

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

им. М.В. Ломоносова

Экономический факультет

В.Н. Сидоренко

СИСТЕМНАЯ ДИНАМИКА

Рекомендовано кафедрой экономики природопользования экономического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям "Системный анализ", "Системная динамика", "Экономическая кибернетика", "Управленческий консалтинг", "Защита окружающей среды", "Экономика природопользования", "Экология".

Москва
ТЕИС
1998

ББК 65.9(2)28

С 347

Рецензенты:

Экономический факультет МГУ

доктор экономических наук К.В. Папенов

Экономический факультет МГУ

доктор экономических наук Ю.Н. Черемных

Биологический факультет МГУ

доктор биологических наук Д.Н. Кавтарадзе

Печатается по постановлению

Редакционно-издательского совета

Московского университета

Научный редактор М.М. Крюков

Сидоренко В.Н.

С347 Системная динамика. - М.: Экономический факультет МГУ; ТЕИС,
1998. - 200 с.

ISBN 5-7218-0135-2

В предлагаемом учебном пособии рассматриваются основные положения и аппарат системной динамики, ее приложение к моделированию и анализу эколого-экономических процессов, протекающих в сложных эколого-экономических системах, а также применение получаемых имитационных системно-динамических моделей и анализ "типовых структур", используемых при построении указанных моделей.

Для студентов, аспирантов и преподавателей, специализирующихся в области системного анализа, системной динамики, экономической кибернетики, управленческого консалтинга, экономики рационального природопользования и охраны окружающей среды, экологии.

ББК 65.9(2)28

Напечатано с оригинал-макета автора

ISBN 5-7218-0135-2

© Сидоренко В.Н., 1998

© Экономический факультет МГУ, 1998

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие научного редактора	5
Введение	7
Глава 1. Язык системной динамики	14
§1.1 Концепция системной динамики	14
<i>Классификация систем</i>	<i>14</i>
<i>Методы изучения сложных систем</i>	<i>17</i>
<i>Системный анализ и системная динамика</i>	<i>22</i>
§1.2 Понятийный аппарат	27
<i>Основные понятия</i>	<i>27</i>
<i>Типы связей между элементами системы</i>	<i>28</i>
<i>Классификация и обозначения элементов модели</i>	<i>37</i>
§1.3 Построение имитационных моделей	43
<i>Формирование целей исследования</i>	<i>45</i>
<i>Сбор информации о системе и процессах (этап референции)</i>	<i>45</i>
<i>Построение концептуальной модели</i>	<i>46</i>
<i>Построение машинной модели</i>	<i>50</i>
<i>Проведение имитационных экспериментов и верификация модели</i>	<i>51</i>
<i>Обсуждение модели (дебрифинг)</i>	<i>52</i>
<i>Улучшение модели</i>	<i>52</i>
Глава 2. Моделирование и анализ эколого-экономических процессов	54
§1.1 Моделирование загрязнения окружающей среды	54
<i>Загрязнение атмосферы хлорфторуглеводородами</i>	<i>54</i>
<i>Загрязнение атмосферы выбросами CO₂, SO_x и NO_x</i>	<i>59</i>
§1.2 Моделирование использования ресурсов	73
<i>Неоклассическая экономическая модель</i>	<i>80</i>
<i>Природоохранная модель</i>	<i>82</i>
<i>Обобщенная модель</i>	<i>83</i>
<i>Анализ работы обобщенной модели</i>	<i>86</i>
§1.3 Глобальные имитационные модели	92
<i>Модель "МИР-3"</i>	<i>93</i>
<i>Модели "Стратегема-1" и "Полисфера"</i>	<i>98</i>
<i>Модель "США на пороге XXI-го века"</i>	<i>103</i>
Глава 3. Анализ и использование имитационных моделей	107
§1.1 Обоснованность имитационных моделей	107
<i>Предварительная проверка</i>	<i>108</i>
<i>Проверка структуры модели</i>	<i>109</i>
<i>Проверка модели на устойчивость</i>	<i>113</i>

