ИГОРЬ АНДРЕЕВИЧ ПОЛЕТАЕВ

1915–1983

Новосибирск
Издательство Института математики
2015

УДК 519.8
ББК 22.18
И269

Игорь Андреевич Полетаев. 1915–1983/ Отв. ред.-сост. А. А. Титлянова. — Новосибирск: Издательство Института математики, 2015. — 160 с.

ISBN 978–5–86134–155–4

Книга посвящена идеям И. А. Полетаева в области разработки общей теории систем с лимитирующими факторами и приложениям этой теории к моделям биологических и производственных процессов. В книгу включены три статьи И. А. Полетаева, а также отредактированная автором первая часть недописанной книги «Математические модели и системы Либиха». Кроме того, в книге приводятся воспоминания друзей и отрывок из неизданной книги И. А. Полетаева «Мориалогия».

Книга предназначена для широкого круга читателей.

УДК 519.8
ББК 22.116
И269

$И\frac{1402000000\text{-}01}{Я82(03)\text{-}15}$

ISBN 978–5–86134–155–4

Содержание

Введение 4

Работы И. А. Полетаева 7
И. А. Полетаев. Математические модели и системы Либиха 9
Ю. И. Гильдерман, К. Н. Кудрина, И. А. Полетаев. Модели Л-систем (системы с лимитирующим фактором) 51
И. А. Полетаев. К определению понятия информации. I. Семантический аспект. Об «информации» по смыслу 66
И. А. Полетаев. К определению понятия информации. II. Прагматический аспект. О ценности информации 81
И. А. Полетаев, А. А. Титлянова. О «теории» явления жизни 92
Мориалогия 97

Об И. А. Полетаеве — друзья и сотрудники 121
С. С. Кутателадзе. И. А. Полетаев и кибернетика 122
А. А. Титлянова. Разговоры с Полетаевым 124
Р. Е. Кричевский. Игорь Андреевич Полетаев (1915–1983) 128
Стихи Юрия Гильдермана 130
О. З. Каганова. Памяти И. А. Полетаева, тридцать лет спустя 140

Семинар, посвящённый 100-летию со дня рождения И. А. Полетаева. 2 февраля 2015 г. Новосибирск, ИМ СО РАН 142
Программа семинара 142
В. Л. Гавриков, Р. Г. Хлебопрос. Подход «микро-макро» в моделировании роста дерева и проблема бессмертия 143
В. П. Голубятников, В. А. Лихошвай. Осциллирующие и хаотические траектории в моделях генных сетей 153
Г. Ю. Ризниченко. Игорь Андреевич Полетаев, кибернетика и синергетика 159

Заключение 161

Введение

Игорь Андреевич начал свои университеты в 1930 году пятнадцатилетним учеником слесаря на московском заводе «Динамо». Затем окончил школу, после школы — МЭИ и поступил в аспирантуру того же института. Последний год аспирантуры был прерван войной. Игорь Андреевич прошел войну с июля 1941 года по февраль 1945 года боевым офицером, был ранен, награжден орденами и медалями.

Инженер-полковник И. А. Полетаев

Диссертационную работу, посвященную физике газового разряда, Игорь Андреевич защитил в 1948 году. После 1948 года работал в военных НИИ и активно занимался применением кибернетики в военном деле. В 1961 году И.А. Полетаев уволился в запас из рядов Советской Армии и до дня своей смерти работал в Институте математики СО РАН.

И. А. Полетаев сформулировал несколько фундаментальных принципов управления и взаимодействия в сложных системах. Эти принципы позволили ему и его ученикам построить математические модели взаимодействия экономических районов и государств, учитывающие такие важные факторы, как кооперация, торговля, сосуществование, а также модели дискретных процессов производства и управления.

Главное достижение И.А. Полетаева — разработка общей теории систем с лимитирующими факторами и приложение этой теории к моделям биологических и производственных процессов. Предложенные Игорем Андреевичем модели роста растений и модели биоценозов — важный шаг в теоретической и математической биологии. Блестящая эрудиция, полемический дар, разносторонность, талантливость во многих областях, необычайная живость и острота ума — таким остался Игорь Андреевич Полетаев в памяти друзей, коллег, учеников.

Несколько наиболее известных печатных работ И.А. Полетаева (см. также библиографию по «Системам Либиха» на стр. 49):

1. Полетаев И. А. Сигнал. О некоторых понятиях кибернетики. М.: Советское радио, 1958. 400 с.
   Перевод книги: на болгарский язык — 1960 г. (София), на чешский — 1961 г. (Прага), на польский — 1961 г. (Варшава), на немецкий — 1964 г. (Берлин), на японский — 1971 г. (Сиаба).

2. Полетаев И. А. О некоторых моделях биогеоценозов. Труды совещания по применению математических методов в биологии. 1965.

3. Полетаев И. А. К определению понятия «информация». I. Семантический аспект. Об «информации по смыслу». В кн.: Исследования по кибернетики. М.: Советское радио, 1970. С. 211–227.

