

УДК 504.75: 378.4 (Университеты /Экология человека и окружающая среда)

## **ВОЗМОЖНОСТИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЭКОЛОГИИ**

© 2024 В.М. Еськов<sup>1</sup>, Н.Н. Сазонова<sup>2</sup>, М.А. Филатов<sup>3</sup>

*Еськов Валерий Матвеевич доктор физико-математических наук, доктор биологических наук,  
профессор, главный научный сотрудник, заведующий отделом биокибернетики  
E-mail: filatovmik@yandex.ru*

*Сазонова Наталья Николаевна, кандидат педагогических наук, доцент  
кафедры биологии, экологии и методики обучения  
E-mail: cheshirskaja@yandex.ru*

*Филатов Михаил Александрович, доктор биологических наук, профессор  
кафедры экологии и биофизики  
E-mail: filatovmik@yandex.ru*

<sup>1</sup>НИИ «Курчатовский институт» Сургутский филиал ФГУ «ФНЦ Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук»  
Сургут, Россия

<sup>2</sup>Самарский государственный социально-педагогический университет  
Самара, Россия

<sup>3</sup>Сургутский государственный университет  
Сургут, Россия

Статья поступила в редакцию 03.06.2024

Последние годы в педагогике многократно поднимается проблема компьютерной грамотности студентов, профиль подготовки которых не связан с математикой, физикой, техникой. При этом сложилось твердое мнение, что какие-то азы компьютерной грамотности следует все-таки давать гуманитариям и тем более биологам и экологам. Наша позиция основывается на том, что компьютерная грамотность у биологов и экологов должна базироваться на реальных (прикладных) задачах. В этой связи мы вводим элементы математического моделирования, как разделы системной экологии, в подготовку экологов. В частности, рассматриваются базовые модели Мальтуса, Лотка-Вольтерра, теории эпидемии и т. д. в виде компьютерных моделей. Студенты экологи (бакалавры, магистры, аспиранты) работают на ЭВМ с целью моделирования и прогнозирования динамики популяционного взрыва, одновидовой модели с обратной связью, двухвидовой модели и т. д. Решаются задачи оптимального проведения противоэпизоотических мероприятий. Студенты изучают на ЭВМ эффективные методы управления популяциями. Одновременно они изучают азы программирования в Basic для реализации моделей динамических популяций. В итоге возникает компьютерная грамотность будущих экологов.

*Ключевые слова:* экология, модели, ЭВМ, прогноз динамики, управление экосистемами

DOI: 10.37313/2413-9645-2024-26-96-20-25

EDN: FYUVPZ

*Введение.* В структуре реформирования высшей образовательной системы всегда фигурировала проблема компьютерной подготовки студентов и аспирантов. Поскольку для математиков, физиков, будущих специалистов в области промышленного производства эта проблема всегда решалась, то остаются гуманитарии, биологи и химики. Нужны ли экологам азы ЭВМ?

Сейчас вполне очевидно, что просто преподавать языки программирования или принципы работы ЭВМ не имеет смысла даже для биологов и химиков. Для этих будущих специалистов ЭВМ и

все, что с ней связано, имеет исключительно прикладной характер. Иными словами, проблема мотивации остается открытой, особенно для биологов и экологов. Биолог, химик, эколог не понимают для чего им знания об ЭВМ, их устройстве, принципах программирования. В этой связи мы разработали курс системной экологии, к которому прилагаются программы ЭВМ и который представляет модели экосистем и отдельных популяций.

Какие это программы ЭВМ, для чего они нужны экологу, как с ними работать? Кратко

представляем ответы в настоящей статье. При этом особо подчеркивается именно прикладной характер разработанного нами курса системной экологии (на базе ЭВМ).

*Методы исследования.* Используются уже существующие модели различных популяционных процессов. На базе этих моделей даны программы ЭВМ (на языке Basic). В среде этого языка запускаются указанные программы на ЭВМ и дается прогноз поведения экосистемы, их динамика. Используется метод Эйлера для расчета моделей. В частности, рассмотрены модели Мальтуса, Ферхюльста-Пирла, Лотка-Вольтерра, модели эпидемий.

