

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

ЭКОЛОГИЯ ЧЕЛОВЕКА И ЕГО ЗДОРОВЬЕ

УДК 504.064.2.001.18

DOI: 10.18384/2712-7621-2021-3-96-109

ТЕОРИЯ ДЕТЕРМИНИРОВАННОГО ХАОСА ДЛЯ ОПИСАНИЯ ЭКОЛОГО-МЕДИЦИНСКОЙ СИСТЕМЫ

Базарский О. В., Кочетова Ж. Ю.

*Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина
394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54а, Российская Федерация*

Аннотация

Цель. Разработать универсальную модель на основе теории детерминированного хаоса для описания развития эколого-медицинской системы (ЭМС).

Процедура и методы. Описание ЭМС с применением теории детерминированного хаоса предполагает уже существующую математическую модель Фейгенбаума «оснастить» измеряемыми экологическими и медицинскими величинами, которые имеют статистический смысл. В эколого-медицинской системе действуют как случайные факторы, связанные с неопределённостью уровня загрязнения окружающей среды, так и детерминированные, связанные с упорядоченной деятельностью человека. Необходимо выявить случайную составляющую – закон распределения уровня загрязнения окружающей среды по концентрациям загрязняющих веществ – и соотнести её с детерминированной составляющей (предельно допустимой концентрацией), обеспечивающей безопасный уровень определённости. Модифицированная для эколого-медицинской системы модель Фейгенбаума позволяет оценить текущую неустойчивость ЭМС при известном уровне эколого-медицинской энтропии, а также сделать прогноз её развития в течение 100 лет при изменении техногенной нагрузки.

Результаты. Для описания ЭМС введены новые понятия эколого-медицинской энтропии и эколого-медицинского риска. В зависимости от уровня деградации окружающей среды выделены 3 фундаментальных периода развития ЭМС: динамический режим с детерминированными связями энтропии и устойчивости эколого-медицинской системы; переходный режим с 2 последующими кризисами (бифуркациями); хаотический режим с быстро повторяющимися кризисами, но с существованием окна возможностей зарождения новой

популяции. Сделано ранжирование состояний эколого-медицинской системы по рангам деградации окружающей среды и неустойчивости ЭМС (от абсолютно устойчивого состояния $R=0$ до абсолютно хаотичного $R=1$). Приведены примеры изменения устойчивости ЭМС при различных уровнях техногенной нагрузки на окружающую среду. Показано, что при уровне эколого-медицинской энтропии $S \leq 1,1$ и уровне её неустойчивости $R \leq 0,1$ система находится в ранге нормы и с течением времени самовосстанавливается; при $1,1 < S \leq 2,7$ система находится в режиме динамического увеличения её неустойчивости от $R=0,28$ до $R=0,63$. Здесь заканчивается «горизонт прогноза» и наступают переходный и хаотический режимы.

Теоретическая и/или практическая значимость. Построенная нелинейная циклическая модель ЭМС позволяет прогнозировать её сложное поведение в течение длительного времени. Так как эколого-медицинская система проявляет как детерминированные, так и случайные свойства, то проанализирован переход ЭМС от детерминированного к хаотическому. Практическая значимость заключается в установлении порогов неустойчивости ЭМС. Результаты исследования могут быть применены к любой стране и региону, для которых известны или рассчитаны входные параметры модели.

Ключевые слова: экологические системы, экологический риск, энтропия, модель Фейгенбаума, критерий устойчивости Ляпунова

THE THEORY OF DETERMINISTIC CHAOS FOR THE DESCRIPTION OF THE ECOLOGICAL AND MEDICAL SYSTEM

O. Bazarsky, Zh. Kochetova

*N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy
Starykh Bolshevikov ul. 54a, Voronezh 394064, Russian Federation*

Abstract

Aim. We develop a universal model based on the theory of deterministic chaos to describe the development of the ecological and medical system (EMS).

Methodology. The description of EMS using the theory of deterministic chaos assumes the already existing Feigenbaum mathematical model to be “equipped” with measurable environmental and medical values that have statistical meaning. In the environmental medical system, there are both random factors associated with the uncertainty of the level of pollution of the environment, and deterministic ones associated with ordered human activity. It is necessary to identify the random component – the law of distribution of the level of environmental pollution by concentrations of pollutants – and correlate it with the deterministic component (maximum permissible concentration), which provides a safe level of certainty. The Feigenbaum model modified for the environmental-medical system allows one to assess the current instability of EMS at a known level of environmental-medical entropy, as well as make a prediction of its development over 100 years with a change in technological load.

Results. To describe EMS, new concepts of environmental-medical entropy and environmental-medical risk have been introduced. Depending on the level of environmental degradation, three fundamental periods of EMS development are identified: dynamic mode with deterministic connections of entropy and stability of the environmental-medical system; a transitional regime with two subsequent crises (bifurcations); AND a chaotic regime with rapidly recurring crises, but with the existence of a window of opportunity for the emergence of a new population.

Ranking of states of ecological-medical system according to ranks of environmental degradation and instability of EMS (from absolutely stable state $R=0$ to absolutely chaotic $R=1$) is made. Examples of EMS stability change at different levels of man-made environmental load are presented. It is shown that at the level of ecological-medical entropy $S \leq 1,1$ and the level of its instability $R \leq 0,1$ the system is in the rank of normal and self-recovers over time; at $1.1 < S \leq 2.7$ the system is in the mode of dynamic increase of its instability from $R=0,28$ to $R=0,63$. Here ends the 'forecast horizon' and transitional and chaotic regimes come.