<i>Проверка различных линий поведения модели</i>	115
§1.2 Анализ "типовых" структур и связанных с ними процессов	118
<i>Структуры с положительной обратной связью</i>	53
<i>Структуры с отрицательной обратной связью</i>	53
<i>Смешанные структуры</i>	53
§1.3 Практическое использование эколого-экономических имитационных моделей	138
<i>Упорядочивание знаний и прояснение понимания</i>	53
<i>Поиск оптимальных стратегий</i>	53
<i>Отражение и унификация ментальных моделей</i>	53
Заключение	147
Приложения	149
I. Модель динамики парниковых газов в атмосфере	144
II. Модель CO ₂ и не-CO ₂ -загрязнения окружающей среды	146
III. Модель использования природных ресурсов	151
IV. Модель загрязнения окружающей среды (Мир-3)	158
V. Модель использования невозобновимых природных ресурсов (Мир-3)	162
VI. Баланс и лист принятия решений министра финансов для игры "Полисфера"	165
VI. Фазовые портреты для петель положительной и отрицательной обратной связи третьего и четвертого порядка	167
Список литературы	181
Глоссарий	193
Предметный указатель	196

ПРЕДИСЛОВИЕ НАУЧНОГО РЕДАКТОРА

Книги по системной динамике, опубликованные на русском языке к настоящему времени, как правило, излагали основы этого метода в связи с конкретными проблемами. Иными словами, если требовалось представить читателю модель определенной системы или, в лучшем случае, класса таких систем, то сведения о принципах ее конструирования сообщались в объеме, необходимом для понимания этой модели и выводов из нее. Наиболее традиционным поводом для ознакомления читателя с системной динамикой было моделирование глобальных проблем. Однако для него может использоваться не только системная динамика, почему она и представала часто в качестве всего лишь в одного из инструментов для решения поставленной задачи. Между тем ее познавательное значение гораздо шире. Оно имеет весьма важные методологические, даже философские аспекты, обычно упускаемые из вида при узко утилитарном подходе.

Предлагаемая вниманию читателя книга В.Н. Сидоренко показывает системную динамику в качестве не только и не столько набора инструментов, сколько языка современной науки. И это позволяет углубить понимание как самого метода, так и систем, моделируемых с его помощью. Вот почему подход, предлагаемый автором, не только не теряет практической ценности, но, напротив, позволяет вспомнить слова (к сожалению, часто забываемые) о том, что нет ничего практичнее хорошей теории. По этой же причине данную книгу можно охарактеризовать как наиболее полное из опубликованных к настоящему времени на русском языке практическое - именно практическое - пособие по системной динамике.

Язык, как известно, влияет на характер мышления. В книге В.Н. Сидоренко системная динамика показана как средство воспитания системного мышления. А оно особенно необходимо людям, сталкивающимся с такой, системной по определению, сферой, как область проблем экономики природопользования. Именно таким специалистам прежде всего адресована данная книга, и не только потому, что приводимые в ней примеры моделей относятся к указанному кругу проблем. Дело в том, что все категории и закономерности системной динамики как языка, приводимые в книге, необходимо имеют - и это всегда подчеркивается автором - эколого-экономическую трактовку.

Стремление автора к сохранению предельно обобщенного взгляда на излагаемое содержание наиболее ярко проявилось, на наш взгляд, в анализе типовых структур системно-динамических моделей и типичных

форм их поведения, характеризующих динамику моделируемых систем прежде всего с точки зрения устойчивости. Таким образом, чисто, казалось бы, теоретический подход генерирует результаты, крайне важные в практическом смысле.

Особо следует отметить внимание автора к программным языкам построения системно-динамических имитационных моделей. Это дополнительный повод для уверенности в том, что книга В.Н. Сидоренко будет с пользой прочитана специалистами в различных областях, заинтересованными в системном подходе, моделировании, современных информационных технологиях, и ориентированными на информационно-системный анализ сложных проблем, возникающих в развивающихся системах.

Крюков М.М.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение процессов, происходящих в экономике, экологии и других сферах, является довольно сложной и неоднозначной в своем решении задачей, поскольку данные процессы происходят в сложных (то есть обладающих дублирующими обратными связями) слабоструктуризованных системах, над которыми эксперимент в том смысле, как он понимается в естественных науках, невозможен, а если и возможен, то его последствия трудно оценить и предугадать из-за "контринтуитивного поведения"¹ указанных систем.

Такое поведение обусловлено как размером и сложной структурой систем, так и огромным объемом информации, порождаемой происходящими в таких системах процессами. Эта информация в подавляющем большинстве случаев не поддается адекватной оценке без использования информационного анализа и информационных технологий. А это бывает крайне необходимо в условиях "уникального выбора"², ошибки которого в современном мире могут стоить очень дорого (например, при принятии решений в области энергетики и природопользования).