*История вопроса.* Первая модель экопроцесса появилась в конце XVIII в. в виде модели Мальтуса. Это была модель популяционного взрыва. В начале XIX в. появилась модель Ферхюльста-Пирла. В данной концепции впервые внедрена обратная связь для регулирования численности популяции. В последующие десятилетия XX в. была удостоена Нобелевской премии за двухвидовую модель, именуемую моделью "хищник-жертва".

В конце XX в. была построена математическая теория распространения заболеваний в популяциях. Были решены задачи оптимальной борьбы с эпидемией и эпизоотией. Решена проблема устойчивости экосистем к распространению инфекционных болезней. Последние годы активно развивается компартментно-кластерная теория экосистем (ККТЭ). В рамках этой ККТЭ решаются задачи устойчивости экосистем, проблемы их развития, изучаются эффекты действия внешних факторов на популяции животных и растений [2, 5, 6].

Эта модель хорошо описывает популяционный взрыв. В этой модели  $a$  – биотический потенциал или скорость прироста численности популяции  $x(t)$ . Величина  $dx/dt$  (производная от  $x(t)$ ) представляет скорость такого прироста. Рассмотрим эту модель более подробно в рамках разностной модели.

Если использовать формулу (2), то легко получить рекуррентное соотношение вида:  $dx \approx x(N+1) - x(N) = a * x(N) * dt$ . Здесь символ  $*$  обозначает умножение. Далее легко получить ядро

В целом, математическое моделирование в экологии прошло долгий путь своего развития от конца XVIII в. и до наших дней. Особое значение уделялось двухвидовым и многовидовым экосистемам, проблемам их устойчивости (на моделях и в реалии). Очевидно, что все это составляет большой и важный раздел всей экологии. Однако, сами экологи относятся к системной экологии весьма пренебрежительно. При этом системная экология (СЭ) составляет фундамент всей экологии. Без СЭ невозможно изучение экологии, т.к. сама экология оперирует только с системами [2, 3, 6, 8].

*Результаты исследований.* Следует еще раз напомнить, что экология – это весьма быстро развивающаяся и новая наука. При этом она изучает только системы (популяции, биоценозы и т.д.) И поэтому без системного подхода экология просто не может существовать. В этой связи базовый ее раздел – это системная экология (с ее моделями). Отметим, что биология, зоология может изучать даже один экземпляр вида. Однако, в экологии это совершенно невозможно (популяция – это система!).

Очевидно, что без знания теории систем и системной экологии сама экология просто немыслима. Напомним, что первая модель динамики популяций возникла в конце XVIII-го века. Это была модель Мальтуса, которая описывала динамику популяционного взрыва.

Фактически, это была модель неограниченного роста численности популяции  $x = x(t)$  в виде простейшего дифференциального уравнения вида:

$$dx / dt = ax \quad (1)$$

Всегда дифференциал  $x(t)$ , т.е.  $dx$ , можно представить как разность между новым значением численности  $x(N+1)$  и старым значением  $x(N)$ . Иными словами, прирост численности популяции за малый интервал времени  $dt$  будет иметь вид:

$$dx \approx x(N+1) - x(N) \quad (2)$$

уравнения (1) для точного расчета численности  $x(N+1)$  и модели (1).

Действительно имеем:

$$x(N+1) = x(N) + a * x(N) * dt \quad (3)$$

Это уравнение (3) является рекуррентной формулой для расчета любого значения  $x(N+1)$  при пошаговых расчетах на ЭВМ. Сама программа ЭВМ для такого расчета примет вид (язык Basic):