Research implications. The constructed nonlinear cyclic model of EMS allows predicting its complex behavior for a long time. Since the ecological-medical system exhibits both deterministic and random properties, the transition of EMS from deterministic to chaotic is analyzed. The practical significance lies in the establishment of thresholds for the EMS instability. At $R \leq 0,63$, due to environmental and medical measures, it is still possible to stabilize EMS. At $R \leq 0,1$, EMS can spontaneously recover to the background level of absolute stability of the system $R=0$. The results of the study can be applied to any country and region for which the input parameters of the model are known or calculated.

Keywords: ecological systems, ecological risk, entropy, Feigenbaum model, Lyapunov stability criterion

Введение

В настоящее время нет ни одной модели, в которой присутствуют одновременно детерминированные и хаотические режимы. Аппарат теории детерминированного хаоса связывает эти режимы в таких разных науках, как физика, астрономия, информатика, химическая кинетика, биология, биофизика, метеорология, экология, медицина и др. [1; 3]. Особенно перспективно применение теории детерминированного хаоса в экологии, являющейся синтезом многих наук, где в различных сочетаниях присутствуют оба этих режима. Впервые сложное поведение сравнительно простой динамической системы отметил Э. Н. Лоренц, изучая тепловую конвекцию атмосферы [13]. Нерегулярные колебания в модели Лоренца получили название динамического или детерминированного хаоса. Они возникают в системах, описываемых обыкновенными динамическими уравнениями, решение которых однозначно определяется начальными условиями.

Широкое распространение получила вероятностная термодинамическая интерпретация сложных биологических систем, далёких от равновесия [8; 14; 16]. Надо отметить, что правильность такого подхода подвергается и сомнениям, т. к. некоторые исследователи считают неприемлемым использование чисто вероятностного подхода к описанию сложных биологических систем [12; 18]. Но, несмотря на споры и критику, растёт число исследований, в которых проблемы развития отдельных видов и популяций поднимаются до уровня термодинамического описания экологических систем, что ставит новые задачи, определяет значительные изменения в характере самой проблемы [9; 15].

Мы разделяем сомнения по поводу необоснованного переноса чисто статистических моделей на биологические системы по следующим причинам. Классическая термодинамика хорошо описывает случайные физико-химические процессы, подчиняющиеся распределениям Максвелла и Больцмана.

Неравновесная термодинамика, развитая в работах И. Пригожина [8], описывает более сложные открытые иерархические процессы с изменяющейся энтропией, например, реакция Белоусова-Жаботинского [2]. Качественный переход к биологическим системам характеризуется возникновением устойчивых обратных связей, посредством которых система сохраняет свой гомеостаз в течение длительного времени циклически, черпая энергию из окружающей среды и сбрасывая в неё продукты своей жизнедеятельности. Благодаря возникновению памяти биологическая система управляет своей жизнедеятельностью, уменьшая свою энтропию за счёт деградации окружающей среды.

Любая экологическая система – это сложный комплекс взаимодействия человека (человеческого сообщества) с окружающей средой, в т. ч. и в эколого-медицинской системе. Здесь уровень загрязнения окружающей среды – случайная составляющая, а предельно допустимая концентрация – детерминированная. Их отношение – число состояний системы, определяющее степень присущего ей беспорядка, которое является квазидетерминированной величиной.

Процесс развития экологических систем очень сложен: на начальных этапах случайность в них мала, а по мере деградации их статистические свойства усиливаются. Где же лежит граница между регулярной, но сложно организованной структурой (порядком) и беспорядком? Под беспорядком в таких системах подразумевается проявление качественно нового режима – хаоса. Критерием появления хаоса может служить устойчивость воз-

никающих в системе образований по отношению к малым возмущениям. Если такая устойчивость отсутствует, детерминированное описание теряет смысл и необходимо использовать статистические методы. И здесь возникает новая проблема: из-за сложного поведения экологических систем в течение длительного времени, когда они проявляют как детерминированные, так и случайные свойства, чисто динамические и чисто статистические её модели оказываются непригодными [11; 19].

Цель исследовательской работы – построение единой модели на основе теории детерминированного хаоса для описания развития эколого-медицинской системы как в детерминированном, так и в хаотичном состоянии.

Математическая модель для описания эколого-медицинской системы

Под эколого-медицинской системой (ЭМС) будем понимать совокупность абиотических и биотических составляющих, образующих исследуемую территорию. Абиотическая составляющая за время наблюдения изменяется медленно, и основные экологические изменения связаны с деятельностью человека. За короткое (по историческим меркам) время наблюдения за состоянием ЭМС можно считать эту систему замкнутой, когда внешними воздействиями можно пренебречь. В этой системе действуют как детерминированные факторы, воздействия которых можно описать динамическими закономерностями, так и случайные, описываемые статистическими закономерностями.

Поскольку ЭМС включает в себя биотическую составляющую, то её

модель должна удовлетворять следующим требованиям:

1. она должна быть циклической, где конечные характеристики предыдущего цикла являются начальными для следующего. Длительное существование живых организмов возможно только в циклическом процессе. В процессе каждого цикла жизнедеятельности в организме происходит накопление энтропии, которая затем сбрасывается в окружающую среду, неизбежно деградируя её [17];

2. модель ЭМС должна быть нелинейной, т. к. энтропия со временем накапливается в организме вследствие того, что системы выведения вредных веществ перестают справляться с их утилизацией.

