



# OSTIS-2016

(Open Semantic Technologies for Intelligent Systems)

УДК 519.876.5

## МЕТОДИКА И ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО АНАЛИЗА СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Бурак Т.И., Лукашевич М.М.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
г. Минск, Республика Беларусь*

**timburik@gmail.com**

**lukashevich@bsuir.by**

Приведена методика компьютерного моделирования сложных динамических систем на основе системного подхода Дж. Форрестера. Представлено краткое описание и характеристика программного средства моделирования динамических систем.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, системный подход, динамические системы.

### Введение

Одной из важнейших научных проблем естествознания является решение задачи предсказания поведения изучаемого объекта (сложной системы) во времени и пространстве на основе определенных знаний о его начальном состоянии и характере влияния внешних факторов. Современный этап развития методов математического моделирования в эколого-биологической области во многом связан с развитием вычислительной техники и возможностью детализации свойств моделируемого объекта, т.е. открыта перспектива построения подробных имитационных моделей [Sarancha и др., 2012].

### 1. Системный подход Дж. Форрестера

В большинстве прикладных задач требуется работать со сложными динамическими системами, и в этом случае функционала типовых схем оказывается недостаточно. Один из подходов к моделированию динамических систем описан в работах Дж. Форрестера [Forrester, 2006]. Этот подход объединяет в себе черты типовых схем и является интуитивно-понятным и гибким инструментом при моделировании сложных динамических систем. Основная идея системного подхода заключается в том, что модель описывается как совокупность некоторых существенных для процесса моделирования характеристик, а изменение этих характеристик обуславливаются петлями обратных связей. Петля обратной связи – это замкнутая цепочка взаимодействия, которую можно описать следующим образом: изменение

характеристики системы влечет за собой изменение окружающих условий (других характеристик), что в свою очередь вызывает дальнейшее изменение самой характеристики. Такой подход позволяет наиболее точно отразить процессы, происходящие внутри сложной динамической системы. Для описания системы с петлями обратных связей используются два вида переменных: уровни и темпы. Уровень  $L$  – это численное представление некоторой существенной для моделирования характеристики системы. Темп  $D_L$  описывает изменение некоторого уровня  $L$  в процессе моделирования. В общем случае изменение уровней описывается формулой 1:

$$L(t_{i+1}) = L(t_i) + \Delta t \cdot \sum_{j=1}^N D_{L_j}(IL_D(t_i)). \quad (1)$$

где  $\Delta t$  – промежуток времени между двумя итерациями моделирования;

$D_{L_j}$  – темпы, относящиеся к уровню  $L$ ;

$N$  – количество темпов для уровня  $L$ ;

$IL_D = \{L_0, \dots, L_m\}$  – некоторый набор уровней системы, которые влияют на изменение уровня  $L$ . Здесь и далее будем считать, что  $t_0, \dots, t_i, t_{i+1}, \dots, t_n$  – дискретные моменты времени, соответствующие итерациям моделирования ( $i$  – номер итерации), и  $t_i - t_{i+1} = \Delta t \forall i \in [1, n]$ . Если взять  $\Delta t$  достаточно малым и учесть, что  $t_{i+1} = t_i + \Delta t$ , получим следующее уравнение (формула 2):

$$\frac{L(t_{i+1}) - L(t_i)}{\Delta t} = \frac{\Delta L}{\Delta t} \approx L' = \sum_{j=1}^N D_{L_j}(IL_D(t_i)) \quad (2)$$

Формула 1 есть ни что иное, как метод Эйлера – простейший численный метод решения дифференциальных уравнений первого порядка точности. Для повышения точности вычислений в описываемой методике используется многошаговые метод Адамса-Башфорта [Hairer, 1993]. Введем следующее обозначение:

$$f_L(t_i) = \sum_{j=1}^N D_{L_j}(IL_D(t_i)). \quad (3)$$

Тогда метод Эйлера из формулы 1 преобразуется в формулу 4. Метод Эйлера совпадает с методом Адамса-Башфорта первого порядка, методы Адамса-Башфорта второго, третьего и четвертого порядков приведены в формулах 5-7 соответственно.

$$L(t_{i+1}) = L(t_i) + \Delta t \cdot f_L(t_i). \quad (4)$$

$$L(t_{i+1}) = L(t_i) + \Delta t \cdot \left( \frac{3}{2} f_L(t_i) - \frac{1}{2} f_L(t_{i-1}) \right). \quad (5)$$

$$L(t_{i+1}) = L(t_i) + \Delta t \cdot \left( \frac{23}{12} f_L(t_i) - \frac{4}{3} f_L(t_{i-1}) + \frac{5}{12} f_L(t_{i-2}) \right). \quad (6)$$

$$L(t_{i+1}) = L(t_i) + \Delta t \cdot \left( \frac{55}{24} f_L(t_i) - \frac{59}{24} f_L(t_{i-1}) + \frac{37}{24} f_L(t_{i-2}) - \frac{3}{8} f_L(t_{i-3}) \right). \quad (7)$$

Так как вычисление значений уровней модели идет последовательно, то использование методов Адамса-Башфорта не несет в себе дополнительных вычислительных нагрузок – предыдущие несколько значений  $f_L(t)$  для каждого уровня сохраняются в буфере для использования в дальнейших вычислениях.

