечения устойчивости экосистем различного уровня различные инструменты, основанные на использовании информационных технологий – имитационным моделированием с использованием программных продуктов *Pilgrim* и *MathCAD*.

Лучшие результаты при имитационном моделировании дают методы анализа системной динамики, дискретно-событийное моделирование и мультиагентные технологии. Анализ системной динамики осуществляют с использованием специального программного обеспечения: *iThink*, *ModelMaker*, *PowerSim*, *VenSim*, дискретно-событийное моделирование с использованием *Facsimile*, *Tortuga*, *EcosimPro*, *Flexsim*, *Lanner*, *Promodel*, мультиагентные технологии осуществляют на базе программ *Galatea*, *NetLogo*, *Mobility Testbed*, *Swarm*, *RePast* [17].

Кроме специализированных программных продуктов есть российская программа, позволяющая осуществить сразу несколько видов имитационного моделирования – *The AnyLogic Company* [17]. Она в настоящее время является лидером в своей области в России и поддерживает все виды имитационного моделирования [17].

Для целей имитационного моделирования широко используют программы с графическим вводом моделируемых систем, например *MatLAB/Simulink* и *SimInTech*. Но наиболее известной и востребованной является *MatLAB/Simulink*, несмотря на то, что российский аналог *SimInTech* ей почти ни в чем не уступает.

Программы с графическим вводом моделируемых систем отличаются от мультиагентных технологий [19] структурным проектированием систем. Алгоритм начинается с определения качественного и количественного состава функциональных элементов и связей между ними, и далее осуществляется реализация всей модели [20].

Математические модели в программах с графическим вводом моделируемых систем реализуются в виде схемы, состоящей из отдельных блоков, реализующих математические действия и/или функции. Программы позволяют группировать совокупности блоков в подсистемы, из которых в дальнейшем составляют сложные модели. Например, модель системы из трех дифференциальных уравнений составляют из трех подсистем блоков, каждая из которых моделирует одно дифференциальное уравнение. Реализованная таким образом математическая модель – это функциональная схема, передающая аналоговые сигналы, несущие измеренные или рассчитанные данные. Ее отличие от *Arena* и *AnyLogic* заключается в структуре моделей. В *MatLAB/Simulink* и *SimInTech*, кроме самих объектов, устанавливают между блоками связи, которые передают результаты выполнения отдельных математических операций, что дает возможность представить всю модель целиком в графическом виде [20, 21].

Среды *MatLAB/Simulink* и *SimInTech* дают возможность построения имитационных моделей систем любой сложности и конфигурации.

Для обеспечения экологического благополучия человека в территориальной техносфере автором предложена интеллектуальная информационно-измерительная и управляющая система, упрощенная схема которой приведена на рис. 1.



Рис. 1. Упрощенная схема информационно-измерительной и управляющей системы обеспечения экологического благополучия человека [21]

Одна из функций предложенной системы – моделирование и прогнозирование экологического благополучия человека в территориальной техносфере. Для моделирования взаимодействия элементов в территориальной техносфере (человека, окружающей среды, объекта техносферы) автором предложена усовершенствованная система дифференциальных уравнений Лотки – Вольтерры, учитывающая их взаимное влияние.

Для проверки работоспособности модели использовано имитационное моделирование в среде *MatLAB/Simulink*.

Обоснование использования системы дифференциальных уравнений Лотки – Вольтерры для моделирования взаимодействия человека и объекта техносферы

Систему дифференциальных уравнений Лотки – Вольтерры применяют не только для моделирования взаимодействия биологических объектов в составе экосистемы, но и для моделирования других систем, в том числе технических или смешанных [22]. При этом проводят аналогии между техническими системами и экологическими системами, в которых в качестве энергии выступает биомасса, а в технических системах – перерабатываемое сырье, материалы и пр.

Система «объект техносферы – человек» («ОТ – ЧЕЛ») является составляющей как экологических, так и технических объектов, и поэтому может быть описана системой дифференциальных уравнений Лотки – Вольтерры.