4. Полетаев И. А. К определению понятия «информация». II. Прагматический аспект. О ценности информации. В кн.: Исследования по кибернетики. М.: Советское радио, 1970. С. 228–239.

5. Полетаев И. А. (совм. с Кудриной К. Н., Гильдерманом Ю. И.) Модели Л-систем (систем с лимитирующими факторами). В кн.: Исследования по кибернетике. М.: Советское радио, 1970.
Рассматриваются модели систем, функционирование которых определяются наличием «узкого места» или «лимитирующего фактора» («принцип Либиха»).

6. Полетаев И. А. О математическом моделировании. Проблемы кибернетики. М., 1973.

7. Полетаев И. А. Модели Вольтерра «хищник — жертва» и их обобщения с использованием принципа Либиха. Журнал общей биологии. 1973. Т. 34. №1.

8. Полетаев И. А. О некоторых математических моделях популяций с учётом влияния окружающей среды. Журнал общей биологии. 1979. Т. 40. Вып.6.
Построено несколько упрощённых математических моделей популяций, взаимодействующих с окружающей средой. Модели используют формализованный «принцип Либиха».

9. Полетаев И. А. Учёт влияния температуры в математических моделях развития растений с использованием «принципа Либиха». 1979. Известия СО АН СССР. Сер. биол. Вып. 3.

10. Полетаев И. А. О «формуле роста» Шмальгаузена. 1980. Известия СО АН СССР. Сер. биол. Вып. 5.

Работы И. А. Полетаева

В 1975 году И. А. Полетаев фактически закончил вводную часть (часть 1-ая) к предполагаемой книге «Математические модели и системы Либиха».

Вводная часть включала кроме предисловия первую главу о терминологии и попытке определения, главу 2 — о том, как строятся модели, и главу 3 — зачем строятся модели.

Эти разделы написаны интересно и строго, их полезно прочесть каждому, кто собирается заняться моделированием. Своего общего значения мысли И. А. не утратили до сих пор.

Следующие части (2 и 3) были написаны вчерне, обсуждались на семинарах и на кухне за чаем. Однако автора эти тексты не устраивали по нескольким причинам. Одна из причин — полная неясность многих механизмов биологических, физиологических и экологических явлений и процессов. Со временем дискуссии прекратились, а черновые страницы куда-то исчезли. Будем благодарны тому, что осталось. Мысли И. А. по-прежнему строги и интересны.

К публикуемому тексту рукописи И. А. Полетаева примыкает отрывок из статьи Ю. И. Гильдермана, К. Н. Кудриной и И. А. Полетаева «Модели Л-систем (системы с лимитирующими факторами)». В этой статье Игорь Андреевич описывает подход к математическому моделированию, основанный на рассмотрении систем с лимитирующими факторами.

Далее помещены две статьи Игоря Андреевича, связанные с определением понятия «информация».

... В последние годы своей жизни Игорь Андреевич размышлял о том, что такое жизнь, обсуждая со мной отдельные положения, и предлагал найти примеры или величины, иллюстрирующие некоторые тезисы его «теории» (он всегда ставил слово «теория», если говорил о явлении жизни, в кавычки). В результате его работы и моей посильной помощи появился машинописный набросок, датированный 19.08.82 и озаглавленный в обычной манере Полетаева: «Безответственная, нахальная и фантастическая программа построения «теории» явления жизни».

В предлагаемом тексте приведены его тезисы (полужирный шрифт), мои примеры и дополнения, содержание которых рассматривалось нами совместно при обсуждении некоторых пунктов (обычный шрифт).

Прошу иметь в виду, что мой текст написан также в начале 80-х, никаких исправлений или дополнений в него сейчас я не вносила.

... Однажды в магазине при покупке ситца на кимоно, произошла некоторая неприятность, так как продавщицы были заняты сплетнями и на покупателей не обращали внимания. Полетаев провёл с продавцами краткую беседу, которую закончил словами: «Запомните?» Мы вышли из магазина с ситцем, долго смеялись, а потом вдруг я рассердилась.

— Полетаев! До чего же ты любишь людей пугать. Ты обожаешь валять дурака! Но надо же было в свое время завернуть на весь Союз дискуссию «Физики и лирики»? Люди-то всё всерьез приняли, а тебе хаханьки. Кстати, наш сибирский довольно известный поэт написал стих по этому поводу, и там есть такие слова: «И может быть, найдётся свой Игорь Андреевич Полетаев, который скажет, что устарел Ньютон в век стихов и музык. И кто-нибудь ответит ему, что взгляд его слишком узок.» Видишь, уже предсказывают появление Анти-Полетаева?

— Господи, — взмолился Полетаев, — и почему же так много дураков? И к тому же везде! А не написать ли мне книгу о дураках? А??

— Лучше бы ты писал книгу о моделировании, — в сто первый раз взвилась я.

— Успокойся, голубчик, и имей в виду, что методы моделирования преходящи, а дурак — вечен! Наука же должна заниматься фундаментальными вещами.

