

ИСТОРИЯ НАУКИ

Самарская Лука: проблемы глобальной и региональной экологии.
2017. – Т. 26, № 1. – С. 141-135.

УДК 519.683+504.06

ДЖЕЙ РАЙТ ФОРРЕСТЕР (14.07.1918 – 16.11.2016) И ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

© 2017 Г.С. Розенберг

Институт экологии Волжского бассейна РАН, г. Тольятти (Россия)

Поступила 21.11.2016

Статья посвящена памяти американского инженера, разработчика системной динамики Джея Форрестера. Он был профессором Слоуновской школы менеджмента Массачусетского технологического института. Форрестер известен как основатель системной динамики, которая занимается моделированием взаимодействий между объектами в динамических системах.

Ключевые слова: Джей Форрестер, системная динамика, имитационное моделирование, тенденции мирового развития.

Rozenberg G.S. Jay Wright Forrester (July 14, 1918 – November 16, 2016) and simulation modeling – Memory of an American engineer, developer of system dynamics Jay Forrester article is dedicated. He was a professor at the MIT Sloan School of Management. Forrester is known as the founder of system dynamics, which deals with the simulation of interactions between objects in dynamic systems.

Key words: Jay Forrester, system dynamics, simulation modeling, trend of world development.

*...But they must go, the time draws on,
And those white favour'd horses wait;
They rise, but linger, it is late;
Farewell, we kiss, and they are gone...*

*...Но вот уйти они должны:
Их кони в ленточках заждались;
И от стола они поднялись,
И нас покинули они...*

*Альфред Теннисон (Alfred Tennyson;
"In Memoriam A.H.H.", 1849;
перевод Эммы Соловковой)*

*А вы, мои друзья последнего призыва!
Чтоб вас оплакивать, мне жизнь сохранена.
Над вашей памятью не стыть плакучей ивой,
А крикнуть на весь мир все ваши имена!..*

Анна Ахматова (In memoriam; 1942)

Еще работая над книгой "Лики экологии" [Розенберг, 2004], я с удивлением узнал (помог «всезнающий» INTERNET), что человек, на книгах которого я знакомился с азами имитационного моделирования, автор «системной динамики» Джей Форрестер – жив и продолжает достаточно активно работать (см., например, [Forrester, 1985, 1992b, 1996, 1997, 1998, 2007a,b]). Потом было 90 лет, 95 лет... И казалось, так будет всегда. Но на Земле ничего нет вечного: 16 ноября 2016 г., на 99-м году жизни этот великий человек ушел от нас...

Некоторые биографические подробности



Джей Форрестер (Jay Wright Forrester) родился 14 июля 1918г. на ранчо в Ансельмо (Anselmo; штат Небраска, США). Его родители (Marmaduke [Duke] Montrose Forrester [1883-1975] и Ethel Pearl Wright Forrester [1886-1958]) были учителями и, фактически, первыми поселенцами на этой территории. В 1921 г. у него появилась сестра – Barbara Francis. Первые два школьных года обучения Джея прошли дома, под руководством матери, потом он стал ездить на лошади за 1,5 мили в школу, где преподавал его отец. Он с детства проявлял интерес к электротехнике, мастерил батареи, звонки и пр.; построил ветрогенератор для обеспечения электроэнергии на ранчо [Forrester, 1992a]. Ему предложили стипендию на обучение в сельскохозяйственном колледже, но он решил, что сельская жизнь не для него, и вместо этого поступил в университет Небраски (в Линкольне) для изучения электротехники. В 1939 г. он получает степень бакалавра в области электротехники и продолжает обучение в Massachusetts Institute of Technology (MIT). Там же он и начал работать в качестве научного сотрудника с Гордоном Брауном (Gordon Stanley Brown; 1907-1996), пионером в теории и практике сервомеханизмов¹. Во время Второй мировой войны, Джей работал над системами управления с обратной связью и сервоприводом-системы управления для радаров. Для своей магистерской диссертации он спроектировал и построил усилитель для стабилизации радиолокационных антенн на военно-морские корабли. В 1943 г. прототип был установлен на авианосце "Лексингтон" [Балакин и др., 2006] и Джей отправился в Перл-Харбор с целью контроля и обеспечения постоянного функционирования усилителя. Будучи гражданским, он вызвался остаться на борту, когда флоту было приказано выйти в море, чтобы убедиться, что сервопривод (и, таким образом, радар) работает; в ходе этой миссии "Лексингтон" принимал участие в атаке на Маршалловы острова. По возвращению, Форрестер в 1945 г. защищает диссертацию "Hydraulic Servomechanisms Develop-

¹ Сервомеханизм – следящая система автоматического регулирования, которая работает по принципу обратной связи и в которой один или больше системных сигналов, сформированных в управляющий сигнал, оказывают механическое регулирующее воздействие на объект.

ments" и получает степень магистра в области электротехники в MIT [Lane, Sterman, 2011, p. 364].