В основе математической модели «хищник – жертва» с точки зрения экологического благополучия человека лежит наблюдение, свидетельствующее о том, что воздействия объектов техносферы на здоровье человека не совпадают во времени: изменение здоровья «запаздывает» на некоторый интервал времени. В этом случае нелинейная цикличность зависит от принятия взвешенных управленческих решений, оценивания влияния факторов риска и оптимального управления состоянием объектов техносферы.

Математически такое взаимодействие двух видов в составе экосистемы имеет вид

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = (\alpha - \beta y)x, \\ \frac{dy}{dt} = (-\gamma + \delta x)y, \end{cases} \quad (1)$$

где x – количественная характеристика «жертвы», т.е. элемента системы, теряющего энергию и/или вещество; y – количественная характеристика «хищника», т.е. элемента системы, приобретающего энергию и/или вещество; t – время; $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – коэффициенты, отражающие особенности взаимодействия между элементами системы.

Анализ системы «ОТ – ЧЕЛ» показывает, что по отношению друг к другу элементы системы выступают как «жертва» и «хищник» соответственно: «жертва» теряет энергию и вещество в пользу «хищника», а «хищник» потребляет энергию и вещество за счет «жертвы». В результате этого обмена изменяется их качественное состояние и зависимость изменения числа «жертв» во времени может быть представлена в виде

$$\frac{dx}{dt} = \alpha x, \quad (2)$$

где α учитывает интенсивность воспроизводства «жертв»; x – это исходное число «жертв»; dx / dt – это скорость увеличения численности «жертв».

Имея в виду то, что если «хищники» не обеспечены питанием постоянно – они вымирают, получаем уравнение, описывающее изменение численности «хищников»:

$$\frac{dy}{dt} = \delta xy - \gamma y, \quad (3)$$

где d учитывает интенсивность гибели «хищников»; y – это исходное число «хищников»; dy / dt – это скорость увеличения численности «хищников».

Следовательно, взаимодействие «ОТ (x) – ЧЕЛ (z)» происходит с увеличением риска для здоровья человека из-за повышения интенсивности работы объекта техносферы (одно-, двух- или трехсменная работа) и улучшение функционального состояния организма человека в результате повышения эффективности работы средозащитного оборудования.

Автором предложена модель системы «ОТ – ЧЕЛ» на основе усовершенствованной системы дифференциальных уравнений Лотки – Вольтерры и применен подход, являющийся вполне обоснованным с применением аналогий с экологическими системами. В табл. 1 установлено соответствие элементов экологической системы и территориальной техносферы.

Таблица 1

Экологическая система – территориальная техносфера

Система	Передача	Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3
Экологическая система	Энергетическая биомасса	Хищники	Травоядные	Растения
Территориальная техносфера	Эмиссия загрязнений	Объект техносферы	Человек	Окружающая среда

Попарный анализ модели территориальной техносферы на основе усовершенствованной системы дифференциальных уравнений Лотки – Вольтерры

Представление трехэлементной модели территориальной техносферы в трехмерном пространстве приведено на рис. 2.