С тех пор время от времени Игорь Андреевич читал мне отрывки текста, которые частично вошли в рукопись «Очерк мориалогии (Опыт введения в науку)». Рукопись была закончена в 1974 году. Она содержала следующие разделы:

Предисловие ко введению. Гл. 0. Введение. Гл. 1. Мориаскоскопия и мориаграфия 1. Гл. 2. Мориаметрия и мориаграфия 2. Гл. 3. Мориагенезис и мориапоэз. Гл. 4. Морианомия, мориалексия, мориалор. Гл. 5. Мориаценология и мориаэтика. Гл. 6. Мориаэстетика и мориакультура. Гл. 7. Сексология, любовь как таковая и смежные вопросы. Гл. 8. Мориакратия. Д и власть. Гл. 9. Таксомория и мориапатия. Гл. 10. Мориафобия и мориафилия. Приложение. Форология и Тикусе.

В данную книгу включены три главы, в которых приведены исходные определения и общие положения мориалогии

А. Титлянова

И. А. Полетаев

Математические модели и системы Либиха

Новосибирск, 1975

> Математические теории не предназначены устанавливать истинную природу вещей; такие претензии к ним были бы неразумными. Их единственная цель состоит в координации физических законов, которые нам поставляет опыт, но которые без помощи математики мы не могли бы даже сформулировать.
>
> Анри Пуанкаре. «Гипотеза и наука»

ПРЕДИСЛОВИЕ

Эта небольшая книжка была задумана с целью одновременно «убить трех зайцев»: во-первых, изложить некоторые сведения о системах с лимитирующими факторами (или — Системах Либиха), во-вторых, продемонстрировать некоторые полезные естественнонаучные модели, построенные по образу Систем Либиха, и, в-третьих, изложить основные приёмы математического моделирования «для начинающих». Поговорка, сулящая неуспех погоне за числом зайцев, более одного, нам, разумеется, известна; однако нас она не обескураживает, ибо наши «зайцы» бегут, как мы надеемся, в одну сторону и все вместе; наши цели оказываются «попутными».

Несколько особняком стоит третья из поставленных нами целей. Нам, однако, жаль было бы от неё отказываться, ибо потребность в популярном руководстве по моделированию для лиц, никогда не имевших дела с моделями, весьма велика. Вся же обширная литература о моделях и моделировании, имеющаяся к настоящему времени, написана исходя из предположения, что читатель *уже* имеет достаточно полное представление о моделях и даже умеет подобные модели самостоятельно составлять. Практически отсутствует « книга» или «букварь» по математическому моделированию для естествоиспытателей. Этот несомненный пробел тем более досаден, что применения моделей становятся всё более многочисленными и популярными, что требует понимания «ремесла» составления моделей от большого контингента пользователей. Нередко настороженное и опасливое отношение к моделированию со стороны потенциальных пользователей объясняется просто непониманием элементарных фактов, относящихся к моделированию и моделям. Часто больше идёт разговоров о моделировании, чем строится моделей.

Мы не претендуем на составление «учебника» или написание обзора по методам моделирования. Мы берём на себя смелость всего лишь поделиться собственным скромным опытом, который может, как мы надеемся, оказаться полезным при составлении в будущем подобного учебника.

Материалы, относящиеся к системам Либиха, посвящены, в основном, естественнонаучным вопросам. Эти материалы почти целиком были опубликованы ранее в различных периодических изданиях и сборниках. Спрос на эти материалы побудил нас собрать их воедино в настоящей книжке, объединить и дополнить.

Моделей, относящихся к производственным или экономическим объектам, мы касаемся лишь вскользь, а моделей «информационных систем» и проблем «искусственного интеллекта» — вовсе не касаемся, поскольку наш опыт в этой области мал.

Первоначальный замысел Систем Либиха появился, созрел и был впервые использован в лаборатории математического моделирования Института Математики СО АН СССР (г. Новосибирск) в период 1967 – 1970 годов. В разработке общих вопросов, относящихся к Системам Либиха, и решении частных задач принимали активное участие Т. И. Булгакова-Эман, Г. И. Колесова, К. Н. Кудрина, Ю. И. Гильдерман и другие сотрудники лаборатории. Отдавая должное их усилиям и результатам, мы упомянули все оригинальные работы в литературных ссылках. Однако, разумеется, вся ответственность за изложенное ниже — падает исключительно на автора.

Мы далеки от мысли, что всё написанное ниже бесспорно и общеприемлемо. В области математического моделирования ещё не сложились общепринятые взгляды и положения; у каждого исследователя, использующего или составляющего модели, — свои излюбленные приёмы и предпочитаемые методы (аналогичное положение существовало в области программирования ЭВМ). Однако мы предлагаем наши приёмы в качестве «обмена опытом», не настаивая на их обязательности. Нам представляется важным ввести читателя в ремесло составления моделей и облегчить ему первые шаги в этой области. Сумели ли мы достичь желаемого, судить не нам.