Таким образом, модель может быть представлена в виде D-схемы как система дифференциальных уравнений. В зависимости от того, используют ли темпы  $D_L$  вероятностную составляющую при описании законов изменения уровней  $L$ , подход Дж. Форрестера может быть использован для описания как детерминированных, так и стохастических моделей. Для описания уровня  $L$  системы достаточно указать начальное значение уровня  $L(t_0)$ , а также набор темпов  $D_{L_i}$ , которые будут отвечать за изменение уровня в процессе моделирования. Такой подход к описанию уровней даёт возможность введения дополнительного класса переменных – констант. Константой называется уровень, для которого не определено ни одного темпа, то есть значение такого уровня не изменяется в процессе моделирования. Для упрощения описания темпов и получения дополнительной информации о модели введем временные переменные  $Tmp$ . Временные

переменные представляют собой промежуточные результаты вычислений, которые используются при расчетах темпов. Также при выводе результатов моделирования временные переменные могут использоваться как дополнительные показатели состояния модели. При описании модели временные переменные задаются как функциональные зависимости от уровней и других временных переменных (формула 8):

$$Tmp(t_i) = f(IL(t_i), IT(t_i)). \quad (8)$$

где  $IL = \{L_0, \dots, L_m\}$  – некоторый набор уровней системы, от которых зависит значение данной временной переменной;

$IT = \{Tmp_0, \dots, Tmp_k\}$  – некоторый набор временных переменных, от которых зависит значение данной временной переменной.

Так как экобиологические системы являются комплексными и состоят из множества взаимодействующих компонент, необходимо предусмотреть возможность разбиения большой системы на составляющие подсистемы меньшего размера, что упростит процесс описания модели и обеспечит её иерархическую структуру. Для этого введем понятие объекта модели. Объект  $Obj$  – это структурный элемент модели, который является условным обозначением компонент системы. Каждый объект представляет собой подмодель, компоненты которой также могут взаимодействовать с компонентами других подмоделей. Разбиение сложных систем на отдельные компоненты значительно упрощает процесс описания модели. Иерархическая структура модели представлена на рисунке 1.

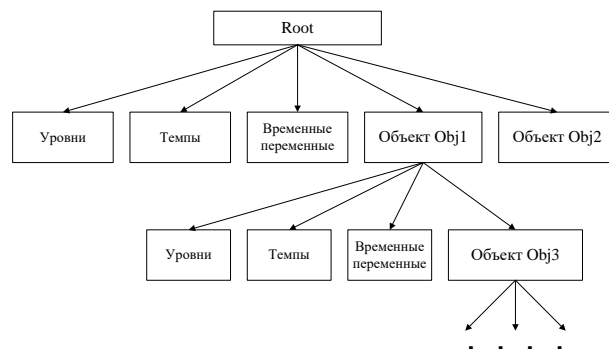


Рисунок 1 – Иерархическая структура модели

## 2. Программное средство моделирования сложных динамических систем

Подход, предложенный Дж. Форрестером, был реализован в виде программного средства моделирования сложных эколого-биологических систем, в рамках белорусско-российского проекта «Методы и программные средства компьютерного моделирования сложных динамических систем (экологических, биологических)» поддерживаемого Республиканским фондом фундаментальных исследований (№Ф14Р-042 от 23.05.2014 г.).

Научная идея проекта состоит в создании инструментария для количественного обоснования гипотез о ведущих механизмах изучаемых экологических процессов, опираясь на всю палитру известных математических и биофизических методов. При этом использованы современные компьютерные технологии для поддержки междисциплинарных исследований, позволяющих при создании математических моделей эколого-биологических объектов использовать знания экспертов – биологов. Такой подход позволяет описывать изучаемый объект в «пространстве и во времени», как целиком, так и на уровне индивидов, что позволит значительно повысить адекватность моделируемых процессов. Научная новизна проекта заключается в разработке новых математических моделей и алгоритмического аппарата функционирования динамических систем (в том числе эколого-биологических) и разработке на их основе программного средства моделирования для междисциплинарных исследований в области эко-биологического прогнозирования и регулирования.