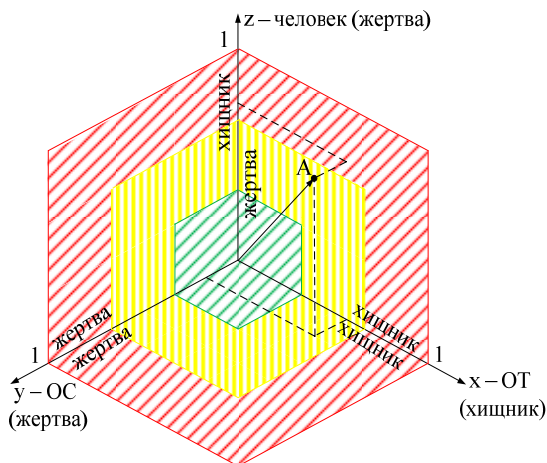


Рис. 2. Взаимодействие объектов в территориальной техносфере

Попарное взаимодействие элементов территориальной техносферы можно описать следующим образом, когда каждый элемент территориальной техносферы рассматривается по отношению к другому либо как «хищник», либо как «жертва». Среди рассматриваемых вариантов объект техносферы всегда выступает как «хищник», окружающая среда – всегда как «жертва», а человек рассматривается по отношению к объекту техносферы как «жертва», а по отношению к окружающей среде – всегда как «хищник». Но базовое предположение, лежащее в основе их взаимодействия, состоит в том, что у «жертвы» всегда есть период, когда она за счет внутренних ресурсов активно противодействует «хищнику». В связи с этим процесс взаимодействия «хищника» и «жертвы» может развиваться по трем сценариям:

- при малых воздействиях «хищника» «жертва» их полностью перерабатывает (устойчивая ситуация);
- при увеличении воздействия, учитывая исходное состояние и совокупность случайных причин, «жертва» может находиться в удовлетворительном состоянии, а может и погибнуть;
- при дальнейшем увеличении воздействия ситуация соответствует экологической катастрофе – полной деградации «жертвы» [4, 5].

Для пары «хищник – жертва» «ОТ (x) – ЧЕЛ (z)» система дифференциальных уравнений Лотки – Вольтерры может быть записана следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = (-a_2 + b_2x)z = -a_2z + b_2xz, \\ \frac{dz}{dt} = (c_2 - d_2z)x = c_2x - d_2zx. \end{cases} \quad (4)$$

Анализируя выражение (4) как модель взаимодействия в системе «ОТ – ЧЕЛ», можно отметить, что фазовым пространством, в котором изменяется фазовый портрет и фазовая траектория системы (4), является множество вещественных чисел $\mathbb{R}_+^2 = \{x, z : x \geq 0, z \geq 0\}$, которое является инвариантным, так как любая траектория, начинающаяся в $\mathbb{R}_+^2$, не может пересечь линии $x = 0, z = 0$, являющиеся фазовыми кривыми.

Решая систему уравнений (4), получаем две особые точки, т.е. точки пересечения двух плоскостей в фазовом пространстве. Положения этих точек определяют возможность устойчивого сосуществования двух элементов территориальной техносферы, при котором каждый из них характеризуется набором параметров. Если значение какой-либо координаты стационарной точки отрицательно, то это означает, что этот элемент территориальной техносферы деградирует. Случай, когда обе координаты особой точки отрицательны, т.е. когда оба элемента деградируют, означает, что не учтено влияние какого-то фактора риска.

Исходные данные для попарного моделирования элементов территориальной техносферы в *MatLAB/Simulink* и физический смысл параметров системы дифференциальных уравнений Лотки – Вольтерры для системы «ОТ – ЧЕЛ» приведены в табл. 2.

Таблица 2

Физический смысл и значения коэффициентов
для моделирования системы «ОТ – ЧЕЛ»

Параметры системы дифференциальных уравнений Лотки – Вольтерры	
для экосистемы	для системы «ОТ (x) – ЧЕЛ (z)»
x – величина популяции хищников	x – значение техногенного риска
γ – коэффициент убыли хищников	a_2 – коэффициент эффективности работы средозащитного оборудования объекта техносферы (0 – 1)
δ – коэффициент рождаемости хищников	b_2 – коэффициент загруженности объекта техносферы (трехсменная работа – 1, двухсменная работа – 2/3, односменная работа – 1/3)
y – величина популяции жертв	z – значение риска для здоровья человека
α – коэффициент рождаемости жертв	c_2 – коэффициент самовосстановления человека
β – коэффициент убыли жертв	d_2 – коэффициент функционального состояния организма одного человека: $d_2 = \frac{e_i}{MTD},$ где e_i – измеренное (фактическое) значение i -го исследуемого параметра организма человека, MTD – пороговая доза исследуемого параметра организма человека в отношении эффекта, выходящего за пределы нормальных физиологических реакций
t – время	

Для модели экологического благополучия человека в территориальной техносфере система уравнений (4) означает, что факторы риска, влияющие на состояние системы «ОТ – ЧЕЛ», объединяются в два интегральных

(обобщенных) управляющих параметра: коэффициент «улучшения качества» a (учитывает различные возможности развития) и коэффициент «деградации» c (учитывает различного рода ограничения).