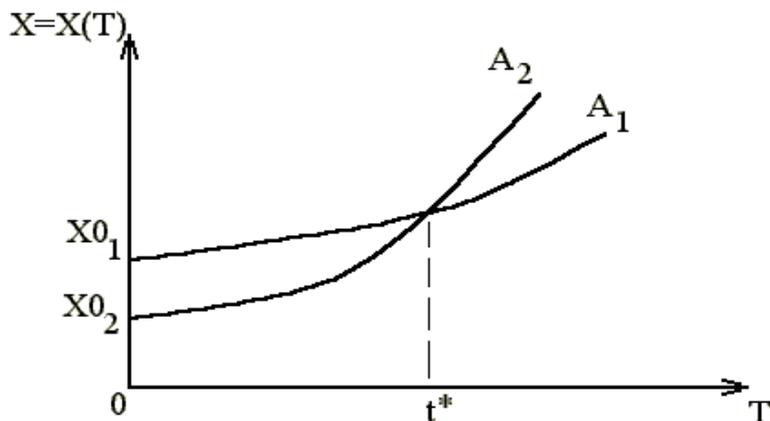
```
10 CLS: SCREEN 9, 1, 0
20 INPUT «K=», K: INPUT «DT=», DT: INPUT
«NO=», NO: INPUT «C=», C: INPUT «T=», T
30 NS = (NO ^ 2 / C + 1 / T) * DT
40 FOR I = 2 TO K
50 NN = NS + (NO ^ 2 / C + 1 / T) * DT
60 X = I * dt + 50: Y = 300 - NN
70 PSET (X, Y), 14
80 LET NS = NN
90 NEXT I
```

```
100 LINE (50, 300)-(500, 300), 12: LINE (50, 300)-
(50, 20), 12
110 LOCATE 22, 8: PRINT «time year»
120 END
```

Где,  $K$  – параметр цикла;  $DT$  – временной интервал;  $N$  – численность;  $C$  – системная постоянная.

Из этой программы легко увидеть, что ЭВМ не только считает численность популяции (пошагово с шагом  $dt$ ), но и строит график зависимости  $x = x(t)$  в прямоугольной системе координат. Студенту предлагается набрать эту программу и смоделировать  $x(t)$ . На рис. 1. дан график модели (1), в которой можно изменить величину  $a$  и наблюдать динамику  $x(t)$ .

Рис. 1. Модель популяционного взрыва (Population explosion model)



Подчеркнем, что это будет одновидовая модель популяционного взрыва, которую предложил Мальтус в конце 18-го века. Имеется еще одна одновидовая модель численности

популяции с лимитированием. В этом случае мы имеем обратную связь в виде элемента  $-bx$  в правой части модели вида:

$$dx / dt = (a - bx)x \quad (4)$$

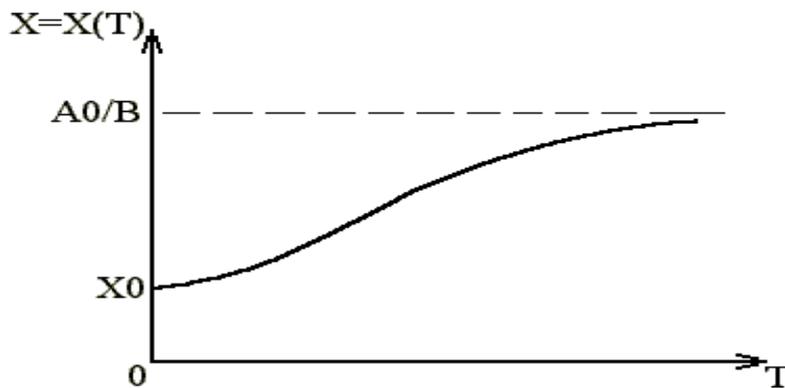
Легко видеть, если нет обратной связи, то мы имеем модель Мальтуса ( $b = 0$  и (4) переходит в (1)). Однако, модель (4) уже не имеет неограниченный рост (как в модели (1), где  $x(t) = x_0 \exp(at)$ ). Модель (4) представляет лимитирование и легко найти ее предел.

Для этого мы задаем нулевую скорость прироста численности  $x(t)$ , т.е. получим  $dx / dt = 0$ . В этом случае  $(a - bx)x = 0$  и легко найти это предельное число  $x^*$ . Действительно, мы получим 0, если  $x = 0$  (это не интересно) или при  $a - bx^* = 0$ , второй сомножитель. Очевидно, что  $x^*$  это асимптота, что представлено на рис. 2.

В этом случае  $x = x^* = a / b$ , т.е. это и есть предельное значение численности популяции (это максимум для  $x = x^*$ ). В этом случае популяция достигает своего максимального значения и дальше уже не растет. В уравнении (4) мы можем найти решение задачи оптимального сбора урожая ( $dx / dt = \max$ ).