Поэтому разработка системных и информационных методов изучения процессов, протекающих в сложных системах, является актуальной задачей, которую предстоит решать для достижения устойчивого развития человеческой цивилизации, которую серьезные глобальные, например экологические, проблемы, по всей видимости, ожидают уже в следующем столетии.³

Наиболее ярко это видно на примере процессов, протекающих в сложных системах, находящихся в переходной фазе. К таким системам относятся страны с переходной экономикой или эколого-экономические системы. Применение классических методов экономической науки к анализу протекающих в указанных системах процессов наталкивается на серьезные трудности, поскольку данные методы создавались для изучения простых систем с неизменной структурой, которые находятся в устойчивом, хотя, возможно, и квазиравновесном, состоянии, и плохо применимы к сложным системам, переходящим из одного состояния в другое, особенно если такой переход сопровождается сильным изменением структуры системы.

То же самое относится к информации, которой сопровождаются такие процессы. Если в период нахождения системы в устойчивом состоянии информация извлекается, обрабатывается и используется вполне определенными и неизменными на протяжении продолжительного

¹ Forrester J. W. Counterintuitive Behaviour of Social Systems // Technology Review. – 1971. – Vol. 73. – No. 3. – P. 53-68.

² Ларичев О.И., Мошкович Е.М. Качественные методы принятия решений: вербальный анализ решений. – М.: Наука; Физматлит, 1996. – 208 с.

³ Медоуз Д.Л. За пределами роста. – М.: Прогресс; Пангея. – 304 с.

временного интервала методами, то в переходный период изменяется не только качественный и количественный состав информации, но и технологии, связанные с ее переработкой. Примером этому могут служить переход на новую систему национальных счетов, с одной стороны, и бурное развитие в последние десятилетия информационных технологий, сопровождающее так называемый переход в новую "информационную"⁴ ("постиндустриальную"^{5,6} или "технотронную"⁷) стадию развития общества в некоторых странах мира (например, в США, Японии, Корее и др.), с другой стороны.

Исследованию процессов, протекающих в сложных системах, посвящено значительное число работ. Среди них особое место занимают работы в области системного анализа, зарождение которого началось еще в античной греческой философии (Платон, Аристотель⁸, стоики, Евклид). Именно тогда впервые возникли представления о системе (от греч. *συστήμα*) как о совокупности элементов, находящихся в структурной взаимосвязи друг с другом и образующих определенную целостность. Затем эти представления получили дальнейшее развитие в работах Николая Кузанского, Спинозы, Канта, Шеллинга, Гегеля, Маркса и других известных мыслителей. Практически трудно найти того или иного мыслителя, который в той или иной мере не затрагивал этой темы.

Тем не менее, только в XX веке системный подход был существенно развит и привел к зарождению системного анализа. Так, например, австрийский ученый Людвиг фон Берталанфи^{9,10} в 30-40^е годы успешно применил системный подход к описанию биологических процессов и ввел понятие открытой системы. Однако еще в начале XX века (1912-1928 гг.) методология системного анализа была заложена русским ученым А.А. Богдановым, который пытался разработать новую науку об организации ("тектологию"¹¹) и тем самым предвосхитил основные идеи кибернетики, развитые позднее группой ученых во главе с Н. Винером¹², У.Р. Эшби¹³ и другими учеными в 40-50^е годы. Кроме того, отражение системного подхода можно найти в работах В.И. Вернадского,

⁴ Белл Д. Социальные рамки информационного общества // Новая технократическая волна на Западе: Сб. статей. – М.: Наука, 1986. – С. 330-342.

⁵ Toffler A. The Third Wave. – N.Y., 1980. – P. 220.

⁶ Яковец Ю.В. Формирование постиндустриальной парадигмы: истоки и перспективы // Вопросы философии. – 1997. – №1. – С. 3-17.

⁷ Brzezinski Zb. Between Two Ages / America's Role in the Technotronic Era. – N.Y., 1970. – P. 9.

⁸ См., например, Аристотель Метафизика // Сочинения: В 4 т. – М., 1975. – Т.1. – С.148-149, 174-175.

⁹ Bertalanffy L. von General system theory – critical review // System Behavior. – Edited by J. Beishon and G. Peters, by Harper and Row Publishers, London, NY, Hagerstown, SF. – 1972. – P. 30-50.