Результаты имитационного моделирования

Общий вид зависимостей «хищник – жертва» для системы «ОТ – ЧЕЛ» приведен на рис. 3. Схема моделирования этой системы приведена на рис. 3,а.

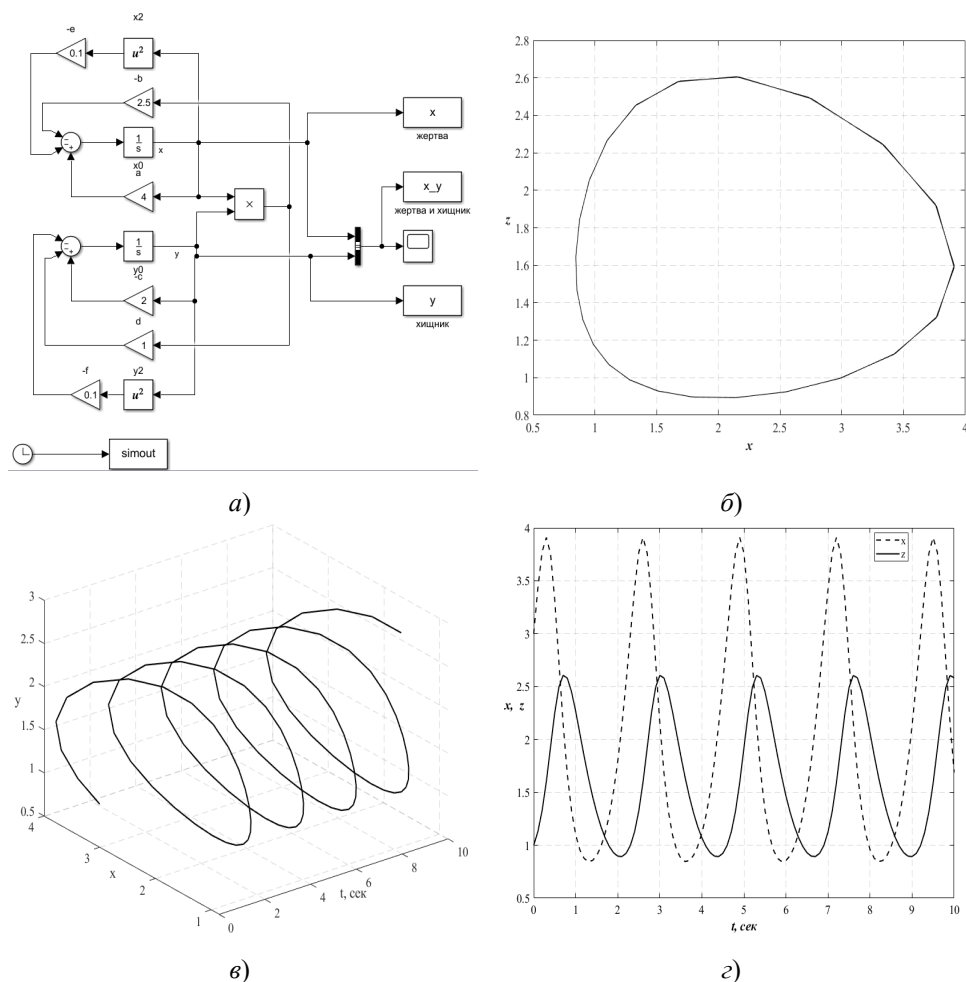


Рис. 3. Результаты моделирования взаимодействия элементов в системе «объект техносферы – человек»: а – схема моделирования в *MATLAB/Simulink*; б – фазовый портрет; в – фазовая траектория; г – зависимость техногенного риска и риска для здоровья человека от времени моделирования

Анализ с использованием фазовой плоскости является важным методом при исследовании взаимодействия объекта техносферы и человека, описываемого системой дифференциальных уравнений 1-го порядка (4). Решение этой системы дает две устойчивые точки. Особая точка в начале координат плоскости является неустойчивой седловой точкой, так как вблизи точки $(0,0)$ при x и z , стремящихся к единице, получается линия, близкая к гиперболе (рис. 3,б).