Читателям, которые уже умеют строить модели, мы советуем пропустить вовсе, или только бегло просмотреть, первые три главы, они написаны для «начинающих» и «интересующихся».

Часть первая

О МОДЕЛЯХ ВООБЩЕ

Гл. 1. Терминология и попытки определений

1.0. По поводу определения термина «модель» написано так много, что мы не отважимся обозревать и, тем более, обсуждать всё написанное; для этого у нас не хватило бы времени, места и таланта. Однако, мы не можем целиком обойти проблему определения понятий, «игру в дефиниции», ибо мы должны сами придерживаться определённой осмысленной терминологии на протяжении этой книги.

Термин «модель» многозначен и применяется во многих, друг с другом не связанных смыслах. Каждый волен понимать его как ему удобно и как вздумается. Однако, во всех употребительных смыслах есть нечто общее; «модель» есть всегда модель «чего-то», причём модель есть «почти что то же самое, только не совсем».

Обиходными употреблениями слова модель являются, среди других, например, следующие:

модель — уменьшенная игрушечная или декоративная копия (например, корабля или самолёта);

модель — отдельный образец производственной серии (автомобиля, предмета одежды);

модель — (несколько в иностранном звучании) — образец, с которого следует брать пример, эталон, образцовый экземпляр;

модельный объект — например, подопытное животное, пригодное для фармакологического эксперимента вместо человека;

модель математическая — система знаков и операций над ними, отвечающая схеме и функции некоторого реального объекта;

модель логическая (алгебраическая) формальной теории — грубо говоря — математический объект, обладающий теми же свойствами, что и формальная теория (верны те же теоремы);

модель — миловидная девица, демонстрирующая предметы одежды.

Отметим ещё одно важное свойство того, что мы называем «моделью»: модель всегда сделана «кем-то» и «для чего-то». У неё есть «автор» и «пользователь», который её создал или выбрал в соответствии со свойствами моделируемого объекта и со своими целями и замыслами.

Попытаемся несколько подробнее рассмотреть создание модели.

1.1. Будем иметь в виду автора модели «A», объект моделирования «O» и модель «M».

Объект моделирования, как и всякий конкретный предмет, всегда многопланов и многозначен. Так (приведём известный пример), стеклянный сосуд может быть вместилищем для хранения влаги, орудием для бросания, предметом химического анализа, художественным произведением, инструментом (негодным) для забивания гвоздей, историческим памятником... и т. д. и т. п. Предмет объективно содержит в себе совокупность свойств, обеспечивающих его отличие от других предметов, — его «качество». Наблюдатель A, воспринимающий предмет O, может в качестве литературного (или только мысленного) его описания применить набор «признаков», отвечающих свойствам предмета и являющихся как бы знаками объективных свойств[1]. Признак имеет имя (наименование) и область значений. Так признаком может быть, например, цвет, а областью значений этого признака — все цвета видимого спектра от красного до фиолетового, их смеси («оттенки») и интенсивность. Заметим попутно, что обладание заданным признаком тоже может оказаться, в свою очередь, признаком; так, например, минерал обладает цветом, газ обычно им не обладает, стекло (оконное) — тоже. Фактически то, что мы назвали признаком, может быть представлено как математическая «переменная» с заданной областью значений (обычно — могущих быть выраженными числом). Те же из признаков, которые «либо присутствуют, либо отсутствуют», могут быть сопоставлены логическим переменным, принимающим только одно из двух значений — «да» или «нет».

Мы не станем заниматься трудным вопросом о том, «сколько» признаков может одновременно иметь тот или иной реальный объект, бесконечно это число или конечно, зависят ли значения признака от значений других признаков и т. д. Для нас важным фактом является то, что любое «описание» объекта всегда использует только конечное (и

[1] Часто в литературе по моделированию и по «теории измерений» вместо термина «признак» употребляют термин «свойство», «атрибут» и др.

притом — не очень большое) число признаков.

Разумеется, мы имеем право говорить о некотором воображаемом «полном» наборе признаков (скажем, в том смысле, что мы не в состоянии придумать ни одного лишнего). Однако, переходя к любому, так сказать, утилитарному (то есть, полезному для некоторой практической цели) описанию мы всегда выбрасываем этот воображаемый «полный» набор признаков почти целиком и оставляем лишь конечное множество, дающее описание объекта в некотором практически важном «смысле» или «аспекте».

Иногда приходится слышать, что поэты, в отличие от учёных, будто бы «воспринимают мир в целом, а не разлагают его на части». Это, по-видимому, — заблуждение! Все люди обладают примерно одним и тем же объёмом памяти и внимания для восприятия (и количеством бумаги — для описания); поэты лишь выбирают фантастические наборы признаков, не предназначенные ни для какого дела, и потому ошибочно полагают будто бы успевают думать сразу «обо всём».