¹⁰ Берталанфи Л. фон. История и статус общей теории систем // Системные исследования. Ежегодник 1973. – М., 1973. – С. 20-36.

¹¹ Богданов А.А. Тектология: Всеобщая организационная наука. – В 2-х кн. – М., 1989.

¹² Wiener N. Selected Papers. – Cambridge, Massachusetts Institute of Technology, 1964; в рус. пер. – Кибернетика и общество. – М., 1958.

¹³ Эшби У.Р. Введение в кибернетику. – М., 1978.

Т. Котарбиньского, Б. Рассела¹⁴, А. Тойнби и других исследователей XX века. Позднее, в 60-70^е годы системный анализ становится базовой методологией в экономике, экологии, социологии, демографии, политике, военном деле и других областях.¹⁵ Следует отметить, что еще в 30-х годах XX века в некоторых экономических моделях уже присутствовали элементы системного анализа. Так, например, кейнсианская модель формирования совокупного спроса содержит обратные связи, приводящие к мультипликационным эффектам: положительная петля обратной связи между совокупным спросом и произведенным национальным доходом.¹⁶

Основателем системно-динамического направления является Дж.Ф. Форрестер. Исходя из теории систем, дифференциальных уравнений, компьютерного моделирования, он разработал принципы и аппарат "системной динамики", позволяющий анализировать и принимать управленческие решения. Им были созданы модель городской динамики, различные модели мировой динамики "Мир-1" и "Мир-2"¹⁷ (1971-1972 гг.), положившие начало глобальному моделированию, в рамках которого были разработаны следующие как системно-динамические, так и несистемно-динамические модели и проекты: "Мир-3" или "Пределы роста"¹⁸

Д. Медоуз (1972 г.); "Человечество перед выбором"¹⁹ М. Месаровича и Э. Пестеля (1974 г, концепция "органического роста"); "ЛИНК"²⁰ Л. Клейна (с 1968 г, синтез национальных моделей); глобальная межотраслевая модель^{21,22} В. Леонтьева. В 1988 г. тайландским ученым К. Саидом²³ была разработана системно-динамическая имитационная модель развивающихся стран, учитывающая взаимосвязь экономических, демографических, экологических, социально-политических и технологи-ческих факторов развития.

Причем, системно-динамические модели позволили увязать воедино многие сферы функционирования человеческого общества. Так, в рамках концепции "устойчивого развития"²⁴ в 1995 г. группой американских

¹⁴ Рассел Б. Человеческое познание. – М.: 1957. – С. 284-290.

¹⁵ Перегудов Ф.И., Тарасов Ф.П. Введение в системный анализ. – М.: Высшая школа, 1989. – 367 с.

¹⁶ Гальперин В.М., Гребенников П.И., Леусский А.И., Тарасевич Л.С. Макроэкономика. – СПб.: Изд-во СПбГУЭФ, 1997. – С. 74, 82-92.

¹⁷ Forrester J.W. World Dynamics. 2d Ed. – Cambridge, Massachusetts Institute of Technology, Portland, OR: Productivity Press, 1973. – 144 p.; в рус. пер. – Мировая динамика. – М.: Наука, 1978.

¹⁸ Медоуз Д.Х., Медоуз Д.Л. и др. Пределы роста. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. – 208 с.

¹⁹ Mesarovic M., Pestel E. Mankind at the Turning Point. Toronto, 1974.

²⁰ Клейн Л.Р. Проект ЛИНК // Экономика и математические методы. – 1977. – Т. 13. – Вып. 3.

²¹ Федосеев В.В. Экономико-математические методы и модели в маркетинге. – М.: Финстатинформ, 1996. – С.15-36.

²² Моришима М. Равновесие, устойчивость, рост. – М.: Наука, 1972. – 280 с.

²³ Khalid Saeed The Design of change for economic development: A behavioral modelling and simulation approach. – Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 1988. – 297 с.

²⁴ Папенков К. В. Экономика и природопользование. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1997. – 39-58 с.