27 июля 1946 г. Джей женится на Сьюзен Сьюэт (Susan Swett), с которой он прожил 64 года до ее смерти в 2010 г.; у них трое детей – Judith, Nathan B. и Ned C. Forrester, четыре внука и два правнука.

В этом же 1946 г. Форрестер возглавляет отдел цифровой вычислительной техники лаборатории сервомеханизмов MIT и становится научным руководителем проекта ASCA (Airplane Stability and Control Analyzer), направленного на разработку тренажеров для испытания новых образцов самолетов. Изначально задумав его как аналоговый компьютер, Джей понимает, что реальное время на таких тренажерах не будет достигнуто; он узнает о цифровых вычислительных машинах от выпускника MIT Перри Кроуфорда (Perry O. Crawford), посещает вычислительные центры в Гарварде и в университете в Пенсильвании, знакомится с Джоном фон Нейманом и Дж. Преспером Эккертом². Все это убеждает его в том, что проект ASCA должен базироваться на цифровых вычислениях, – смелое решение, особенно учитывая тот факт, что все существующие на то время вычислительные машины были слишком медленными для этой цели. В 1951 г., Форрестер возглавляет работу над проектом под названием «Whirlwind» («Вихрь») – первым программируемым цифровым компьютером, главным достоинством которого стала возможность быстрого программирования (над созданием «Whirlwind» трудился коллектив численностью 175 человек, из которых 70 были инженерами и техниками). В 1956 г., 28 февраля он получает патент (US2736880 A) на изобретение запоминающих устройств на магнитных сердечниках («Multicoordinate digital information storage device»; заявка подана 11 мая 1951 г.)³. За 25 лет безотказность работы «Whirlwind» составила 99,8%, что сделало компьютер и его программное обеспечение самым надежным в системе ПВО США. В 1989 г. Форрестер и его заместитель Роберт Эверетт (Robert Rivers Everett; г. р. 1921) за разработку «Whirlwind» были награждены Национальной медалью США в области технологий (National Medal of Technology).

Однако, когда «Whirlwind» был готов, заказчики проекта ASCA утратили к нему интерес [<http://www.osp.ru/cw/2004/47/83653/>], но его удалось переориентировать на использование в более грандиозном проекте Semi Automated Ground Envi-

² Дж. Фон Нейман (John von Neumann; 1903-1957) – венгеро-американский математик, сделавший важный вклад в квантовую физику, функциональный анализ, теорию множеств, информатику, экономику и др. отрасли науки. Наиболее известен как человек, с именем которого связывают архитектуру большинства современных компьютеров (так называемая, *архитектура фон Неймана*), участник Манхэттенского проекта и создатель теории игр и концепции клеточных автоматов.

Дж. Преспер Эккерт (John Adam Presper Eckert; 1919-1995) – американский инженер-электронщик и один из разработчиков (1946 г.) первой цифровой вычислительной машины «Эниак» (ENIAC — Electronic Numerical Integrator and Computer). Тогда же были начаты работы над новой машиной – «Эдвак» (EDVAC — Electronic Discret Variable Automatic Computer – электронный автоматический вычислитель с дискретными переменными).

³ Память на магнитных сердечниках (magnetic core memory или ferrite memory) – запоминающее устройство, хранящее информацию в виде направления намагниченности небольших ферритовых сердечников, обычно имеющих форму кольца. Память на магнитных сердечниках была основным типом компьютерной памяти с середины 1950-х и до середины 1970-х гг., после чего память на магнитных сердечниках была вытеснена с рынка памятью на полупроводниковых микросхемах.

ronment (SAGE), по которому создавалась система радиолокационного слежения для противовоздушной обороны США.



Джей Форрестер на фоне «Whirlwind» в MIT во время интервью Boston's Channel 7 в 1957 г.

(<https://www.technologyreview.com/s/538561/the-many-careers-of-jay-forrester/>)



41-й Президент США Дж. Буш (George Herbert Walker Bush) вручает National Medal of Technology Дж. Форрестеру в Президентской библиотеке [Lane, Sterman, 2011, p. 366]

В 1956 г. начался новый этап в жизни Форрестера: его пригласили преподавать в Слоуновскую школу менеджмента MIT (MIT Sloan School of Management), – очень престижную международную бизнес-школу, которая славится своим фундаментальным подходом к обучению, сочетанием научной базы и практики. Он стал внедрять вычислительные процедуры в систему управления, вел семинар «Динамические модели экономических систем и промышленных предприятий». Его первая динамическая модель возникла благодаря случайным разговорам с руководством General Electric Corporation (GE) [Forrester, 1992b]. Менеджеры GE были озабочены большими колебаниями объемов производства, материальных запасов, занятости и доходов. В попытках взять под контроль производственную систему, менеджеры компании собрали информацию о показателях запасов и численности персонала и наметили правильные, с их точки зрения, корректирующие действия. Состояние каждого уровня, меры, использованные менеджерами для влияния на них, и полученные результаты воздействия могли рассматриваться в качестве компонентов «контура обратной связи». Но действия менеджеров приводили к неожиданным (часто противоположным) результатам в самых разных областях, что инициировало дальнейшие действия, которые в свою очередь вновь обеспечивали неожиданные результаты, также требовавшие принятия новых мер, и т. д. Учитывая в модели различные типы воздействий и контуров обратной связи, Форрестер показал, что вмешательства управленцев в работу системы приводили вовсе не к тому эффекту, на который они интуитивно рассчитывали – *система вела себя контринтуитивно* [Forrester, 1971b] Он увидел в этом аналогию в стабилизации радиолокационных антенн на авианосце "Лексингтон", что позволило ему использо-