В качестве математической модели ЭМС предлагается модифицированная модель Фейгенбаума, состоящая в том, что сценарий перехода к хаосу через бесконечный каскад бифуркаций удвоения периода универсален для большого класса динамических систем [4; 10]:

$$x_i = k(x_n - x_n^2), \quad (1)$$

где:

x_n – состояние системы на n -ном цикле итераций;

k – управляющий параметр, который принадлежит интервалу $[0, 4]$, а интервал значений x_n лежит в интервале $[0, 1]$.

Эта математическая циклическая нелинейная модель демонстрирует достаточно сложное поведение при изменении внешнего управляющего параметра. При малых k модель характеризует детерминированное состояние ЭМС, а при определённых

значениях k возникают бифуркации и переход к хаотическому состоянию системы. Но и в этом её состоянии существуют окна устойчивости. Для придания эколого-медицинского смысла этой математической модели необходимо адекватно описать её параметры k и x_n .

Степень хаотичности термодинамической системы характеризуется её энтропией [7]:

$$dS = \delta Q/T, \quad (2)$$

где:

dS – приращение энтропии системы;

δQ – приведённое количество энергии, определяющее приращение хаотичности системы при некотором начальном уровне хаоса, определяемом температурой T .

Аналогом величины δQ в ЭМС может быть приращение эколого-медицинского риска ΔR :

$$\Delta R = P\delta Z, \quad (3)$$

где:

$P = m/N$ – вероятность экологически обусловленных заболеваний населения или уровень опасности, присущий ЭМС;

m – число людей, которые приобрели экологически обусловленные заболевания из обследованного количества людей N ;

δZ – приращение экологического ущерба в процессе жизнедеятельности человека.

Экологический ущерб будем определять по классическому суммарному показателю загрязнения (СПЗ) [5]:

$$Z = \sum_{i=1}^n -(n-1), \quad (4)$$

где:

$K_i = C_i / \text{ПДК}_i > 1$ – коэффициент концентрации i -того загрязняющего вещества, определяемого отношением его концентрации C_i к предельно допустимой концентрации ПДК_i этого вещества;

n – число загрязняющих веществ, концентрация которых больше ПДК. Если все $K_i = 1$, то $Z = 1$.

Когда уровни всех загрязняющих веществ меньше ПДК и системы их выведения предотвращают накопление загрязняющих веществ в организме человека, состояние ЭМС считается экологически безопасным. В этом случае $P = 0$ и $\Delta R = 0$.

Аналогом величины T в ЭМС является уровень её загрязнения Z – ущерб. Тогда приращение энтропии ЭМС описывается следующим выражением:

$$dS = \frac{P \delta Z}{Z} \quad (5)$$

Полное приращение энтропии ЭМС:

$$\Delta S = P \int_{Z_1}^{Z_2} \frac{\Delta Z}{Z} dZ = P \ln \frac{Z_2}{Z_1} \quad (6)$$

Удобно отсчитывать энтропию от первоначального состояния, когда $Z_1 = 1$. Тогда

$$\Delta S = P \ln Z = \frac{m}{N} \ln [\sum_{i=1}^n K_i - (n - 1)], \quad (7)$$

где: Z – уровень загрязнения ЭМС на момент её исследования.

То есть уровень приращения энтропии ЭМС определяется как медицинской опасностью её состояния, так и логарифмом числа её состояний. Основных путей поступления загрязняющих веществ в организм человека три: через воздух, воду и пищу. Поскольку энтропия – аддитивная ве-

личина, то общее приращение энтропии ЭМС:

$$\Delta S_{\Sigma} = \sum_{i=1}^3 P_i \ln Z_i. \quad (8)$$

Отметим, что для использования формулы (8) необходимо показать идентичность законов распределения экологического риска для этих сред.

Устойчивость ЭМС при изменении эколого-медицинского риска можно охарактеризовать показателем Ляпунова, который в динамической системе с непрерывным временем определяет степень отдаления (или сближения) различных, но близких траекторий динамической системы на бесконечности [6]:

$$\lambda = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{1}{N} \ln \left| \frac{df R_n}{\alpha R_n} \right|, \quad (9)$$

где: N – количество итераций (лет).

Если $\lambda > 0$, – хаотичный режим. При $0 \leq \lambda \leq 3,57$ ЭМС находится в устойчивом состоянии. При $\lambda > 3,57$ – неустойчивый режим с окнами стабильности.

С учётом введенных понятий энтропии и эколого-медицинского риска модель устойчивости ЭМС выглядит следующим образом:

$$R_{n+1} = S(R_n - R_n^2). \quad (10)$$

В качестве текущего периода существования ЭМС примем 1 год $n=1$. Области определения энтропии и экологического риска определяются моделью Фейгенбаума ограниченного возрастания параметров ($S \in [0, 4]$, $R \in [0, 1]$). $R=0$ – абсолютно устойчивое фоновое состояние ЭМС, $R=1$ – абсолютно неустойчивое хаотическое состояние ЭМС.