В этом случае мы получим максимальный прирост самой скорости прироста численности, т.е.  $d(dx / dt) / dx = 0$ . В математике это называется точкой перегиба. В этой точке тоже скорость продукции популяции будет максимальной. Найдем ее.

Рис. 2. Модель динамики популяции с лимитированием  
(Population dynamics model with limitation)



Для этого возьмем производную по  $x$  от выражения  $(a - bx)x = 0$ . Очевидно, что такая производная дает  $a - 2bx_m = 0$ . Откуда  $x_m = a / 2b$ . Это точка на графике  $x = x(t)$ , который представлен на рис. 2. В этой точке скорость прироста  $dx / dt$  будет максимальной, а затем прирост падает

Программа расчета  $x(t)$  для модели (4) имеет вид:

```
10 CLS: SCREEN 12
20 INPUT «K=», K: INPUT «DT=», DT: INPUT
«T1=», T1: INPUT «C=», C: INPUT «T=», T: 30 INPUT
«M=», M
40 NS = C / ((T1 - T) ^ 2 + M^2) * DT
50 FOR I = 2 TO K
60 NN = NS + C / ((T1 - T) ^ 2 + M^2) * DT
70 T = I * DT + 10: Y = 330 - NN
```

```
80 PSET (T, Y), 14
90 LET NS = NN
100 NEXT I
110 LINE (50, 300)-(500, 300), 12: LINE (50, 300)-
(50, 20), 12
120 LOCATE 22, 8: PRINT «time year»
130 END
```

Где,  $K$  – параметр цикла;  $DT$  – временной интервал;  $N$  – численность;  $C$  – системная постоянная;  $T_1$  – опорное значение времени (момент времени).

Обычно в природе различные виды взаимодействуют друг с другом. Одна из таких моделей была достаточно хорошо изучена математиками Лотка и Вольтерра. Это модель «хищник-жертва» вида:

$$\begin{aligned} dx_1 / dt &= (a_1 - b_2 x_2) x_1 \\ dx_2 / dt &= (-a_2 + b_2 x_1) x_2 \end{aligned} \quad (5)$$

В этой модели  $x_1 = x_1(t)$  представляет численность жертвы, которую поедает хищник со скоростью  $-b_1 x_2$ . Численность хищника  $x_2 = x_2(t)$  убывает

со скоростью  $-a_2$ , но увеличивается за счет жертвы со скоростью  $+b_2 x_1$ .

Очевидно, что это уже двухвидовая модель и ее рекуррентная формула имеет вид:

$$\begin{aligned} x_1(N+1) &= x_1(N) + [(a_1 - b_1 * x_2(N)) * x_1(N)] * dt \\ x_2(N+1) &= x_2(N) + [(-a_2 + b_2 * x_1(N)) * x_2(N)] * dt \end{aligned} \quad (6)$$

Отметим, что в этой модели можно строить и фазовые портреты этой модели в координатах  $x_1$  и  $x_2$ . В этих портретах отсутствуют координаты времени. Фазовые траектории модели (6) имеют вид замкнутых линий.

В рамках такого подхода можно моделировать эпизоотии, например, в виде модели распространения заболеваний в одновидовой популяции вида:

$$\begin{aligned} dx / dt &= ax - bxy + c_2 y \\ dy / dt &= bxy - c_1 y \end{aligned} \quad (7)$$

В модели (7)  $x(t)$  – это численность здоровых экземпляров, а  $y(t)$  – численность заболевших. Последние могут выздоравливать и возвращаться

в  $x_1(t)$  со скоростью  $+c_2 y$ . Модель (7) это одновидовая модель.

Существуют компартментно-кластерные модели, которые описывают целые экосистемы (много взаимодействующих видов). Простейшая

трехвидовая модель имеет вид системы трех дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} dx_1 / dt &= a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 \\ dx_2 / dt &= b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 \\ dx_3 / dt &= c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 \end{aligned} \quad (8)$$

В таких моделях могут быть обратные связи и нелинейные члены, что описывается в общем виде в матричной форме:

$$\begin{aligned} dx/dt &= A(y)x - bx \\ y &= F(x) \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь уже  $x$  – это вектор состояния экосистемы,  $y = y(t)$  некоторая функция ограничения (например, по трофике).