вать для моделирования «идеологию» сервомеханизмов (фактически, обратных связей). Все это привело его к написанию монографии о динамике предприятия [Forrester, 1961] и дало возможность впервые изложить свою концепцию *системной динамики* – направления в изучении сложных систем, исследующего их поведение во времени и в зависимости от структуры элементов системы и взаимодействия между ними (в том числе: причинно-следственных связей, петель обратных связей, задержек реакции, влияния среды и др.); особенное внимание уделяется компьютерному моделированию таких систем [Forrester, 1968].

Более поздние его книги (в первую очередь, "Динамика развития города" и "Мировая динамика" [Forrester, 1969, 1971a]) и его многочисленные статьи открыли новые горизонты в нашем понимании суперсложных систем с человеком [Розенберг, 2016] и возможностей моделирования глобальных социо-эколого-экономических систем (СЭЭС).

Форрестер официально ушел в отставку в 1989 г., но продолжал свою работу, пропагандируя использование принципов системной динамики в образовании (например, [Forrester, 2009]).

Системная динамика и язык DINAMO

В конце 1950-х – начале 60-х гг. область исследования проблем управления воспринималась Форрестером как состоящая из набора плохо связанных между собой результатов эмпирических наблюдений. Поэтому уже в книге "Индустриальная динамика" [Forrester, 1961] он стремился произвести «революцию в науке об управлении», считая, что представления об обратной связи могут обеспечить прочную теоретическую основу и целостную схему для разнообразных наблюдений поведения СЭЭС. Эти же представления легли в основу монографии "Системные принципы" [Forrester, 1968].

По-Форрестору, *системная динамика* имеет три отличительные особенности. Первая заключается в использовании «контуров обратной связи», подразумевающих сбор информации, использование управляющего воздействия в соответствии с заданной политикой и новый этап сбора информации. Эти замкнутые петли каузальных связей приводят к возникновению задержек и нелинейных зависимостей.

Вторая подразумевает использование компьютерного моделирования в тех случаях, когда можно построить сложную модель сложной системы, но нельзя провести её анализ аналитически («на кончике пера»), что делает необходимым привлечение методов компьютерного моделирования. Наличие взаимодействий обратных связей и нелинейных зависимостей означает, что в разные моменты времени доминирующими становятся различные части системы. В результате возникает поведение не соответствующее интуитивным ожиданиям наблюдателя, которое может исследоваться с помощью метода моделирования.

Третьей особенностью является использование «ментальных моделей» (фактически, это способ восприятия нашего мира [Jones et al., 2011; Groesser, Schaffernicht, 2012]). Такие модели содержат наши представления о том, что может быть причиной тех или иных событий, и базируются как на количественных переменных, так и на качественных оценках. Данный тип моделей обеспечивает основу для принятия решений. Единственный способ, позволяющий справиться с проблемными ситуациями, заключается в том, чтобы понять и изменить ментальные модели управляющих системой менеджеров. Поэтому процесс моделирования должен быть тесно связан с работой менеджеров, способствовать созданию их личных

ментальных моделей, которые затем отображаются в компьютерных (диалоговый режим моделирования-прогнозирования-управления).

Если добавить к этим особенностям еще одну – *принцип блочного построения модели*, – то приходим к представлениям об имитационном моделировании. Чешский математик и гидробиолог М. Страшкраба (Milan Straškraba; 1931-2000) на конференции по моделированию водных систем, проходившей в Праге в 1992 г., так охарактеризовал имитационное моделирование (цит. по: Меншуткин, 2010, с. 357): «Имитация систем есть специфическая форма процесса познания. Предметом имитации могут быть системы реально существующие, проектируемые или даже не имеющие непосредственного отношения к реальности. Основной принцип имитации систем – получение суждений об имитируемой системе при помощи экспериментов с моделью. Именно эксперименты с моделью отличают имитацию от других форм познания». Сходные идеи высказывались им и в написанной в 1985 г. [Страшкраба, Гнаука, 1989, с. 312-313]: «Кибернетическая экология – это подход, обещающий помочь нам в дальнейшем теоретическом понимании сложных природных процессов на экосистемном уровне. Классические исследования и модели были направлены главным образом на то, чтобы получить поверхностное описание структуры и (или) поведения экосистем. Смещение научных интересов в сторону изучения сил, с которыми связано формирование макроскопических, холистических свойств экосистем, во многом перекликается с термодинамическим подходом. В результате этого исследование экосистем все больше идет по пути изучения дисциплин, связанных с эволюционными процессами, т. е. тех дисциплин, которые служили областью исследований на уровне организмов и популяций».