Режимы развития эколого-медицинской системы

Для пролонгирования развития ЭМС на длительное время её существования необходимо оценить начальный экологический риск R_0 . Начальный экологический риск территории определяется по формуле (3) пу-

тём измерения суммарного показателя загрязнения антропогенно нагруженной территории и данных медицинской статистики. В качестве примера величина R_0 принята равной 0,1, что соответствует рангу экологической нормы при уровне энтропии территории, равной 1 (рис. 5).

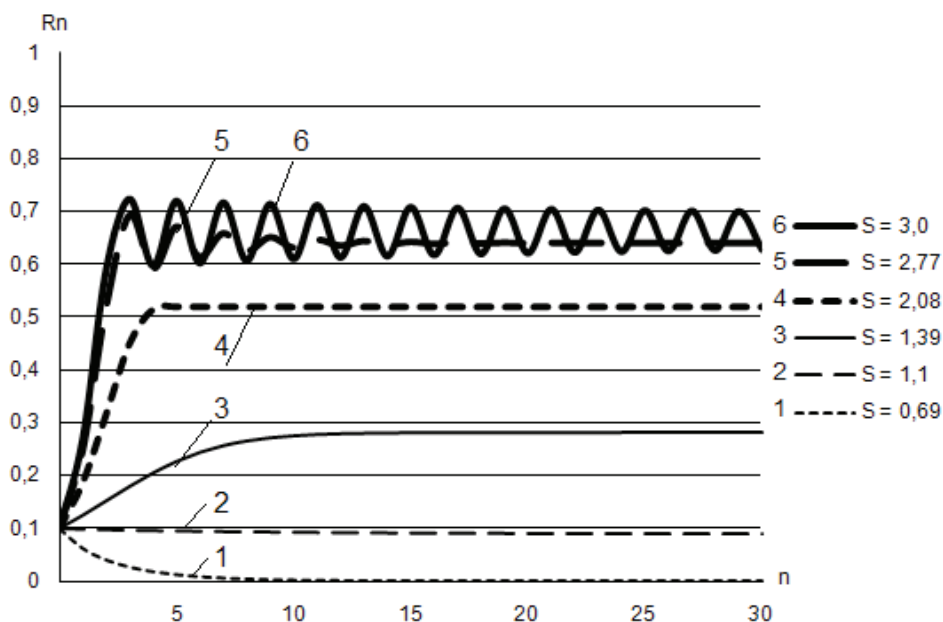


Рис. 1 / Fig. 1. Прогнозируемое развитие эколого-медицинской системы в динамическом режиме / Predicted development of the ecological and medical system in dynamic mode

Источник: составлено авторами

Авторами разработана программа в оболочке Microsoft Excel для вычисления циклического экологического риска по формуле (10) для 100 циклов ЭМС при любых значениях R_0 и S из области их существования.

На рис. 1 показано прогнозируемое развитие эколого-медицинской системы в динамическом режиме – увеличение эколого-медицинского риска за период в 30 лет, где энтропия входит как параметр.

В случае низкого уровня загрязнения окружающей среды $S \leq 0,69$. При прекращении техногенного воздействия человека ЭМС в течение 10 лет самопроизвольно возвращается в исходное фоновое состояние при $Z=1$ с нулевым экологическим риском (рис. 1, линия 1). При $0,69 \leq S \leq 1,1$ наблюдается динамическое равновесие ЭМС с сохранением её начального уровня (рис. 1, линия 2). При $1,1 < S \leq 1,39$ наблюдается медленное возрастание экологического риска с по-

следующей стабилизацией (рис. 1, линия 3). При $1,39 < S \leq 2,08$ – быстрое возрастание экологически-медицинского риска до уровня 0,52 в течение 4 лет с последующей стабилизацией уровня деградации ЭМС (рис. 1, линия 4). При $2,08 < S \leq 2,77$ экологический риск очень быстро, в течение 2 лет возрастает до уровня 0,69 и, медленно осциллируя, стабилизируется на уровне 0,63 (рис. 1, линия 5). При $2,77 < S \leq 3$ возникают его медленно затухающие осцилляции за счёт первой бифуркации, но экологический риск не превышает 0,7, а популяция ещё может существовать, используя медицинские мероприятия (рис. 1, линия 6).

При бифуркации возможны 2 исхода: ухудшение или улучшение состояния ЭМС. Бифуркация – это неустойчивое состояние ЭМС или кризис. Тот или иной выход из этого состояния

определяется общественным договором или согласием общества.

Отметим, что эколого-медицинский риск, равный 0,1, достигается при уровне энтропии $S=1,1$, числе итераций $n \geq 30$, что соответствует реальному времени интенсивного загрязнения окружающей среды Земли. Это состояние равновесного эколого-медицинского риска (рис. 1), когда возможно самовозвращение ЭМС к фоновым значениям, если не увеличивать далее загрязнение окружающей среды.

При $S=3,43$ возникает вторая бифуркация с различными возможными исходами, и дальнейшее развитие ЭМС проблематично, т. е. уровень энтропии $S=3,57$ определяет предсказуемый горизонт событий. При $3 < S \leq 3,57$ наблюдается переходный режим ЭМС, где существование популяции находится под угрозой вырождения (рис. 2, линии 7, 8).