*Выводы.* Компьютерная грамотность экологов должна иметь высокую мотивацию для познания и обучения. В этой связи был разработан курс системной экологии. Его краткую основу мы представили в настоящем исследовании.

В этом курсе системной экологии мы подробно рассматриваем азы моделирования од-

но-, двух- и многовидовых экосистем. Обсуждаются задачи оптимального сбора урожая, а также дается введение в теорию эпидемии и многовидовые компартментно-кластерные модели. Важно отметить, что все эти модели с помощью метода Эйлера переводятся в разностные модели. Ядро таких моделей входит уже в программу на ЭВМ, которая позволяет описывать динамику популяций и экосистем.

1. Еськов, В. В. Математическое моделирование гомеостаза и эволюции complexity: монография. – Тула: Издательство ТулГУ, 2016. – 307 с.
2. Еськов, В. В., Газя, Г. В., Коннов, П. Е. Фундаментальные проблемы биокibernетики из-за неустойчивости выборок биосистем // Успехи кибернетики. – 2022. – 3(4). – С. 110-122.
3. Еськов, В. В., Газя, Г. В., Кухарева, А. Ю. Потеря однородности группы – вторая «великая» проблема биомедицины // Успехи кибернетики. – 2023. – 4(2). – С. 78-84.
4. Еськов, В. М. Два подхода в познании природы человека // Сложность. Разум. Постнеклассика. – 2023. – №1. – С. 64-74.
5. Заславский, Б. Г., Филатов, М. А., Еськов, В. В., Манина, Е. А. Проблема нестационарности в физике и биофизике. // Успехи кибернетики. – 2020. – Т. 1. – №2. – С. 61-67.
6. Розенберг, Г. С. Порядок-хаос, асимптотика-синергетика, классика-постнеклассика: взгляд эколога // Сложность. Разум. Постнеклассика. – 2023. – №1. – С. 5-17.
7. Хадарцева, К. А., Филатова, О. Е. Новое понимание стационарных режимов биологических систем. // Успехи кибернетики. – 2022. – 3(3). – С. 92-101.
8. Eskov, V. V. Modeling of biosystems from the stand point of «complexity» by W. Weaver and «fuzziness» by L.A. Zadeh // Journal of Physics Conference Series. – 2021. – Vol. 1889(5). – P. 052020 DOI:10.1088/1742-6596/1889/5/052020
9. Eskov, V. V., Manina, E. A., Filatov, M. A., Gavrilenko, T. V. Living systems' chaos: the problem of reduction in physics and biology // AIP Conference Proceedings 2647, 070031 (2022). – URL: <https://doi.org/10.1063/5.0106816>
10. Filatov M. A., Poluhin V. V., Shakirova L. S. Identifying objective differences between voluntary and involuntary motion in biomechanics. // Human. Sport. Medicine. – 2021. – Vol. 21 (1). – P. 145-149.

## COMPUTER MODELING CAPABILITIES IN ECOLOGY

© 2024 V.M. Yeskov<sup>1</sup>, N.N. Sazonova<sup>2</sup>, M.A. Filatov<sup>3</sup>

*Valery M. Eskov Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Doctor of Biological Sciences,  
Professor, Chief Researcher, Head of the Department of Biocybernetics*

*E-mail: filatovmik@yandex.ru*

*Natalia N. Sazonova, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department*

of Biology, Ecology and Teaching Methods.