Еще одним необходимым условием эффективности разработки имитационной модели является наличие *специализированного алгоритмического языка*, позволяющего легко переводить гипотезы и законы, выдвигаемые исследователем, на язык машинных программ. Наличие таких языков делает метод имитационного моделирования чрезвычайно доступным для специалистов-экологов, чья математическая подготовка недостаточно высока (обучение написанию программ на таком языке, зачастую, занимает очень немного времени). При этом, специализированные языки имеют свои «плюсы» и «минусы» [Шеннон, 1978]. К первым относятся низкая трудоемкость написания программы («человеку, не знакомому с программированием на ЭВМ, достаточно нескольких дней, чтобы научиться писать довольно сложные программы на языке DINAMO» [Моисеев, 1978, с. 153]), более эффективные методы выявления ошибок, возможность заранее создать (или воспользоваться готовой) библиотеку стандартных программ, использовать всевозможные базы данных, удобство накопления и представления исходной информации и результатов моделирования. Ко вторым – большая «жесткость» языка, проявляемая в необходимости твердо придерживаться его ограничений, большие затраты машинного времени на моделирование (иными словами, невысокая экономичность специализированного языка), широта «спектра» специализированных языков, которые чаще всего разрабатываются для решения некоторых весьма узких классов конкретных задач (возникает «проблема выбора»).

И опять, в создании таких языков приоритет принадлежит Форрестеру, – это язык DINAMO [Forrester, 1961, 1975; Richardson, Pugh, 1981], который стал первым специализированным языком для построения имитационных моделей сложных си-

стем (в том числе и экологических). Именно на этом языке им были написаны глобальные модели мировой динамики World-1 и World-2 [Forrester, 1971], и ставшая бестселлером модель World-3, и написанная на её основе работа Донеллы и Дениса Медоуз с соавторами "Пределы роста" [Meadows et al., 1972]. Фактически, этот язык описывает процесс численного интегрирования системы дифференциальных уравнений, основой которых являются пять видов переменных – *уровни* (факторы системы, которые численно описывают состояние основных процессов в моделируемой системе; например, численность некоторой популяции животных и количество пищи для них), *темпы* (скорости изменения уровней; например, естественный прирост популяции за единицу времени), *вспомогательные переменные* (параметры системы, динамика изменения которых не является целью моделирования; например, численность хищников для моделируемого вида, которая «управляется» вне модели), *дополнительные факторы* (определяются по уровням, темпам и вспомогательным факторам; например, среднее число особей интересующей нас популяции, приходящееся на одного хищника) и *время* (дискретная величина, шаг которой определяется разработчиком модели. Последний вариант модели World-3-03 написан на языке STELLA [Chalupsky, MacGregor, 1999], который развивает DINAMO и предоставляет более широкие возможности анализа модели [Медоуз и др., 2008, с. 305].

Принцип контринтуитивного поведения сложных систем

Среди принципов системологии можно выделить несколько основных [Флейшман и др., 1982; Розенберг, 2013].

- **Принцип иерархической организации** (*принцип интегративных уровней* или *уровней интеграции*; позволяет соподчинить друг другу как естественные, так и искусственные системы).
- **Принцип несовместимости Лотфи Задэ**: чем глубже анализируется реальная сложная система, тем менее определены наши суждения о ее поведении.
- **Принцип множественности моделей В.В. Налимова**: для объяснения и предсказания структуры и (или) поведения сложной системы возможно построение нескольких моделей, имеющих одинаковое право на существование.
- **Принцип осуществимости Б.С. Флейшмана**: позволяет отличить модели сложных систем от обычных математических моделей.
- **Принцип формирования законов**: постулируются осуществимые модели, а из них в виде теорем выводятся законы сложных систем.
- **Принцип рекуррентного объяснения**: свойства систем данного уровня иерархической организации мира выводятся в виде теорем (объясняются), исходя из постулируемых свойств элементов этой системы (т. е. систем непосредственно нижестоящего уровня иерархии) и связей между ними. Например, для вывода свойств экосистемы (биоценоза) постулируются свойства и связи популяций, для вывода свойств популяций – свойства и связи особей, и т. д.
- **Принцип минимаксного построения моделей**: теория должна состоять из простых моделей (min) систем нарастающей сложности (max). Другими словами, формальная сложность модели (например, число описывающих её уравнений) не должна соответствовать неформальной сложности системы. Отсюда следует, что грубая модель динамики экосистемы может оказаться проще более точной модели более простой системы (например, модели энергетического баланса

особи); этот принцип рассматривается как своеобразный аналог *принципа «бритвы Оккама»*.

- Наконец, *принцип контринтуитивного поведения Дж. Форрестера*: дать удовлетворительный прогноз поведения сложной системы на достаточно большом промежутке времени, опираясь только на собственный опыт и интуицию, практически невозможно. Это связано с тем, что наша интуиция «воспитана» на общении с простыми системами, где связи элементов практически всегда удается проследить. Контринтуитивность поведения сложной системы состоит в том, что она реагирует на воздействие совсем иным образом, чем это нами интуитивно ожидалось.