Отбрасывание признаков есть то, что называется «абстракцией» или «абстрагированием». Чем меньше остаётся признаков в описании, тем оно «абстрактнее». Высшей степенью абстракции является, по-видимому, описание, состоящее из одного единственного признака: «существует как отдельный предмет». На этом уровне абстракции все дискретные объекты сопоставимы и потому можно людей «перечесть по пальцам» или построить любое другое соответствие двух конечных множеств. Арифметическая единица есть не что иное, как подобного рода «предельно абстрактный объект». Остаётся только удивляться, как много свойств оказывается у столь бедного, казалось бы, свойствами объекта. Ведь значительная часть математики построена исключительно вокруг этого единственного объекта.

Говоря о признаках, следует сказать, что часто два или более признаков оказываются взаимозависимыми. Так, например, деталь — болванка, предназначенная для прокатки, для начала обработки должна быть разогрета до нужной температуры и доставлена на рольганг прокатного стана; в этом случае признак «деталь готова к обработке» зависит от значения признака «деталь разогрета». Признак — «деталь готова» представляет собой конъюнкцию признаков «разогрета» и «доставлена». Последние два — независимы. Признаки «готова» и «разогрета» связаны импликацией: «если готова, то разогрета»; обратное неверно, ибо когда истинно «если ворона, то — птица», тогда может быть ложно — «если птица, то — ворона». Чтобы быть вороной, необходимо быть птицей, чтобы быть птицей, достаточно быть вороной. Если один признак необходим и достаточен для другого, то эти признаки эквивалентны; между ними существует импликация в обе стороны, они — равноценны и взаимозаменяемы.

Связи между признаками удобно и исчерпывающим образом описываются исчислением высказываний, исчислением предикатов или исчислениями более высоких порядков, описанными в математической логике. Полезно быть хотя бы немного знакомым с алгеброй Буля, дабы облегчить себе работу по выбору системы независимых признаков для составления модели.

Признак, значение которого зависит от значения переменной, например — числовой, называется предикатом. Предикатами удобно пользоваться при исследовании, например, свойств систем неравенств, что приходится делать довольно часто; мы в этом убедимся ниже.

Но вернёмся к моделям. Если мы имеем два объекта, описанные так, что наборы их признаков совпадают, то один из них является (точнее — может явиться) моделью другого. Разумеется, при этом другие признаки, не вошедшие в описания, но присущие объектам, могут и не совпадать.

Самолёт и его игрушечная модель имеют одинаковые пропорции и раскраску, но различный материал и назначение. Подопытное животное и человек имеют одинаковые реакции на медикаментозные средства, но в остальном — различаются. И т. д...

Чем больше использовано при составлении модели признаков, совпадающих с признаками объекта, тем подробнее модель. Если бы у объекта и у модели совпадали все признаки, (в смысле воображаемого «полного» списка признаков), то единственной моделью объекта мог бы оказаться только он сам из-за необходимости совпадения во времени и пространстве. Однако, в этом случае вряд ли допустимо было говорить о «модели». Таким образом, «в чём-то совпадая» с объектом О, модель М всегда и в принципе «чем-то отличается» от объекта.

1.2. При попытке понять (или «объяснить») термин «модель», интересно и поучительно проследить аналогию построения математических моделей естественных объектов с «алгебраическими моделями формальных систем».

Выражаясь не слишком строго, «формальная система» Ф, в математике и математической логике, состоит из множества «предметных переменных» (символов, принимающих различные значения из некоторой наперёд заданной области значений), «предметных констант», (символов с фиксированными значениями), «операций» или связок, предикатов и функций; система содержит в себе некоторое количество «аксиом» (всегда истинных в данной системе формул), из которых по правилам вывода средствами системы получаются следствия или теоремы. Формальная система Ф может иметь «интерпретацию». Интерпретацией T системы Ф называют всякую математическую систему, состоящую из непустого множества объектов M, множества операций над М таких, что каждой предметной константе в Ф соотносится элемент M, каждому предикату в Ф — отношение на M и каждой функции в Ф — операция над M. Если каждая формула или теорема, истинная в системе Ф, одновременно истинна и в интерпретации T, то интерпретацию T системы Ф называют её «моделью» (или «алгебраической моделью»).

В этом случае мы снова имеем перед собой «объект» — (формальную систему Ф), и её «копию» или модель — интерпретацию Т. И здесь можно говорить о «различии воплощения» и о «сходстве свойств», как и в случае моделей более общего характера.

1.3. Математические понятия позволяют более строго и точно определить соотношения объекта и модели. Для этого следует привлечь понятия «гомоморфизма» и «изоморфизма». Основой для этих понятий является «отображение». Стефан К. Клини в своей книге «Введение в математику» шутливо по форме, но с полной серьёзностью по существу, утверждает, что «стадо из четырёх овец и роща из четырёх деревьев находятся между собой в таком отношении, в каком ни одно из них не находится с кучей из трёх камней или с рощей из семи деревьев» ..., ибо, «не прибегая к пересчёту овец или деревьев, их можно попарно сопоставить друг другу, например, привязав овец к деревьям так, что каждая овца и каждое дерево будут принадлежать в точности к одной паре». Если имеется два любых конкретных или абстрактных, конечных или бесконечных множеств (наборов, коллекций, совокупностей и т. д.) и каждому элементу (члену, индивидууму, предмету и т. д.) одного множества поставлен в соответствие по некоторому правилу или закону (подобно тому, как овца, в примере С. Клини, привязана к своему дереву), один (и только один) элемент другого множества, то говорят, что имеется отображение первого множества «на второе» (или «во второе», если во втором множестве остаются «незанятые» элементы, на которые ничто не отображено) — «деревья, к которым не привязана ни одна овца».