E-mail: [cheshirskaja@yandex.ru](mailto:cheshirskaja@yandex.ru)

Mikhail A. Filatov, Doctor of Biological Sciences, Professor

E-mail: [filatovmik@yandex.ru](mailto:filatovmik@yandex.ru)

<sup>1</sup>NRC Federal Research Center Scientific Research Institute for System Research of the Russian Academy of Sciences”, Separate Subdivision of the Federal Scientific Center NIISI RAS

Surgut, Russia

<sup>2</sup>Samara State University of Social Sciences and Education

Samara, Russia

<sup>3</sup>Surgut State University

Surgut, Russia

In recent years, pedagogy has repeatedly raised the problem of computer literacy of students whose training profile is not related to mathematics, physics, and technology. In this case, there is a strong opinion that some basics of computer literacy should still be given to humanities students, and even more so to biologists and ecologists. Our position is based on the fact that computer literacy in biologists and ecologists should be based on real (applied) tasks. In this regard, we introduce elements of mathematical modeling, as sections of systems ecology, into the training of ecologists. In particular, the basic models of Malthus, Lotka-Volterra, epidemic theory, etc. are considered in the form of computer models. Ecology students (bachelors, masters, graduate students) work on computers to model and predict the dynamics of population explosion, single-species model with feedback, two-species model, etc. Problems of optimal implementation of anti-epizootic measures are solved. Students study effective methods of population management on the computer. At the same time, they learn the basics of Basic programming to realize dynamic population models. As a result, future ecologists become computer literate.

*Key words:* ecology, models, computer, dynamics forecast, ecosystem management

DOI: 10.37313/2413-9645-2024-26-96-20-25

EDN: FYUVPZ

1. Eskov, V. V. Matematicheskoe modelirovanie gomeostaza i evoliutsii complexity (Mathematical modeling of homeostasis and evolution of complexity) Mathematical modeling of homeostasis and evolution of complexity: monografiia. – Tula: Izdatel'stvo TulGU, 2016. – 307 s.
2. Eskov, V. V., Gazia, G. V., Konnov, P. E. Fundamental'nye problemy biokibernetiki iz-za neustoichivosti vyborok biosystem (Fundamental problems of biocybernetics due to instability of biosystem sampling) Fundamental problems of biocybernetics due to instability of biosystem sampling // Uspekhi kibernetiki. – 2022. – 3(4). – S. 110-122.
3. Eskov, V. V., Gazia, G. V., Kukhareva, A. Iu. Poteria odnorodnosti gruppy – vtoraiia «velikaia» problema biomeditsiny (Loss of group homogeneity – the second «great» problem of biomedicine) Loss of group homogeneity - the second «great» problem of biomedicine // Uspekhi kibernetiki. – 2023. – 4(2). – S. 78-84.
4. Eskov, V. M. Dva podkhoda v poznanii prirody cheloveka (Two approaches in cognition of human nature) // Slozhnost'. Razum. Postneklassika. – 2023. – №1. – S. 64-74.
5. Zaslavskii, B. G., Filatov, M. A., Es'kov, V. V., Manina, E. A. Problema nestatsionarnosti v fizike i biofizike (Problem of nonstationarity in physics and biophysics) // Uspekhi kibernetiki. – 2020. – T.1. – №2. – S. 61-67.
6. Rozenberg, G. S. Poriadok-khaos, asimptotika-sinergetika, klassika-postneklassika: vzgliad ekologa (Order-chaos, asymptotics- synergetics, classics-postnonclassics: an ecologist's view) // Slozhnost'. Razum. Postneklassika. – 2023. – №1. – S. 5-17.
7. Khadartseva, K. A., Filatova, O. E. Novoe ponimanie statsionarnykh rezhimov biologicheskikh system (New understanding of stationary modes of biological systems) // Uspekhi kibernetiki. – 2022. – 3(3). – Str. 92-101.
8. Eskov, V. V. Modeling of biosystems from the stand point of «complexity» by W. Weaver and «fuzziness» by L.A. Zadeh // Journal of Physics Conference Series. – 2021. – Vol. 1889(5). – P. 052020 DOI:10.1088/1742-6596/1889/5/052020
9. Eskov, V. V., Manina, E. A., Filatov, M. A., Gavrilenko, T. V. Living systems' chaos: the problem of reduction in physics and biology // AIP Conference Proceedings 2647, 070031 (2022). – URL: <https://doi.org/10.1063/5.0106816>
10. Filatov, M. A., Poluhin, V. V., Shakirova, L. S. Identifying objective differences between voluntary and involuntary motion in biomechanics. // Human. Sport. Medicine. – 2021. – Vol. 21 (1). – P. 145-149.