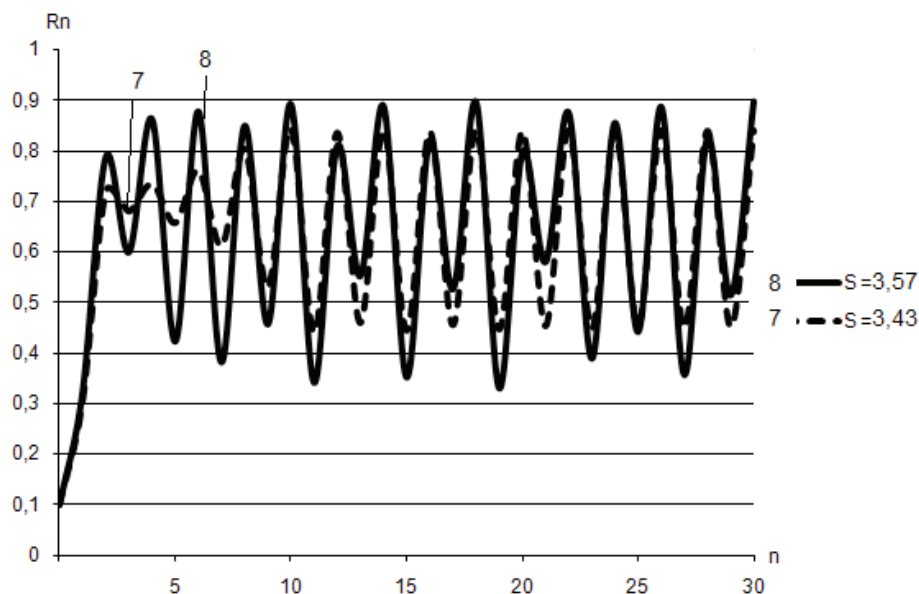


Рис. 2 / Fig. 2. Прогнозируемое развитие эколого-медицинской системы в переходном режиме / Predicted development of the ecological and medical system in the transition mode

Источник: составлено авторами

Состояние ЭМС при $S > 3,57$ характеризуется очень высоким уровнем загрязнения и преобладающим влиянием на заболеваемость населения экологически обусловленных болезней. Здесь

периоды очень высокого экологического риска чередуются с его минимальными значениями (рис. 3, линии 9, 10), т. е. возникает неустойчивый хаотический режим существования ЭМС.

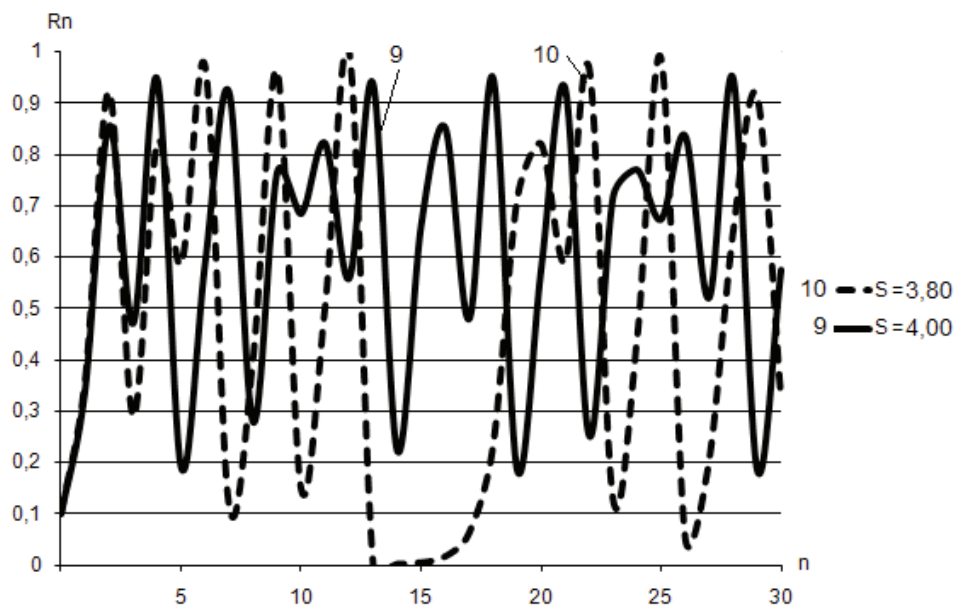


Рис. 3 / Fig. 3. Прогнозируемое развитие эколого-медицинской системы в хаотическом режиме / Predicted development of the ecological and medical system in the chaotic mode

Источник: составлено авторами

Если уровень загрязнения абиотической среды $Z=96$, то для $S=3,57$ получаем среднюю вероятность экологически обусловленных заболеваний, равную 0,76. Ориентировочно, это значит, что при 16 различных загрязняющих веществах, коэффициенты концентрации которых не менее 6, вероятность экологически обусловленных заболеваний не менее 0,76.

При $3,57 < S \leq 4$ старая популяция погибает. Но в хаотическом поведении ЭМС существует окно стабильности, когда генетически изменённая часть старой популяции породит новую.