Отображения могут строиться для множеств, на которых определены некоторые преобразования (например, для числовых множеств, умножение и сложение). Пусть имеем множество A (например, — положительных чисел), и операцию преобразования пары элементов в элемент того же множества, (например, умножение чисел). Пусть также имеем второе множество B (действительных чисел) и некоторую операцию на нём, (например, — сложение). Если теперь мы сумеем подобрать такое отображение множества A на множество B, что первому сомножителю из A будет соответствовать первое слагаемое из B, второму сомножителю — второе слагаемое, а произведению во множестве A — сумма во множестве B, то такое отображение A на B будет называться «изоморфным отображением» или «изоморфизмом».

Короче и точнее: если в A существует система преобразований, — $\Phi_A : (A \times A) \to A$ или $(A \times A \times A \times \ldots \times A) \to A$, а в B — $\Phi_B : (B \times B) \to B$ или $(B \times B \times \ldots \times B) \to B$ здесь $(A \times A \times A \times \ldots \times A)$ обозначает «декартово произведение» множеств, или — проще, — множество всех пар, как при умножении или сложении, или «энок» элементов множества, отображаемых при преобразовании на основное множество), то изоморфизм $I_{A,B}\colon A \to B$ есть такое отображение, при котором всегда

$$I_{A,B}(\Phi_A(a_1, a_2, \ldots a_K)) = \Phi_B(I_{A,B}(a_1), I_{A,B}(a_2), \ldots I_{A,B}(a_K)). \qquad (1)$$

Продолжая частный пример, заметим, что изоморфизмом множества положительных действительных чисел с операцией умножения на множество (всех) положительных действительных чисел с операцией сложения будет отображение, задаваемое логарифмом $b = \log_c(a)$ при некотором фиксированном основании c. Сумма логарифмов сомножителей равна логарифму произведения. Именно в силу этого изоморфизма и возможны вычисления с помощью таблиц логарифмов.

Изоморфное отображение по определению «взаимно однозначно» (то есть «каждая овца привязана к одному только дереву и к каждому привязана только одна овца»). Изоморфизм «рефлексивен» (каждое множество изоморфно самому себе), симметричен (если A изоморфно B, то B изоморфно A) и транзитивен (если A изоморфно B, а B изоморфно C, то A изоморфно C).

Ещё одним наглядным примером изоморфизма может служить отображение обычного, «физического» пространства на себя (или на такое же пространство), с изменением масштаба. Всё, что «делается» в первом (построение тел, фигур, их переносы, повороты и т. п.), повторяется во втором, но в уменьшенном или увеличенном масштабе. Поскольку изоморфизм есть отображение или соответствие не просто двух множеств, но двух множеств с определёнными на них операциями (а операция есть снова не что иное как соответствие), то можно сказать, фигурально выражаясь, что изоморфизм есть «соответствие соответствий». Иногда бывает удобно изоморфные объекты, рассматриваемые в аспекте только их свойств, по которым они изоморфны, не различать и считать их совпадающими; так, все евклидовы пространства одинаковой размерности считаются в математике попросту идентичными и не различаются.

Определение гомоморфизма очень похоже на определение изоморфизма, но отличается тем, что при гомоморфном отображении не требуется взаимной однозначности (не ко всякому дереву привязана овца, а к некоторым, может статься, привязано несколько). Гомоморфизм рефлексивен и транзитивен, но не обязательно симметричен. Однако, снова, — гомоморфизм (как и в формуле (1)), $G_{A,B} : A \to B$ есть такое отображение, при котором всегда

$$G_{A,B}(\Phi_A(a_1, a_2, \ldots a_K) = \Phi_B(G_{A,B}(a_1), G_{A,B}(a_2), \ldots G_{A,B}(a_K)). \quad (2)$$

Простым примером гомоморфизма может послужить ортогональная проекция трёхмерного евклидова пространства на плоскость, применяемая в техническом черчении. Множеством A служит здесь проектируемое трёхмерное тело и его окружение, множеством B изображение тела на плоскости и вся плоскость. Каждой точке тела сопоставлена одна точка проекции, но обратное неверно: одной точке проекции может соответствовать вертикальный отрезок (в случае проекции на горизонтальную плоскость), принадлежащий телу.

Приведём ещё примеры гомоморфных отображений.