"Мировая динамика"

Как уже отмечалось, именно "Мировая динамика" Дж. Форрестера [Forrester, 1971] дала первый, может и не сразу замеченный толчок, который породил экспоненциально растущую лавину исследований, получивших впоследствии название «глобального моделирования». Сам Форрестер [1978, с. 10-11] отмечал: «Динамическая модель мировых взаимодействий, описанная в этой книге, была предложена как основа для дискуссии. Её следует рассматривать лишь в качестве предварительной попытки моделирования таких систем (выделено автором. – Г.Р.)... Поскольку точная и окончательная модель мировой системы никогда не может быть построена, а интерес к этим попыткам все более и более растет, нам казалось уместным изложить используемые предположения и полученные нами выводы в этой книге».

Модель очень упрощенна и содержит 5 уровней-блоков:

- население,
- капиталовложения (фонды),
- природные невозобновимые ресурсы,
- часть фондов, вкладываемых в сельское хозяйство,
- загрязнение (уровень загрязнения) среды.

Самые простые предположения, заложенные в основу этой, в общем-то, демонстрационной модели (разведанных природных ресурсов должно хватить на 250 лет развития человечества при сохранении темпов их использования на уровне 1970 г.), продемонстрировали (см. рисунок), во-первых, рост потребления ресурсов в 1,5 раза за период с 1970 по 2000 гг. из-за увеличения численности населения и капиталовложений, что ведет к ускоренному сокращению природных ресурсов и связанному с этим сокращению численности населения.

Модель World-3 появилась на год позже [Meadows et al., 1972; Медуз и др., 2008]; результаты её анализа позволили авторам прийти к выводу о том, «что воздействие на окружающую среду в масштабах земного шара (расходование природных ресурсов и выбросы загрязнений) сильно скажется на развитии мира в XXI в. "Пределы роста" предупреждали, что человечеству придется направлять больше усилий и капитала на то, чтобы бороться с ухудшением состояния окружающей среды. Возможно, настолько больше, что в один прекрасный день XXI в. это приведет к снижению уровня жизни» [Медуз и др., 2008, с. 16]. Не вдаваясь в описание этой модели, приведу еще одну большую цитату [Медуз и др., 2008, с. 24], которая косвенно свидетельствует о качестве модели World-3: «Тем, кто больше уважает цифры, мы можем сообщить: итоговые сценарии модели World-3 оказались на

удивление точными – прошедшие 30 лет подтвердили это. Численность населения в 2000 г. – порядка 6 млрд. чел. в сравнении с 3,9 млрд. чел. в 1972 г. – оказалась именно такой, какой мы рассчитывали её по модели World-3 в 1972 г. Больше того, сценарий, показывающий рост мирового производства продовольствия (с 1,8 млрд. т в год в зерновом эквиваленте в 1972 г. до 3 млрд. т в 2000 г.), практически совпал с реальными цифрами. Доказывают ли такие совпадения, что наша модель правильна? Разумеется, нет. Но они подтверждают, что модель World-3 вовсе не была абсурдной, как это заявляли критики. Её предположения и наши заключения актуальны и сегодня».

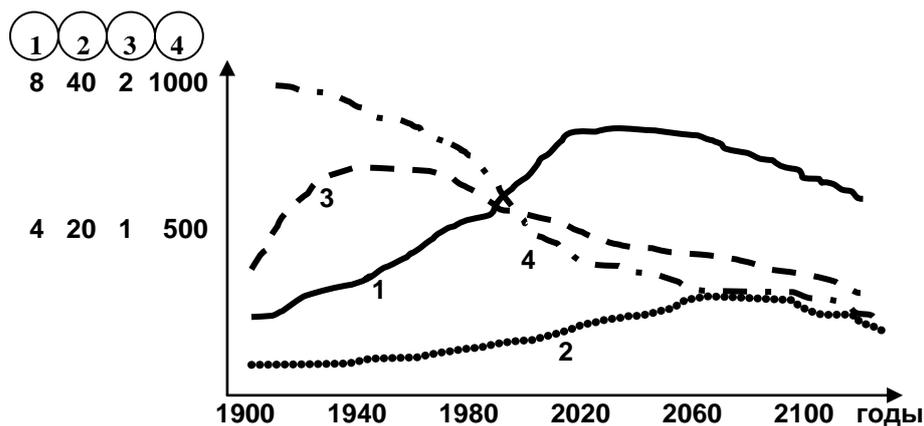


Рис. Изменение некоторых параметров модели Дж. Форрестера (1 – население [млрд.], 2 – загрязнение, 3 – качество жизни, 4 – природные ресурсы [млрд.]