Модель развития эколого-медицинской системы

На рис. 4 приведена модель для оценки состояния ЭМС в зависимости от её текущей энтропии. Разветвления номограммы при $S \sim 1$ и 2,9 определяются различным числом итераций $10 \leq n \leq 30$, принятых в расчёте. При $S < 2,8$ ЭМС существует в динамическом режиме, когда эколого-медицинский риск однозначно определяется её энтропией ($n \geq 30$). Первая бифуркация (кризис) возникает при $S=2,8$, а далее возникает переходный режим и вторая бифуркация, когда развитие ЭМС может также идти как с повышением эколого-меди-

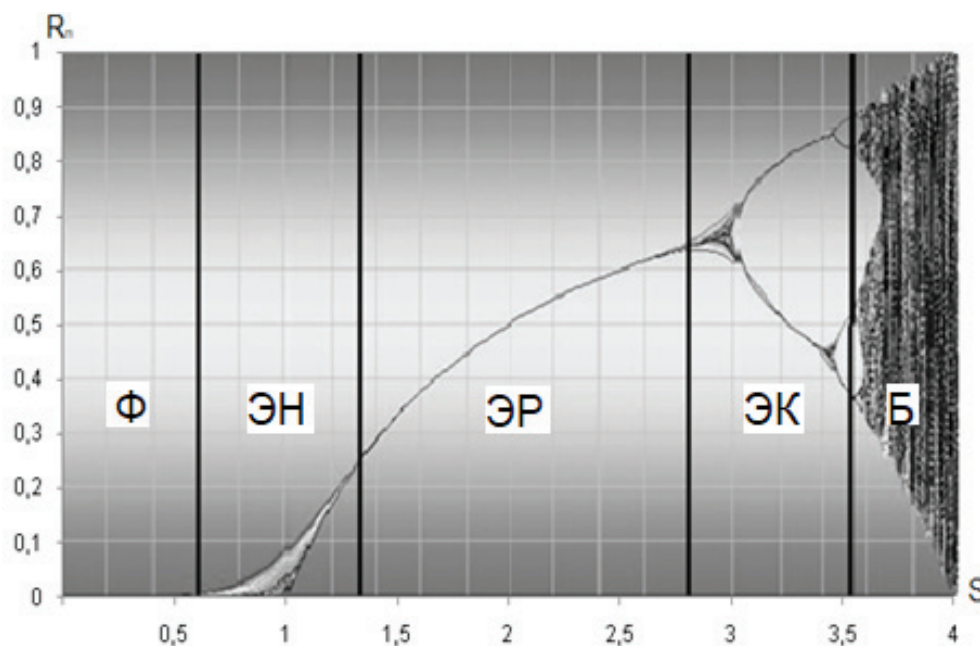


Рис. 4 / Fig. 4. Модель для оценки состояния ЭМС в зависимости от её энтропии. Ф – фоновое состояние эколого-медицинской системы, ЭН – экологическая норма, ЭР – экологический риск, ЭК – экологический кризис, Б – бедствие / Nomogram for assessing the state of EMS as a function of its entropy. Ф – background state of the ecological and medical system, ЭН – environmental standards, ЭР – environmental risk, ЭК – ecological crisis, Б – disaster

Источник: составлено авторами

цинского риска, так и с понижением. $S=2,8$ определяет горизонт предсказуемого развития ЭМС.

Из рисунка следует, что первая бифуркация возникает при $S \geq 2,8$, эколого-медицинский риск достигает уровня 0,63. При $S=3,45$ возникает вторая бифуркация с различными возможными исходами. При $S > 3,57$ – хаотическое развитие ЭМС, когда периоды очень высокого экологического риска чередуются с его минимальными значениями, но существует окно возможности зарождения новой популяции.

Выводы

1. Введены новые понятия: эколого-медицинский риск и эколого-медицинская энтропия. С их использованием

математическая модель Фейгенбаума переходит от динамического состояния системы к хаотическому. Для этого модель «оснащена» измеряемыми экологическими и медицинскими величинами. Приведено ранжирование состояний ЭМС по уровням её деградации и неустойчивости.

2. В зависимости от уровня деградации окружающей среды (её энтропии) в модели выделены 3 фундаментальных периода:

- динамический режим развития ЭМС с детерминированными связями энтропии и устойчивости ЭМС;
- переходный режим с 2-мя последующими кризисами (бифуркациями);
- хаотический режим с быстро повторяющимися кризисами, но с су-

ществованием окна возможностей зарождения новой популяции.

3. Детальные интервальные оценки, основанные на схеме: доза (загрязнение ЭМС) → среднестатистический порог (ПДК) → отклик ЭМС с учётом индивидуальных особенностей человека, позволяют выделить 5 рангов состояния ЭМС (рис. 4):

– фоновое состояние ЭМС, когда энтропия $S \leq 0,69$, а экологический риск $R=0$ (динамический режим с одним состоянием ЭМС);

– экологическая норма: $0,69 \leq S < 1,33$; $0 < R \leq 0,22$, при этом техногенное воздействие по каждому загрязняющему веществу не превышает предельно допустимого (динамический режим с малым числом близких состояний);

– экологический риск: $1,33 \leq S < 2,8$; $0,22 \leq R < 0,63$, при этом уровень техногенного воздействия превышает предельно допустимый, но системы выведения загрязняющих веществ среднестатистического человека справляются с этой нагрузкой. ЭМС находится в устойчивом динамическом равновесии, при этом число её состояний существенно увеличивается и она может принимать одно из нескольких возможных состояний (вероятностный режим с возможностью статистического прогноза);

– экологический кризис: $2,8 \leq S \leq 3,52$; $0,63 \leq R \leq 0,88$, при этом наблюдается переходный режим из устойчивого динамического состояния в неустойчивое хаотическое за счёт 2 бифуркаций, когда система в каждом цикле случайным образом выбирает путь своего развития. Здесь ещё возможна стабилизация ЭМС за счёт общественного договора, но с высоким экологическим риском;

– бедствие: $S > 3,52$; $R > 0,88$ – множественные бифуркации, при этом система находится в состоянии абсолютно хаоса, однако при $S > 3,77$ существует окно, в котором возможны выживание приспособившейся части старой популяции и рождение новой.