Ненулевая точка – это центр, что подтверждает эллиптическая замкнутая траектория, и ее координаты определяются по формулам:

$$x = \frac{a}{b}, \quad (5)$$

$$z = \frac{c}{d}.$$

Следовательно, решение системы (4) имеет колебательный характер, так как с течением времени решение в плоскости (x, z) еще раз пройдет через любую точку, которая будет принята как исходная в начальный момент времени. Колебательные решения получаются путем численного интегрирования системы (4) для выбранных начальных условий и приведены на рис. 3, в, г. Точки поворота для z всегда находятся при $x \approx 2,55$, а значение точки поворота для x всегда меньше значения z .

Отсюда следует, что значения риска для здоровья человека и техногенного риска находятся не в фазе, при этом изменение риска для здоровья человека «запаздывает» по отношению к техногенному риску [22].

Как видно из рис. 3, числовым решением системы (4) может быть как замкнутая фазовая траектория (б), так и спираль в виде аттрактора (в). Представленная на рис. 3, в спираль показывает, что при различном перераспределении ресурсов (финансовых, материальных), влияющем на состояние элементов территориальной техносферы, возможно улучшить экологическое благополучие человека, не ухудшив состояния объекта техносферы. Таким образом, решение системы уравнений даст возможность приблизиться к динамическому равновесию системы.

Выводы

Анализ результатов попарного моделирования элементов территориальной техносферы «ОТ – ЧЕЛ» в *MATLAB/Simulink* с использованием временных функций и фазовых траекторий показал, что при любых соотношениях коэффициентов особыми точками будут:

- «центр» или «фокус», устойчивость которой необходимо дополнительно исследовать математическими методами;
- «седло», которая в этой системе неустойчива.

Исходя из этого, следует отметить, что если какое-либо состояние системы «ОТ – ЧЕЛ» удовлетворяет нас с точки зрения соотношения значений техногенного риска и риска для здоровья человека, то во всех случаях для его поддержания необходимо прикладывать усилия и затрачивать ресурсы, осуществляя лечебно-профилактические, природоохранные и технологические мероприятия.

Заключение

Результаты разработки и исследования имитационной модели взаимодействия элементов в системе «объект техносферы – человек» на основе риска с использованием системы дифференциальных уравнений Лотки – Вольтерры показали ее достоверность и возможность использования для дальнейшего исследования взаимодействия элементов в территориальной техносфере.