После этих работ интерес к глобальному моделированию резко возрос (подробнее см. [Розенберг, 2013]) – в рамках "Римского клуба" появились модели М. Месаровича, Э. Пестеля, В. Леонтьева и др.; у нас в стране модели «форрестерского типа» исследовали В.А. Геловани с соавторами; модель «Гея» была создана группой исследователей, во главе с Н.Н. Моисеевым. Принципиальное отличие последней модели от моделей «форрестерского типа» состоит в том, что основной упор в ней сделан на экологическую, а не на экономическую составляющую этой сложной системы, т. е. при построении модели авторы исходили из общесистемных представлений о биосфере, основу которых заложил еще В.И. Вернадский.

Несколько слов об имитационное моделирование в целом и применительно к экологии

При имитационном моделировании в модели сквозь призму цели исследования достаточно полно и подробно отображаются «глубинные» свойства экосистемы – её структура и механизмы функционирования. При этом, как правило, модельер, заказчик и пользователь – различные лица. В имитационной модели:

- учитывается огромное число переменных и параметров экосистемы;
- имитируется множество явлений различной экологической природы;
- большинство коэффициентов модели имеет вполне конкретный физический (экологический) смысл;

- модель оказывается существенно «машинной» – представляет собой комплекс программ для ЭВМ, построенных по блочному (модульному) принципу;
- включает специальную систему математического обеспечения с соответствующей периферией, позволяющей работать с моделью в диалоговом режиме;
- при разработке модели применяются как априорная информация, так и экспериментальные данные;
- модель служит для изучения совокупности целостных характеристик;
- используется как средство системного экспериментирования с экосистемой.

Все это позволяет считать, что имитационная модель «имеет скорее практическую, чем теоретическую значимость» [Брусиловский, Кожова, 1985, с. 21].

Построение имитационной модели экологической системы – это не просто применение математики в конкретном исследовании: оно опирается на определенный круг экологических представлений. Естественно, что эти представления и другие гипотезы, которые кладутся в основу модели, должны быть правдоподобны и, по-возможности, адекватно отражать реальные связи и поведение системы. Одной из основных концепций, на которую опирается большинство имитационных моделей, построенных по принципам системной динамики Форрестера, является *концепция равновесия*. Однако представление о равновесии экосистем противоречит необратимости протекающих в них процессов, на что обращали внимание многие исследователи (И. Пригожин, А.М. Мауринь, Г.Е. Михайловский, Дж. Хеджпет; см. [Розенберг, 2013]). Поэтому, при построении имитационных моделей, прогнозирующих поведение экосистем, необходимо уделять пристальное внимание «глубине» прогноза, т. е. определению временных интервалов, в течение которых не происходит значительных качественных «скачков» в динамике прогнозируемой экосистемы. Подчеркну, что в ряде задач определенный интерес представляет именно изучение динамики балансовых соотношений, которые в моделях, построенных по принципам системной динамики, считаются неизменными. Кроме того, при построении математической модели некоторой реальной экосистемы, необходимо учитывать не только актуальные функциональные связи, отражающие её сегодняшнюю жизнь, но и эволюционные связи экосистем. Последняя задача необычайно сложна, что ставит под сомнение возможность придать экологическим теориям, формализуемым имитационными моделями, предсказательную силу на достаточно больших интервалах времени [Мейен, 1978].

Для получения результата необходимо осуществить «прогон» имитационной модели, а не «решать» её подобно аналитической. Имитационные модели со стохастическим блоком позволяют набирать статистику о поведении моделируемой экосистемы и делать выводы вероятностного характера. Таким образом, *имитационное моделирование – это не теория, а методология решения проблем* [Шеннон, 1978; Страшкраба, Гнаука, 1989]. Кроме того, имитационное моделирование является лишь одним из возможных способов решения экологических задач, который выполняет, главным образом, только предсказательную функцию теории. Целесообразно применять имитационное моделирование в задачах исследования уникальных экосистем (но без противопоставления традиционным экспериментальным и натурным методам их изучения).

Заключение

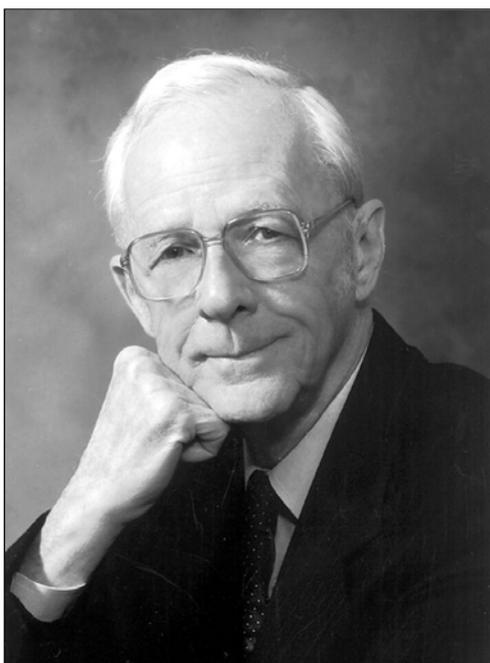
Несмотря на некоторое недостаточное математическое изящество, имитационное моделирование продолжает оставаться одним из широко распространенных