ученых была создана модель "США на пороге XXI-го века"²⁵, которая моделирует развитие США с учетом экономических, демографических, экологических, социально-политических и технологических факторов. Аналогичные модели при поддержке Института Тысячелетия и Всемирного банка были созданы и создаются в настоящее время во многих странах мира (Таиланд, Тунис, Китай, Малави, Грузия, Армения и другие). Например, весной 1997 г. были завершены обобщенные системно-динамические модели для изучения динамики макроэкономических показателей Грузии и Армении²⁶, а в марте 1997 г. на проходившем в Токио Международном Форуме по Глобальному Моделированию был представлен доклад о возможном будущем для Бангладеш, Туниса и США, составленный на основе системно-динамических моделей, разработанных для данных стран. Все это было бы невозможным без использования современных информационных технологий и информационного анализа.

Поэтому большинство зарубежных моделей, используемых для анализа социо-эколого-экономических процессов, созданы и создаются в настоящее время на основе специальных сред разработки имитационных моделей. В настоящий момент времени известны такие наиболее распространенные среды разработки имитационных моделей как STELLA (Ithink), DYNAMO, VENSIM, POWERSIM. Они позволяют не только быстро создавать имитационные модели при помощи простых визуальных инструментов, но и проводить анализ работы созданных моделей и использовать данные модели для оценки воздействия управленческих решений на протекание социо-эколого-экономических процессов в моделируемых системах.

Что же касается развития системного анализа и системно-динамического направления в нашей стране, то здесь следует отметить, что системные исследования активно стали развиваться в бывшем СССР в 70-80 годы нашего столетия. Например, в ЦЭМИ АН СССР в 70-х годах была разработана эконометрическая модель экономики США²⁷, предназначенная для среднесрочного прогнозирования; в СО АН СССР был разработан ряд эконометрических моделей²⁸ (например, С-106 и МОПЕК), моделирующих экономику различных стран в период с окончания второй мировой войны; в МГУ им. М.В. Ломоносова разрабатывались имитационные модели экономики СССР;²⁹ в ЛГУ были построены модели управления системой образования,³⁰ в вычислительном центре АН СССР в начале 80-х годов исследовательской группой под руководством

²⁵ <http://www.igc.apc.org/millennium/t21>

²⁶ Millennium Institute: News for friends. – <http://www.igc.apc.org/millennium/news/friends5.html>, March 1997. – P. 3.

²⁷ Чижов Ю.А. Модель экономики США. – Новосибирск: Наука, 1977.

²⁸ Китова Г.А., Кузнецова Т.Е. Имитация и прогноз экономического развития США. Прикладные макромоделли. – М.: Наука, 1972.

²⁹ Ефимов В.М. Имитационная игра для системного анализа управления экономикой. – М.: Наука, 1988. – 255 с.

³⁰ Федотов А.В. Моделирование в управлении вузом. – Л.: Изд-во Лен. ун-та, 1985. – 120 с.

академика Н.Н. Моисеева была создана имитационная модель глобальных экологических изменений.³¹

В настоящее время работы в направлении имитационного моделирования ведутся во многих учебных и научных учреждениях. Однако большая часть исследований проводилась в рамках системного анализа, а системно-динамическим исследованиям отводилась второстепенная роль. Тем не менее, в данном направлении работы велись и ведутся как по созданию системно-динамических имитационных моделей, так и по разработке отечественных сред разработки имитационных моделей. Так, в МИУ (ГАУ) им. С. Орджоникидзе на основе DYNAMO была разработана среда для разработки имитационных моделей ИМИТАК³², при помощи которой были созданы региональные модели сельского хозяйства. В ЦЭМИ были созданы и использовались для имитационных моделей такие языки программирования, как GPSS, PLIS и SIMULA.

Если в период "холодной войны" системный анализ и системная динамика, а также разработка имитационных моделей носили ярко выраженный идеологический и политический характер, то в настоящее время в области системных исследований все больше и больше развивается международное сотрудничество как в области научных исследований и образования, так и в сфере применения имитационных моделей в бизнесе (управленческий консалтинг). Так, например адаптацией имитационных моделей, разработанных группой под руководством Д.Ф. Форрестера (Массачусетский технологический институт, Дармутский колледж), а также разработкой на их основе собственных моделей занимаются в МГУ, МГИМО, НИИСИ, МИФИ, Институте кибернетики им. В.М. Глушкова АН Украины и других организациях. В 1992 г. на базе НИИСИ был организован Институт системного анализа РАН (ИСА РАН), а в марте 1996 г. в Москве был учрежден Международный комитет по общим системам.