Список литературы

1. Стивенс Г., Маскареньяс М., Мэтерс К. Глобальные факторы риска для здоровья: прогресс и проблемы // Бюллетень Всемирной организации здравоохранения. Вып. 87, № 9. С. 645–732. URL: <https://www.who.int/bulletin/volumes/87/9/ru/> (дата обращения: 01.11.2022).
2. Konstantinov A. P. Ecology and health: mythical and real dangers // Ecology and life. 2012. № 7. Р. 82–85.
3. Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации отрасли экологии и природопользования : распоряжение Правительства РФ № 3496-р от 08.12.2021.
4. Братусь А. С., Новожилов А. С., Родина Е. В. Дискретные динамические системы и математические модели в экологии : учеб. пособие. М. : МИИТ, 2005. 139 с.
5. Трубецков Д. И. Феномен математической модели Лотки-Вольтерры и сходных с ней // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fenomen-matematicheskoy-modeli-lotki-volterry-i-shodnyh-s-ney> (дата обращения: 01.11.2022).
6. Распутина Е. И., Осипов Г. С. Математическое и имитационное моделирование динамики популяций // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 3-1. С. 28–33.
7. Сорокин А. С. Аналитическое представление решения системы уравнений Колмогорова (оценка качества системы) // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2005. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiticheskoe-predstavlenie-resheniya-sistemy-uravneniy-kolmogorova-otsenka-kachestva-sistemy> (дата обращения: 01.11.2022).
8. Беляев А. В., Перевалова Т. В. Стохастическая чувствительность квазипериодических и хаотических аттракторов дискретной модели Лотки-Вольтерры // Известия Института математики и информатики Удмуртского государственного университета. 2020. Т. 55. С. 19–32. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/stokhasticheskaya-chuvstvitelnost-kvaziperiodicheskikh-i-haoticheskikh-attraktorov-diskretnoy-modeli-lotki-volterry> (дата обращения: 01.11.2022).
9. Дмитриев В. В. Определение интегрального показателя состояния природного объекта как сложной системы // Общество. Среда. Развитие (Terra Humana). 2009. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-integralnogo-pokazatelya-sostoyaniya-prirodnogo-obekta-kak-slozhnoy-sistemy> (дата обращения: 01.11.2022).
10. Ермолаева С. В., Ключков В. В., Иванов Е. О. Интегральная оценка качества окружающей среды территории Ульяновской области // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2014. № 3. С. 26–31.
11. Пономарев А. И. О методах нормирования антропогенных нагрузок на окружающую среду // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. 2014. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-metodah-normirovaniya-antropogennyh-nagruzok-na-okruzhayuschuyu-sredu> (дата обращения: 01.11.2022).
12. Толкачева Н. А. Сравнительная характеристика методов оценки комплексного химического загрязнения атмосферного воздуха населенных мест // Современные проблемы гигиенической науки и практики, перспективы развития : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. Ю. Е. Демидчика. Минск, 2014. С. 322–325.
13. Баденко В. Л., Топаж А. Г., Якушев В. В. [и др.]. Имитационная модель агроэкосистемы как инструмент теоретических исследований // Сельскохозяйственная биология. 2017. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnaya-model-agroekosistemy-kak-instrument-teoreticheskikh-issledovaniy> (дата обращения: 01.11.2022).
14. Кислицын Е. В., Гоголин В. В. Имитационное моделирование экологической ситуации в мегаполисе // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2021. № 1. С. 92–106. doi:10.21685/2227-8486-2021-1-8

15. Йоргенсен С. Э. Управление озерными экосистемами : пер. с англ. М. : Агропромиздат, 1985. 160 с.
16. Лобзин Ю. В., Максимов Г. К., Уйба В. В., Максимов А. Г. Методология имитационного моделирования в экологических и эпидемиологических исследованиях заболеваемости населения // Медицинский академический журнал. 2009. Т. 9, № 2. С. 85–90. doi:10.17816/MAJ9285-90
17. Голубничий А. А., Туксина Е. А. Анализ методов и программных продуктов для имитационного моделирования экологических процессов и систем // Современная техника и технологии. 2017. № 1. URL: <https://technology.snauka.ru/2017/01/11852> (дата обращения: 01.11.2022).
18. Петрова Л. В., Баранов А. В., Царегородцев Е. И., Корепанов Д. А. Методологические аспекты имитационного моделирования экологических систем // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. 2014. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodologicheskie-aspekty-imitatsionnogo-modelirovaniya-ekologicheskikh-sistem> (дата обращения: 01.11.2022).
19. Груданов Н. А., Груданова А. А. Обзор инструментальных средств для имитационного моделирования // StudNet. 2021. № 7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-instrumentalnyh-sredstv-dlya-imitatsionnogo-modelirovaniya> (дата обращения: 01.11.2022).
20. Трусфус М. В., Кирпичников А. П., Якимов И. М. Моделирование в системе структурного и имитационного моделирования Simulink // Вестник Казанского технологического университета. 2017. № 8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-v-sisteme-strukturnogo-i-imitatsionnogo-modelirovaniya-simulink> (дата обращения: 01.11.2022).
21. Кислицын Е. В. Конструирование имитационной модели конкурентоспособности и инновационной активности промышленного предприятия // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2019. № 3. С. 5–19.
22. Безбородова О. Е. Оценка точности прогнозирования состояния территориальной техносферы в информационно-измерительной и управляющей системе обеспечения экологического благополучия человека // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 4. С. 43–51.
23. Титов В. А., Вейнберг Р. Р. Анализ существующих динамических моделей на базе системы уравнений Лотки-Вольтерры «хищник–жертва» // Фундаментальные исследования. 2016. № 8-2. С. 409–413.
24. Марри Д. Ж. Нелинейные дифференциальные уравнения в биологии. Лекции о моделях : пер. с англ. М. : Мир, 1983.