4. Развитая модель позволяет на базе данных, полученных опытным путём, оценить текущий уровень деградации и устойчивости ЭМС, сделать прогноз её развития. Оценены пороги состояния ЭМС, при которых она либо самовосстанавливается, либо сохраняет своё динамическое состояние, либо переходит в хаотическое состояние. То есть развитая модель позволяет прогнозировать и управлять состоянием территориальных ЭМС, что весьма актуально и для России, и на глобальном уровне.

Также существуют, по крайней мере, 3 причины актуальности исследований в области медицинской экологии и поведения общества в условиях потенциального кумулятивного роста случаев приобретённых заболеваний: 1) стремительное старение населения России и всех развитых стран подчёркивает необходимость прогнозов заболеваемости в преклонном возрасте, т. к. «пожилое» общество более уязвимо к техногенным воздействиям и в большей степени нуждается в медицинских услугах; 2) намечающийся мировой энергетический переход 2020–2030-х гг. даже в развитых странах может сопровождаться массовыми непродуманными решениями в управлении экологическим риском; 3) в разных регионах РФ входные параметры модели будут существенно отличаться, и построенная модель может стать основой для

оценки эколого-медицинского риска в каждом из них для предупреждения неблагоприятных социально-экономических явлений.

5. Наша цивилизация в целом пока ещё находится на уровне экологической нормы, когда число состояний ЭМС мало, и закон распределения этой экологической величины квазидетерминированный. Здесь при определённых усилиях человеческого со-

общества можно восстановить ЭМС до фонового уровня. Но природа возможного развития ЭМС показывает, что при резком повышении техногенной нагрузки энтропия в течение нескольких десятков лет может достичь уровня экологического риска и приблизиться к уровню необратимого экологического кризиса.

Статья поступила в редакцию 06.07.2021.

ЛИТЕРАТУРА

1. Базарский О. В., Кочетова Ж. Ю. Энтропия абиотических геосфер и модель для оценки и прогноза их состояния // Биосфера. 2021. Т. 13. № 1-2. С. 9–14.
2. Белоусов Б. П. Периодически действующая реакция и ее механизм. Автоволновые процессы в системах с диффузией. Горький: Институт прикладной физики АН СССР, 1981. 287 с.
3. Дмитриев А. Хаос, фракталы и информация // Наука и жизнь. 2001. № 5. С. 41–55.
4. Компьютеры и нелинейные явления: Информатика и современное естествознание / под ред. А. А. Самарского. М.: Наука, 1988. 192 с.
5. Кочетова Ж. Ю., Базарский О. В., Маслова Н. В. Сравнительный анализ интегральных показателей загрязнения почвогрунтов урбанизированных территорий приоритетными контаминантами // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2018. № 1 (125). С. 28–37.
6. Купцов П. В. Вычисление показателей Ляпунова для распределенных систем: преимущества и недостатки различных численных методов // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2010. Т. 18. Вып. 5. С. 93–111.
7. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. От диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации. М.: Мир, 1979. 512 с.
8. Пригожин И. Время, структура и флуктуации // Успехи физических наук. 1980. Т. 131. № 2. С. 185–207.
9. Розенберг Г. С. Информационный индекс и разнообразие: Больцман, Котельников, Шеннон, Уивер // Самарская Лука: Проблемы региональной и глобальной экологии. 2010. Т. 19. № 2. С. 4–25.
10. Трубецков Д. И. Турбулентность и детерминированный хаос // Соревновательный журнал. Физика. 1998. № 1. С. 77–83.
11. Aoki I. Entropy principle for the evolution of living systems and the universe from bacteria to the universe // Journal of the Physical Society of Japa. 2018. Vol. 8. № 1. P. 1–8.
12. Kay J. J., Schneider E. D. Embracing complexity – The challenge of the ecosystem approach // Perspectives on Ecological Integrity. 1995. Vol. 5. P. 49–59.
13. Lorenz E. N. Deterministic nonperiodic flow // Journal of the Atmospheric Sciences. 1963. Vol. 20. P. 130–141.
14. Martyushev L. M. Minimal time, Weibull distribution and maximum entropy production principle: Comment on «Redundancy principle and the role of extreme statistics in molecular and cellular biology» // Physics of Life Reviews. 2019. Vol. 28. P. 83–84.
15. Principles of Ecology Revisited: Integrating Information and Ecological Theories for a More

- Unified Science / M. I. O'Connor, M. W. Pennell, F. Altermatt, B. Matthews, C. J. Meli6n, A. Gonzalez // *Frontiers in Ecology and Evolution*. 2019. Vol. 7. P. 219.
16. Schneider E. D., Kay J. J. Complexity and thermodynamics. Towards a new ecology // *Futures*. 1994. Vol. 26. P. 626–647.
17. Schrodinger E. *What is life?* Dublin, 1943. 32 p.
18. Skene K. R. Life's a gas: A thermodynamic theory of biological evolution // *Entropy*. 2015. Vol. 17. P. 5522–5548.
19. Skene K. R. Thermodynamics, ecology and evolutionary biology: A bridge over troubled water or common ground? // *Acta Oecologica*. 2017. Vol. 85. P. 116–125.