Среди современных работ в области системной динамики и имитационного моделирования можно отметить работы зарубежных и отечественных ученых, таких как Дж.Ф. Форрестер, Дж. Стерман, Д.Л. Кауфман, М.Р. Гудман, Н. Робертс, Донелла и Деннис Медоузы, М. Месарович, Е. Пестель, Т.К. Абдель-Хамид, Д.Ф. Андерсен, Р.А. Кларк, А. Форд, Д.Н. Ким, Дж.Д. Морекрофт, П.М. Миллинг, Ж.П. Ричардсон, Е.Б. Робертс, Х. Саид, П.М. Сенж, К. Ванг, Е.Ф. Фольштейнхолм, Р. Зараза, Н.Н. Моисеев, Т. Нейлор, А.Г. Гранберг, В.С. Дадаян, Н.В. Чепурных, А.Л. Новоселов, В.И. Дудорин, В.Г. Соколов, В.А. Смирнов, Р.В. Игудин, Д.М. Хомяков и П.М. Хомяков, А. Рыженков, и других авторов (наиболее полный библиографический список работ по

³¹ Моисеев Н.Н. Алгоритмы развития. – М.: Наука, 1987. – 303 с.

³² Дудорин В.И., Алексеев Ю.Н. Системный анализ экономики на ЭВМ. – М.: Финансы и статистика, 1986. – С. 17.

системной динамике и информационно-системному анализу, начиная с 1967 г. по настоящее время содержит более 3000 работ³³).

Помимо этого необходимо отметить работы таких зарубежных и отечественных ученых в области "устойчивого развития", экономики природопользования и охраны окружающей среды, как А. Маркандия, Д. Пирс, Дж. Диксон, Т. Титенберг, Т.С. Хачатуров, С.Н. Бобылев, А.Л. Бобров, К.В. Папенков, А.А. Голуб, Е.Б. Струкова, Н.П. Тихомиров, М.Я. Лемешев и другие.

Кроме того, для практического применения системно-динамических моделей в образовательном процессе необходимо отметить работы по игровому имитационному моделированию (деловым играм) таких авторов, как И.М. Сыроежин, А.А. Вербицкий, Л.Н. Иваненко, Д.Н. Кавтарадзе, М.М. Крюков, Л.И. Крюкова, В.М. Ефимов, В.Ф. Комаров, В.Н. Макаревич и другие.

Теперь кратко остановимся на содержании учебного пособия. Если в первой (последней) главе обсуждаются основные понятия и аппарат (выводы) системной динамики, то основной акцент делается на второй главе, в которой приводятся и обсуждаются основные модели, связанные с описанием эколого-экономических процессов. Причем, степень сложности моделей нарастает от первого к последнему параграфу главы. При этом, если простые модели, в основном, знакомят читателя с процедурой построения системно-динамических моделей, то более сложные модели носят прикладной характер.

Хотя в работе рассматривается значительное количество примеров системно-динамических моделей, их математическое описание, а также некоторые иллюстрации вынесены в приложения. Это обусловлено, прежде всего, объемом системно-динамических моделей и тем, что обычно введение в основной текст большого количества "технических подробностей" заметно снижает его восприятие читателем. Все цитируемые в работе модели были переведены автором с английского на русский язык. Некоторые из них были видоизменены для удобства восприятия и дальнейшего анализа. Кроме того, математическое описание всех моделей (цитируемых и построенных автором) было единообразно оформлено по составляющим структуру элементам для их дальнейшего анализа и использования в среде разработки имитационных моделей VENSIM, русифицированной автором. Тем не менее, это описание можно с небольшой модификацией использовать и в других средах разработки системно-динамических имитационных моделей, таких как STELLA (Ithink), DYNAMO, POWERSIM, ИМИТАК и других. Кроме того, для анализа и сопоставления в приложении приводится математическое описание построенной автором модели использования природных ресурсов

³³ См. System Dynamics Group 1997, Publications List. System Dynamics Group. Sloan School of Management. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, <http://www.mit.edu/sdg>, <http://sysdyn.mit.edu>

как на языке VENSIM, так и в стандартной форме на языке обыкновенных дифференциальных уравнений.

В конце учебного пособия имеется глоссарий, содержащий основную терминологию, и предметный указатель.