References

1. Stivens G., Maskaren'yas M., Meters K. Global health risk factors: progress and problems. *Byulleten' Vsemirnoy organizatsii zdravookhraneniya = Bulletin of the World Health Organization*. 87(9):645–732. (In Russ.). Available at: <https://www.who.int/bulletin/volumes/87/9/ru/> (accessed 01.11.2022).
2. Konstantinov A.P. Ecology and health: mythical and real dangers. *Ecology and life*. 2012;(7):82–85.
3. *Ob utverzhdenii strategicheskogo napravleniya v oblasti tsifrovoy transformatsii otrasli ekologii i prirodopol'zovaniya: rasporyazhenie Pravitel'stva RF № 3496-r ot 08.12.2021 = On approval of the strategic direction in the field of digital transformation of the ecology and nature management industry : Decree of the Government of the Russian Federation No. 3496-r dated 08.12.2021*. (In Russ.)
4. Bratus' A.S., Novozhilov A.S., Rodina E.V. *Diskretnye dinamicheskie sistemy i matematicheskie modeli v ekologii: ucheb. posobie = Discrete dynamical systems and mathematical models in ecology : textbook*. Moscow: MIIT, 2005:139. (In Russ.)

5. Trubetskov D.I. The phenomenon of the Lotka-Volterra mathematical model and similar ones. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya nelineynaya dinamika = News of universities. Applied nonlinear dynamics*. 2011;(2). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/fenomen-matematicheskoy-modeli-lotki-volterry-i-shodnyh-s-ney> (accessed 01.11.2022).
6. Rasputina E.I., Osipov G.S. Mathematical and simulation modeling of population dynamics. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy = International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2017;(3-1):28–33. (In Russ.)
7. Sorokin A.S. Analytical representation of the solution of a system of Kolmogorov equations (system quality assessment). *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2005;(2). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiticheskoe-predstavlenie-resheniya-sistemy-uravneniy-kolmogorova-otsenka-kachestva-sistemy> (accessed 01.11.2022).
8. Belyaev A.V., Perevalova T.V. Stochastic sensitivity of quasi-periodic and chaotic attractors of the discrete Lotka-Volterra model. *Izvestiya Instituta matematiki i informatiki Udmurtskogo gosudarstvennogo universiteta = Izvestiya Institute of Mathematics and Informatics of Udmurt State University*. 2020;55:19–32. (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/stokhasticheskaya-chuvstvitelnost-kvazi-periodicheskikh-i-haoticheskikh-attraktorov-diskretnoy-modeli-lotki-volterry> (accessed 01.11.2022).
9. Dmitriev V.V. Definition of an integral indicator of the state of a natural object as a complex system. *Obshchestvo. Sreda. Razvitie (Terra Humana) = Society. Wednesday. Development (Terra Humana)*. 2009;(4). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-integralnogo-pokazatelya-sostoyaniya-prirodnogo-obekta-kak-slozhnoy-sistemy> (accessed 01.11.2022).
10. Ermolaeva S.V., Klochkov V.V., Ivanov E.O. Integral assessment of the environmental quality of the territory of the Ulyanovsk region. *Vektor nauki Tol'yattinskogo gosudarstvennogo universiteta = Vector of Science of Togliatti State University*. 2014;(3): 26–31. (In Russ.)
11. Ponomarev A.I. On methods of rationing anthropogenic loads on the environment. *Strategiya grazhdanskoy zashchity: problemy i issledovaniya = Strategy of civil protection: problems and research*. 2014;(1). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-metodah-normirovaniya-antropogennykh-nagruzok-na-okruzhayushchuyu-sredu> (accessed 01.11.2022).
12. Tolkacheva N.A. Comparative characteristics of methods for assessing complex chemical pollution of atmospheric air in populated areas. *Sovremennye problemy gigienicheskoy nauki i praktiki, perspektivy razvitiya: sb. materialov Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Modern problems of hygienic science and practice, prospects for development : collection of materials of the International scientific and practical conference*. Minsk, 2014:322–325. (In Russ.)
13. Badenko V.L., Topazh A.G., Yakushev V.V. et al. Simulation model of agroecosystem as a tool of theoretical research. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya = Agricultural biology*. 2017;(3). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnaya-model-agroekosistemy-kak-instrument-teoreticheskikh-issledovaniy> (accessed 01.11.2022).
14. Kislitsyn E.V., Gogulin V.V. Simulation modeling of the ecological situation in a megalopolis. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2021;(1):92–106. (In Russ.). doi:10.21685/2227-8486-2021-1-8
15. Yorgensen S.E. *Upravlenie ozernymi ekosistemami: per. s angl. = Management of lake ecosystems : trans. from English*. Moscow: Agropromizdat, 1985:160. (In Russ.)