Разработан программный интерфейс библиотеки, созданной для демонстрации работы алгоритма моделирования. Программное средство, предоставляющее данный интерфейс пользователю, реализовано в виде динамической библиотеки на языке C#. Программное средство доступно по следующей гиперссылке <http://modeling-timburik.rhcloud.com>.

Структурная схема реализованного программного средства представлена на рисунке 2. Программное средство реализовано в виде клиент-серверного приложения. Серверная часть реализована в виде сервера для Apache Tomcat Server. Клиентская часть реализована на языке JavaScript с использованием визуального языка программирования Google Blockly для описания формул и библиотеки JointJS для отображения и навигации по иерархической структуре модели. Клиент и сервер обмениваются сообщениями в формате JSON.

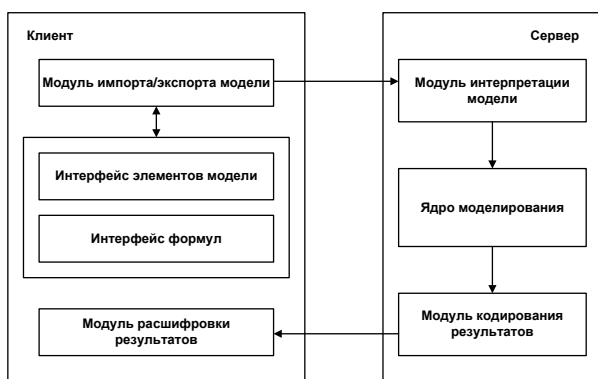


Рисунок 2 – Структурная схема программного средства

Апробация разработанного ПС выполнена на достоверных моделях эко-биологических систем. На рисунках 3 и 4 приведены примеры описания отдельных элементов имитационной модели тундрового сообщества «растительность-лемминги-песцы» [Глушков и др., 2013] с использованием реализованного ПС.

песцы» [Глушков и др., 2013] с использованием реализованного ПС.

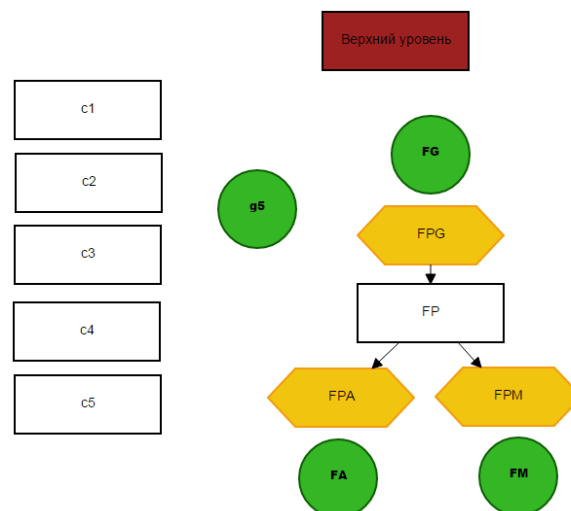


Рисунок 3 – Описание объекта «Песцы»

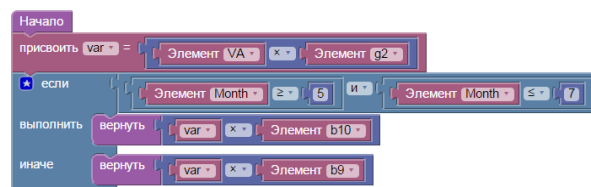


Рисунок 4 – Пример описании переменной

### 3. Апробация методики и программного средства

В результате программной реализации данной имитационной модели сообщества «растительность-лемминги-песцы» получены результаты моделирования, которые подтверждают гипотезу о ведущих механизмах функционирования рассматриваемого эколого-биологического объекта [Трапеев и др., 2014], рисунки 5-7.