Автором были учтены зарубежные учебные пособия и книги по системной динамике:

- 1) *Forrester Jay W.* Industrial Dynamics. – The MIT Press, Cambridge, MA, 1961. (в рус. пер. Основы кибернетики предприятия. – М.: Прогресс, 1971.)
- 2) *Forrester Jay W.* Principles of System. – The MIT Press, Cambridge, MA, 1968.
- 3) *Forrester Jay W.* Urban Dynamics. – Productivity Press, Portland, OR, 1969. (в рус. пер. Динамика развития города. – М.: Прогресс, 1974.)
- 4) *Forrester Jay W.* World Dynamics. 2d Ed. – The MIT Press, Cambridge, MA, 1973. (в рус. пер. Мировая динамика. – М.: Наука, 1978.)
- 5) *Richardson G.P., Pugh A.L.* Introduction to System Dynamics Modeling with DYNAMO. – The MIT Press, Cambridge, MA, 1981.
- 5) *Wolstenholme Eric F.* System Enquiry, A System Dynamic Approach. – John Wiley & Sons, New York 1990.
- 6) *Senge M.P.* The Fifth Discipline – Doubleday, New York, 1990.
- 7) *Meadows Donella H., Meadows Dennis L., Randers Jorgen and Behrens, III William W.* The Limits to Growth. – Universe Books, New York, 1972. (в рус. пер. Пределы роста. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991.)
- 8) *Meadows Donella H., Meadows Dennis L., Randers Jorgen* Beyond the Limits. – Chelsea Green Publishing Company, Post Mills Vermont, 1992. (в рус. пер. За пределами роста. – М.: Прогресс; Пангея, 1992.)
- 9) *Meadows Dennis L. et al.* Dynamics of Growth in a Finite World. – The MIT Press, Cambridge, MA, 1974.
- 10) *Morecroft John D. W., Sterman John D.*, Modeling for Learning Organizations. – Productivity Press, Portland, OR, 1994.
- 11) *Kauffman D.L.* Systems 1: An Introduction to Systems Thinking. – Minneapolis, MN, S.A. Carlton Publishers, 1980
- 12) *Goodman M.R.* Study Notes in System Dynamics. – Portland, Oregon: Productivity Press, 1974.
- 13) *Nansy R. et al* Introduction to Computer Simulation: A System Dynamics Approach. – Portland, Oregon: Productivity Press, 1983.
- 14) *Miller Jr.* Living in the Environment. 9th Ed. – Wadsworth Publishing Company, Belmont CA, 1996.
- 15) *Peterson D.* Simulations for Miller's Living in the Environment. 9th Ed. – Wadsworth Publishing Company, Belmont CA, 1996.

Глава 1

ЯЗЫК СИСТЕМНОЙ ДИНАМИКИ

§1.1 Концепция системной динамики

Классификация систем

Изучая экономические, экологические, социальные и другие сложные (понятие сложной системы будет объяснено далее) системы, многие исследователи пытались описывать их при помощи набора довольно простых математических моделей, которые строились для одного или нескольких элементов системы, как правило, при фиксированных внешних параметрах. Таким образом, задачи, связанные с изучением сложных систем, сводились путем редукции к набору относительно простых задач, решаемых классическими математическими методами. Примером этому может служить "Экономикс"³⁴, представляющий собой "мозаичный" набор простых моделей, описывающих отдельные элементы экономической системы. Конечно, во многом такой подход оправдан с образовательной точки зрения, но из-за широкого спектра моделей довольно часто исчезает из поля зрения целостность изучаемой большой системы и связанное с этим поведение системы, как целого.

Часто поведение сложных систем отличается от суммарного поведения ее элементов, поскольку они "принадлежат к классу систем с многоконтурными (дублирующими) нелинейными обратными связями".³⁵ Особенно отчетливо это прослеживается на примере эколого-экономических систем, в которых переплетаются между собой как отношения человека к природе и ее ресурсам, так и взаимоотношения между людьми.

Кроме того, если в простых системах существует единственная причинно-следственная связь между элементами простой системы, локализованная в пространстве и во времени, то "в сложных динамических системах, причины часто отделены от следствий, как в пространстве, так и во времени"³⁶, поскольку элементы сложной системы связаны большим

³⁴ Макконел К. Р., Брю С.Л. Экономикс. В 2-х т.: Пер. с англ. 11-го изд. Т.1-2 – М., Изд-во "Республика", 1995. – 800 с.

³⁵ Forrester Jay W. Counterintuitive behavior of social systems. – <http://www.sysdyn.mit.edu/roadmaps/rml/D-4468>, 1995. – Р. 2.

³⁶ Там же. – Р. 10.