Пусть множеством A служит множество всех натуральных чисел $A = \{1, 2, 3 \ldots\}$; отобразим это множество на множество $B = \{0, 1\}$, состоящее из двух чисел — нуля и единицы. Каждому чётному числу из A сопоставим «0» из B, а каждому нечётному — 1. Определим на множестве B операцию сложения как сложение по модулю два: $0 + 0 = 0$; $0+1 = 1+0 = 1$; $1+1 = 0$; и операцию (обычного) умножения. Нетрудно убедиться, что выполняется (2) и, следовательно, наше отображение A на B есть гомоморфизм. В самом деле — сумма (обычная) двух чётных или двух нечётных чисел — чётна, а сумма чётного и нечётного чисел — нечётна. Это точно соответствует операции сложения (по модулю два) образов чётных и нечётных чисел A и B. То же справедливо относительно операций умножения.

Ещё один пример, менее «формальный». Множеством A пусть служит множество всех военнослужащих, состоящее из всех солдат, всех сержантов и всех офицеров; множеством B будет «фактор-множество», по уставу состоящее из солдата, сержанта и офицера (представителей класса элементов множества A). Всё, что происходит в конкретной деятельности вооружённых сил, точно отображается на определённые уставом взаимоотношения категорий военнослужащих. При этом стираются все «чисто человеческие качества неповторимой личности» каждого индивида, но строго сохраняется всё, что необходимо для безупречного функционирования армии.

Гомоморфное отображение как бы «уже» или «беднее» изоморфного. Так, в случае проектирования на горизонтальную плоскость, движение проектируемого тела вправо или влево будет адекватно изображено на гомоморфной проекции; однако движение точно вверх или вниз (перенос без поворота) будет «потеряно» и не найдёт себе соответствия на горизонтальной проекции.

Снова прибегая к вольности речи, можно сказать, что при гомоморфном отображении происходит «стирание» свойств или признаков отображаемого объекта, «абстрагирование» от них.

1.4. Но вернёмся к нашим . . . моделям! Используя понятия изоморфизма и гомоморфизма можно очень чётко представить себе взаимоотношение объекта моделирования и модели. Обратимся к рис. 1.1[2].

Мы рассматриваем два разнородных объекта, A и B, и составляем их абстрактные описания O_1 и O_2 соответственно. При этом как бы отбрасываются некоторые свойства или признаки объектов[3], что отмечено на рис. 1.1 в виде стрелок к C_1 и C_2. Свойства C_1 объекта моделирования A мы считаем «несущественными» и не намерены их сохранять при моделировании. Свойства C_2 модели, хотя и не находят использования в модели, однако являются, обычно, именно теми свойствами, которые заставляют прибегать к моделированию (простота и доступность в обращении и т. п.).

Если между описаниями O_1 и O_2 существует изоморфизм, то объект

[2]Рисунок утрачен.

[3]Иначе можно сказать, что на объекты A и B мы «накладываем ограничения», запрещая им демонстрировать свойства, связанные с «отброшенными» признаками.

В может служить моделью объекта А (или наоборот!).

Следует сделать оговорку, что приведённая схема не является строгой в том смысле, что понятия изо- и гомоморфизма в данном случае, строго говоря, не применимы в их обычном математическом смысле. Эти понятия определены для формальных систем, а при моделировании мы имеем дело всего лишь с расплывчатыми «описаниями», не отвечающими обычно строгим определениям[4]. Математические понятия привлечены нами здесь не ради строгости, но лишь ради углубления и пояснения идеи моделирования.

В схему, приведённую на рис. 1.1, укладываются все или почти все примеры применения термина «модель», если, конечно, не требовать математической аккуратности определений.

1.5. Из схемы рис. 1.1 и из определения модели можно сделать несколько заключений относительно природы и свойств моделей.

Прежде всего ясно, что модель (В) и объект моделирования (А) могут иметь друг с другом, так сказать, мало общего, в частности они могут иметь совершенно различную физическую природу и даже быть «внешне» несхожими. Это имеет место, например, если мы моделируем механические или акустические колебательные системы с помощью электрических схем. Однако и в этом случае, как, впрочем, и во всех иных, гомоморфизм сохраняет подобие колебательных свойств и явлений и между колебаниями в моделируемой системе, и в модели всё время сохраняется точное соответствие.

Таким образом, модель может быть построена «из совсем другого материала», чем объект. Материальное воплощение модели часто называют её «метасистемой», а в случае моделирования посредством формальных приёмов (математические модели), — «метатеорией». Так, метасистемой модели колебательных процессов в предыдущем примере, служила радиотехническая (или просто — электрическая) схема. Если те же колебательные процессы моделировались бы посредством расчётов на математических формулах, то метатеорией модели послужил бы аппарат математического анализа, в частности — теория дифференциальных уравнений.

Далее, — очевидно, что для любого объекта можно построить необозримо много различных гомоморфных описаний. Поэтому число воз-

[4]В «теории измерений» с этим затруднением расправляются без труда, объявляя неформальные объекты «эмпирическими системами» и вольно присваивая им свойства формальных систем.