методов исследования сложных систем. Правда, этот подход вряд ли можно назвать высоко эффективным по следующим причинам [Шеннон, 1978]:

- «хорошая» имитационная модель (на «гране нашего знания») может быть построена только при больших затратах времени и средств;
- имитационная модель в принципе может не отражать реальную структуру экосистемы, что приведет, в конечном итоге, к неверным выводам, построенным на её основе;
- очень сложна оценка точности имитационной модели, которая лишь частично может быть решена анализом чувствительности модели к изменению некоторых её параметров;
- по мере увеличения внешнего сходства результатов экспериментов и имитационного моделирования, достигаемого путем усложнения модели и введением в неё все новых и новых переменных, приходится осознать, что на этом пути мы все дальше отодвигаемся от создания качественной экологической теории;
- наконец, имитационная модель дает численный результат, в связи с чем возникает опасность «обожествления» чисел, т. е. приписывания им большей значимости, чем они имеют на самом деле.

К положительным чертам имитационного моделирования, которые и привлекают к нему многочисленных исследователей, относятся:

- высокая точность прогнозов поведения сложных систем;
- легкость экспериментирования с моделью;
- возможность, когда модель уже построена и верифицирована, «проигрывать» различные сценарии управления её поведением, что расширяет традиционное понятие «лабораторного эксперимента»;
- развитие интуиции исследователя в процессе построения самой модели (это делает её создание хорошей школой для студентов и молодых научных работников);
- способствование созданию больших творческих коллективов, объединяющих специалистов различных областей знания для решения поставленной задачи, что ведет к плодотворному обмену информацией между ними.



Все вышеизложенное свидетельствует о том, что хотя имитационное моделирование и получило широкое применение в экологии, оно не является «панацеей от всех бед» при построении экологической теории. А так как «разработка и применение имитационных моделей все еще в большей степени искусство, нежели наука» [Шеннон, 1978, с. 27], то успех или неудача в их использовании (как и в любом другом виде искусства) во многом зависит не столько от самого метода, сколько от того, как и кто его применяет.

Выступая в 2007 г. на конференции, посвященной 50-летию системной динамики, Дж. Форрестер [Forrester, 2007b, p. 359, 360, 370] говорил: «Мы продемонстрировали (с помощью системной динамики. – Г.Р.) возможность лучшего

понимания сложных систем, как природных, так и с человеком. Сейчас мы вышли на плато и готовы к началу следующего большого рывка вперед... Мы сейчас находимся, примерно, в том же состоянии развития, когда начало развиваться машиностроение и MIT открыл свои двери в 1865 году... Системная динамика началась 50 лет тому назад, фактически, с учебных программ, ориентированных на изучение внешнего мира, с акцентом на проблемы, которые тогда лежали за пределами интереса научных кругов... И сегодня, специалисты по системной динамике должны идти на решение самых современных проблем и анализировать основные причины их возникновения. Надо быть готовым к тому, что наши аргументы будут встречены с недоверием, презрением и насмешками. Но мы одержим победу в этой битве и повернем общественное мнение в нашу сторону».

К сожалению, не могу вслед за руководителем группы системной динамики MIT, профессором Дж. Стерманом (John Sterman) сказать, что «I was fortunate to be able to work with and learn from Jay – Мне повезло, что у меня была возможность работать и учиться у Джея» [<http://www.systemdynamics.org/>]. Точнее, я учился на его трудах, за что и буду ему всегда благодарен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Балакин С.А., Дашьян А.В., Морозов М.Э. Авианосцы Второй мировой. Новые властители океанов. М.: Коллекция, Язуа, ЭКСМО, 2006. 256 с. (Сер.: Арсенал коллекция). – **Брусиловский П.М., Кожова О.М.** Проблемы прогнозирования состояния экосистем // Приемы прогнозирования экологических систем. Новосибирск: Наука, 1985. С. 15-23.

Медоуз Д., Рандерс Й., Медоуз Д.Л. Пределы роста. 30 лет спустя. М.: ИКЦ "Академкнига", 2008. 342 с. – **Мейен С.В.** Проблема редуccionизма в биологии // Диалектика развития в природе и научном познании: (К 100-летию книги Ф. Энгельса "Анти-Дюринг"). М.: Наука, 1978. С. 135-169. – **Меншуткин В.В.** Искусство моделирования (экология, физиология, эволюция). Петрозаводск; СПб.: РАН, 2010. 416 с. – **Моисеев Н.Н.** "Мировая динамика" Форрестера и актуальные вопросы экологической эволюции // Форрестер Дж. Мировая динамика. М.: Наука, 1978. С. 149-165.

Розенберг Г.С. Лики экологии. Тольятти: Самар. НЦ РАН, 2004. 224 с. – **Розенберг Г.С.** Введение в теоретическую экологию / В 2-х т.; Изд. 2-е, исправ. и дополн. Тольятти: Кассандра, 2013. Т. 1. 565 с. Т. 2. 445 с. – **Розенберг Г.С.** О простых, сложных и суперсложных системах // Четверта міжнародна науково-практична конференція «Відкриті еволюційно-нуччі системи» (20-21 травня 2016 р.). Збірник праць: Частина 1. Ніжин: ВНЗ ВП НУБіП України НАІ, 2016. С. 228-233.