REFERENCES

1. Bazarsky O. V., Kochetova Zh. Yu. [Entropy of abiotic geospheres and a model for estimating and predicting their state]. In: *Biosfera* [Biosphere], 2021, vol. 13, no. 1-2, pp. 9–14.
2. Belousov B. P. *Periodicheski deistvuyushchaya reaktsiya i ee mekhanizm. Avtovolnovye processy v sistemah s diffuziei* [Periodically acting reaction and its mechanism. Autowave processes in systems with diffusion]. Grekhovoi. Gorky, Institut prikladnoi fiziki AN SSSR Publ., 1981. 287 p.
3. Dmitriev A. [Chaos, fractals and information]. In: *Nauka i zhizn* [Science and Life], 2001, no. 5, pp. 41–45.
4. Samarsky A. A., ed. *Kompyutery i nelineinye yavleniya: Informatika i sovremennoe estestvoznaniye* [Computers and nonlinear phenomena: computer Science and modern natural science]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 192 p.
5. Kochetova Zh. Yu., Bazarsky O. V., Maslova N. V. [Comparative analysis of integral indicators of soil contamination of urbanized territories by priority contaminants]. In: *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kuzbass State Technical University], 2018, no. 1 (125), pp. 28–37.
6. Kupcov P. V. [Calculating Lyapunov exponents for distributed systems: advantages and disadvantages of various numerical methods]. In: *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Prikladnaya nelineinaya dinamika* [News of higher educational institutions. Applied nonlinear dynamics], 2010, vol. 18, no. 5, pp. 93–111.
7. Nikolis G., Prigozhin I. *Samoorganizatsiya v neravnovesnykh sistemah. Ot dissipativnykh struktur k uporyadochenosti cherez fluktuatsii* [Self-organization in non-equilibrium systems. From dissipative structures to ordering through fluctuations]. Moscow, Mir Publ., 1979, 512 p.
8. Prigozhin I. [Time, structure, and fluctuations]. In: *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Physics Uspekhi], 1980, vol. 131, no. 2, pp. 185–207.
9. Rozenberg G. S. [Information index and diversity: Boltzmann, Kotelnikov, Shannon, Weaver]. In: *Samarskaya Luka: Problemy regionalnoj i globalnoj ekologii* [Samara Luka: Problems of regional and global ecology], 2010, vol. 19, no. 2, pp. 4–25.
10. Trubeckov D. I. [Turbulence and deterministic chaos]. In: *Sorovskij obrazovatelnyj zhurnal. Fizika* [Sorovsky educational magazine. Physics], 1998, no. 1, pp. 77–83.
11. Aoki I. Entropy principle for the evolution of living systems and the universe from bacteria to the universe. In: *Journal of the Physical Society of Japa*, 2018, vol. 8, no. 1, pp. 1–8.
12. Kay J. J., Schneider E. D. Embracing complexity – The challenge of the ecosystem approach. In: *Perspectives on Ecological Integrity*, 1995, vol. 5, pp. 49–59.
13. Lorenz E. N. Deterministic nonperiodic flow. In: *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1963, vol. 20, pp. 130–141.
14. Martyushev L. M. Minimal time, Weibull distribution and maximum entropy production principle: Comment on «Redundancy principle and the role of extreme statistics in molecu-

- lar and cellular biology». In: *Physics of Life Reviews*, 2019, vol. 28, pp. 83–84.
15. O'Connor M. I., Pennell M. W., Altermatt F., Matthews B., Melián C. J., Gonzalez A. Principles of Ecology Revisited: Integrating Information and Ecological Theories for a More Unified Science. In: *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2019, vol. 7, p. 219.
16. Schneider E. D., Kay J. J. Complexity and thermodynamics. Towards a new ecology. In: *Futures*, 1994, vol. 26, pp. 626–647.
17. Schrodinger E. What is life? Dublin, 1943. 32 p.
18. Skene K. R. Life's a gas: A thermodynamic theory of biological evolution. In: *Entropy*, 2015, vol. 17, pp. 5522–5548.
19. Skene K. R. Thermodynamics, ecology and evolutionary biology: A bridge over troubled water or common ground? In: *Acta Oecologica*, 2017, vol. 85, pp. 116–125.
-

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Базарский Олег Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики и химии Военно-воздушной академии имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина;
e-mail: z_vaiu@mail.ru

Кочетова Жанна Юрьевна – доктор географических наук, доцент кафедры физики и химии Военно-воздушной академии имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина;
e-mail: zk_vva@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Oleg V. Bazarsky – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Prof., Department of Physics and Chemistry, N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy.
e-mail: z_vaiu@mail.ru

Zhanna Yu. Kochetova – Dr. Sci. (Geography), Assoc. Prof., Department of Physics and Chemistry, N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy;
e-mail: zk_vva@mail.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Базарский О. В., Кочетова Ж. Ю. Теория детерминированного хаоса для описания эколого-медицинской системы // Географическая среда и живые системы. 2021. № 3. С. 96–109. DOI: 10.18384/2712-7621-2021-3-96-109

FOR CITATION

Bazarsky O. V., Kochetova Zh. Yu. The theory of deterministic chaos for the description of the ecological and medical system. In: *Geographical Environment and Living Systems*, 2021, no. 3, pp. 96–109.
DOI: 10.18384/2712-7621-2021-3-96-109