16. Lobzin Yu.V., Maksimov G.K., Uyba V.V., Maksimov A.G. Methodology of simulation modeling in ecological and epidemiological studies of population morbidity. *Meditsinskiy akademicheskiy zhurnal = Medical Academic Journal*. 2009;9(2):85–90. (In Russ.). doi:10.17816/MAJ9285-90
17. Golubnichiy A.A., Tuksina E.A. Analysis of methods and software products for simulation modeling of ecological processes and systems. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii = Modern equipment and technologies*. 2017;(1). (In Russ.). Available at: <https://technology.snauka.ru/2017/01/11852> (accessed 01.11.2022).
18. Petrova L.V., Baranov A.V., Tsaregorodtsev E.I., Korepanov D.A. Methodological aspects of simulation of ecological systems. *Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. I.Ya. Yakovleva = Bulletin of the I. Ya. Yakovlev Chuvash State Pedagogical University*. 2014;(4). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodologicheskie-aspekty-imitatsionnogo-modelirovaniya-ekologicheskikh-sistem> (accessed 01.11.2022).
19. Grudanov N.A., Grudanov A.A. Review of tools for simulation modeling. *StudNet*. 2021;(7). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-instrumental-nyh-sredstv-dlya-imitatsionnogo-modelirovaniya> (accessed 01.11.2022).
20. Trusfuf M.V., Kirpichnikov A.P., Yakimov I.M. Modeling in the system of structural and simulation modeling Simulink. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of Kazan technological university*. 2017;(8). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-v-sisteme-strukturnogo-i-imitatsionnogo-modelirovaniya-simulink> (accessed 01.11.2022).
21. Kislitsyn E.V. Designing a simulation model of competitiveness and innovation activity of an industrial enterprise. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2019;(3):5–19. (In Russ.)
22. Bezborodova O.E. Assessment of the accuracy of forecasting the state of the territorial technosphere in the information-measuring and control system for ensuring human environmental well-being. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control*. 2022;(4):43–51. (In Russ.)
23. Titov V.A., Veynberg R.R. Analysis of existing dynamic models based on the system of Lotka-Volterra equations "predator–prey". *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental research*. 2016;(8-2):409–413. (In Russ.)
24. Marri D.Zh. *Nelineynye differentsial'nye uravneniya v biologii. Lektsii o modelyakh: per. s angl. = Nonlinear differential equations in biology. Lectures on models : trans. from English*. Moscow: Mir, 1983. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Оксана Евгеньевна Безбородова
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедры
техносферной безопасности,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: oxana243@yandex.ru

Oksana E. Bezborodova
Candidate of technical sciences,
associate professor,
head of the sub-department
of technosphere safety,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /
The author declares no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 29.11.2022

Поступила после рецензирования/Revised 14.01.2023

Принята к публикации/Accepted 10.02.2023