Страшкраба М., Гнаука А. Пресноводные экосистемы. Математическое моделирование. М.: Мир, 1989. 376 с. (Straškraba M., Gnauck A.H. Freshwater Ecosystems: Modelling and Simulation. Amsterdam et al.: Elsevier, 1985. 305 p.).

Флейшман Б.С., Брусиловский П.М., Розенберг Г.С. О методах математического моделирования сложных систем // Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник 1982. М.: Наука, 1982. С. 65-79.

Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. М.: Мир, 1978. 420 с.

Chalupsky H., MacGregor R. STELLA – a Lisp-like language for symbolic programming with delivery in Common Lisp, C++ and Java // Proc. of the 1999 Lisp User Group Meeting. Berkeley (CA): Franz Inc., 1999. 8 p.

Forrester J.W. Industrial Dynamics. Waltham (MA): Pegasus Communications, 1961. 464 p. (Форрестер Д. Основы кибернетики предприятия [Индустриальная динамика]. М.: Прогресс, 1971. 340 с.). – **Forrester J.W.** Principles of Systems. Waltham (MA): Pegasus Communications, 1968. 387 p. – **Forrester J.W.** Urban Dynamics. Waltham (MA): Pegasus

Communications, 1969. 285 p. (Форрестер Д. Динамика развития города, М.: Прогресс, 1974. 288 с.). – **Forrester J.W.** World Dynamics. Waltham (MA): Pegasus Communications, 1971a. 144 p. (Форрестер Д. Мировая динамика. М.: Наука, 1978. 167 с.). – **Forrester J.W.** Counterintuitive behavior of social systems // Technology Rev. 1971b. Vol. 43. P. 53-68. (Форрестер Д. Антиинтуитивное поведение сложных систем // Современные проблемы кибернетики. Вып. 7. М.: Знание, 1977. С. 9-25. [Сер.: Математика, кибернетика]). – **Forrester J.W.** Collected Papers of Jay W. Forrester. Waltham (MA): Pegasus Communications, 1975. – 284 p. – **Forrester J.W.** Economic conditions ahead: understanding the Kondratieff wave // Futurist. 1985. Vol. 19, No. 3. P. 16-20. – **Forrester J.W.** From the ranch to system dynamics // A.G. Bedeian (Ed). Management Laureates: A collection of autobiographical essays (Vol. 1). Greenwich (Connecticut): JAI Press, 1992a. P. 335-370. – **Forrester J.W.** Policies, decisions, and information sources for modeling // European J. Operational Res. 1992b. Vol. 59, No. 1. P. 42-63. – **Forrester J.W.** Being Good and Being Logical. Philosophical Groundwork for a New Deontic Logic. N. Y.: Armonk, 1996. 332 p. – **Forrester J.W.** Industrial dynamics // J. Operational Res. Soc. 1997. Vol. 48, No. 10. P. 1037-1041. – **Forrester J.W.** Designing the Future. Paper presented at the Universidad de Sevilla Sevilla, Spain, December, 1998. Quoted in Ugo Bardi "The Limits to Growth Revisited", N. Y.: Springer-Verlag, 2011. 119 p. – **Forrester J.W.** A recollection of the history and reflections for the future at the golden anniversary of the field // System Dynamics Review. 2007a. Vol. 23, No. 2-3. P. 345-358. – **Forrester J.W.** System dynamics – the next fifty years // System Dynamics Review. 2007b. Vol. 23, No. 2-3. P. 359-370. – **Forrester J.W.** System Dynamics: The Classroom Experience Quotations from K-12 Teachers. Cambridge (MA): MIT Press, 2009. 19 p. [http://static.clexchange.org/ftp/documents/whyk12sd/Y_2009-02QuotationsFromTeachers.pdf].

Groesser S.N., Schaffernicht M. Mental models of dynamic systems: taking stock and looking ahead // System Dynamics Rev. 2012. Vol. 28, No. 1. P. 46-68.

Jones N.A., Ross H., Lynam T., Perez P., Leitch A. Mental models: an interdisciplinary synthesis of theory and methods // Ecology and Society. 2011. V 16, No. 1. P. 46.

Lane D.C., Sterman J.D. Jay Wright Forrester // Profiles in Operations Research: Pioneers and Innovators / Ed. by S. Gass, A. Assad. N. Y.: Springer, 2011. P. 363-386.

Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J., Behrens III W.W. The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind. N.Y.: Universe Books, 1972. 205 p. (Меадоуз Д. и др. Пределы роста. Доклад по проекту Римского клуба "Сложное положение человечества". М.: МГУ, 1991. 206 с.).

Richardson G.P., Pugh A.L. Introduction to System Dynamics Modeling with DYNAMO. Waltham (MA): Pegasus Communications, 1981. 413 p.