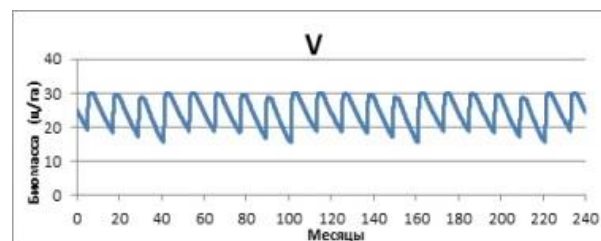


Рисунок 5 – Уровень растительности

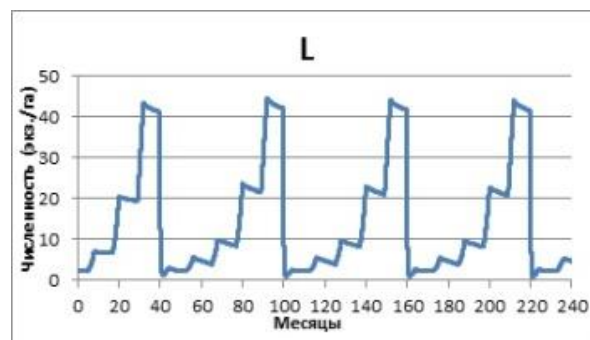


Рисунок 6 – Численность леммингов

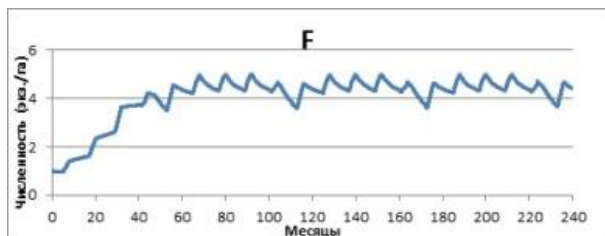


Рисунок 7 – Численность песцов

## Заклучение

Предложенная методика является основой для создания систем динамического моделирования. Разработан программный инструмент для обоснования гипотез о ведущих механизмах функционирования различных сложных динамических систем. Разработанная методика отличается от известных тем, что в ее основу положены работы Дж. Форрестера в области моделирования сложных динамических систем. Работа выполнена в рамках гранта фонда фундаментальных исследований «Методы и программные средства компьютерного моделирования сложных динамических систем (экологических, биологических)» (№Ф14Р-042 от 23.05.2014 г.).

## Библиографический список

- [Sarancha и др., 2012] Sarancha, D. A., Lyulyakin, O. P., Trashcheev R. V. Interaction of simulation and analytic methods in modelling of ecological and biological objects. / D. A. Sarancha, O. P. Lyulyakin, R. V. Trashcheev // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling.- 2012, Vol. 27, No. 5, pp. 479–492.
- [Глушков и др., 2013] В.Н. Глушков, Д.А. Саранча. Комплексный метод математического моделирования биологических объектов. Моделирование тундрового сообщества. Автоматика и телемеханика, 2013, № 2, стр. 94 -108.
- [Форрестер, 2006] Форрестер, Д. Мировая динамика. - М.: АСТ, 2006. - С. 384.
- [Колесов, 2012] Колесов, Ю. Б. Компонентные технологии математического моделирования: учеб. пособие / Ю. Б. Колесов, Ю. Б. Сениченков. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 223 с.
- [Советов и др., 2001] Советов Б. Я., Яковлев С. А., Моделирование систем: Учеб. для вузов — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 2001. — 343 с.
- [Самарский и др., 1997] Самарский А. А., Михайлов А. П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. — М.: Наука, 1997. — 320 с.
- [Forrester, 2006] Forrester, Jay W. Principles of Systems. (2nd ed.). — MA: Pegasus Communications, Waltham, 2006. — P. 391.
- [Hairer, 1993] Hairer E., Norsett S.P. & Wanner G. Solving ordinary differential equations I: Nostiff problems. (2nd ed.). — Berlin: Springer Verlag, 1993. — P. 391.
- [Тращев и др., 2014] Тращев Р.В., Люлякин О.П., Саранча Д.А., Юрезанская Ю.С. Метод комплексных исследований на примере моделирования популяций леммингов — М.: ВЦ РАН, 2014. — 115 с.

## METHODOLOGY AND SOFTWARE FOR SEMANTIC ANALYSIS OF COMPLEX DYNAMICAL SYSTEMS

Burak T.I., Lukashevich M.M.

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus*

**timburik@gmail.com**

**lukashevich@bsuir.by**

In this paper presented methodology for computer modeling of complex dynamic systems, based on system approach of J. Forrester. A brief description and characteristics of software tools for modeling dynamic systems.

## Introduction

The problem of predicting behavior of the object of interest (usually a complex system) is one of the major problems of natural science. Modern level of mathematical modeling development is connected to ability of property specification of modeling objects, which allows us to build complex imitational models.

## Main Part

One of the approaches for modeling complex dynamic systems introduced in the papers of J. Forrester, the founder of system dynamics. The main idea of system approach is that model represented as a set of main characteristics, whose changes are driven by feedback loops.

Using system approach as a basis the software tool for modeling complex dynamic systems was developed. This tool has the form of a web application available via this URL: <http://modeling-timburik.rhcloud.com>.

Software tool was used to create model of eco-biological system “Vegetation-Lemmings-Arctic Foxes”, and obtained testing results proves the hypothesis about the leading functioning mechanisms of examined system.

## Conclusion

Developed methodology for semantic analysis of complex dynamical systems. Modeling algorithm is based on J.Forrester system approach. Developed software tool was tested on complex eco-biological system.