можных моделей объекта также может быть необозримо велико[5]. Это разнообразие увеличится, если учесть различные метасистемы, могущие послужить воплощению модели. Возможно, что не все мыслимые модели окажутся полезными или «разумными» (к этому вопросу мы вернёмся вскоре).

По характеру описания объекта и по способу воплощения модели можно строить классификации моделей. Такие классификации удобнее строить на примерах, так сказать, — «по ходу дела».

Приведённое выше описание соотношения модели и объекта моделирования, пожалуй, слишком «либерально». Согласно такому описанию в разряд «моделей» могут попасть и вовсе бессмысленные построения и сопоставления. Это описание, проиллюстрированное на рис. 1.1, следует рассматривать как необходимую, но недостаточную характеристику моделей. «Полезные», осмысленные модели тоже построены согласно этому принципу, но отвечают ещё некоторым требованиям чисто утилитарного характера. Последнее утверждение не вытекает из каких-либо абстрактных соображений, но продиктовано практикой; модель не может быть бесполезной или бесцельной.

Для того, чтобы сузить рамки определений, нужно вникнуть в применения моделей и в способы их составления.

Прежде всего полезно различать два типа моделей: модели «вещественные» и модели «знаковые». Первые суть реальные предметы вроде электрической схемы, выполненной из реальных деталей или образца машины, предназначенной для испытаний; вторые представляют собой совокупности символов и правил обращения с ними, отображающих соотношения реальных объектов. Последние суть не что иное, как «описания» реальных объектов.

Все математические модели без исключения являются знаковыми или «символическими». Их метатеорией является тот или иной раздел математики. Наиболее популярными при составлении моделей являются, по нашему мнению, системы дифференциальных уравнений, линейная алгебра, статистика и теория вероятностей.

В дальнейшем мы сосредоточимся исключительно на знаковых математических моделях.

1.6. Обратим внимание на два полезных понятия: «псевдомодель» и «сценарий». Оба они имеют прямое отношение к построению моделей,

---

[5] Люди с гуманитарной ориентацией в таких случаях могут говорить (впадая нередко в ошибку): «бесконечно велико».

оба представляют собой как бы варианты моделей, но настолько сильно вырожденные, что следует чётко отличать их от истинных моделей.

Пусть, например, в эксперименте получена последовательность отсчётов некоторой измеряемой величины и мы нанесли эти отсчёты на график. Мы можем подобрать некоторую математическую формулу, и даже не одну, которая, будучи изображена на графике, даст хорошее совпадение с экспериментальными данными, — кривая нашей функции пройдёт через нанесённые точки. Значит ли это, что мы построили математическую модель явления? Многие отвечают на этот вопрос утвердительно. И, понимая, что это не настоящая модель, обычно называют эмпирические формулы «функциональной» моделью. Мы не будем этого делать и в дальнейшем будем называть такого рода построения «псевдомоделью». Это слово не должно звучать презрительно, ибо псевдомодели весьма полезны и даже необходимы в технике построения настоящих моделей. Однако, псевдомодель очевидным образом лишена одного из наиболее привлекательных качеств моделей — их экспликативной функции — способности служить «объяснением» явления, давать ему понятную интерпретацию, «вести понятным путём от понятного к непонятному». Псевдомодели полезны для упорядочения эмпирических материалов, для интерполяций и даже, иногда, для экстраполяций на короткие (но — не на длительные!) отрезки времени. Они применяются, как правило, также для описания элементов модели и их свойств, где без них трудно было бы обойтись, и т. д. Важно только не смешивать псевдомодели с истинными моделями.

Второй термин — «сценарий» — означает заранее заданное расписание наступления событий в модели или в среде, в которой модель функционирует. Сценарий задаётся в виде таблицы или в виде алгоритма. Расписание поездов или занятий в школе дают типичные примеры сценариев. При построении моделей часто сценарий задаётся случайным процессом с помощью генератора случайных последовательностей. С помощью сценария можно задать изменения погоды в модели роста посева. Однако, если мы зададим в виде сценария последовательность фаз развития организмов (например — того же посева), мы не получим модели в полном смысле этого слова, а всего лишь псевдомодель.

1.7. Из всех явлений и объектов, которые могут подвергнуться математическому моделированию, мы выделим класс, который в дальнейшем будем рассматривать. Это — класс материальных объектов, обладающих «обменом веществ» или «метаболизмом». В силу этого мы будем называть этот класс — «метаболирующие системы». Примерами могут служить: живая клетка, организм, популяция организмов, биогеоценоз, химический реактор в действии, химическое или любое другое производство, отрасль промышленности, система производства в целом, экономический район, народное хозяйство и т. п.

В каждом из приведённых примеров и в любой метаболирующей системе присутствуют вещественные компоненты, подвергающиеся в процессе функционирования объекта хранению, перемещению в пределах системы, вовне её и извне, взаимодействию и переработке в ходе тех или иных процессов; эти компоненты мы будем называть в дальнейшем «обменными» в отличие от «фондовых». Последние составляют как бы «тело» системы и являются той основой, на которой протекают процессы, — катализатор химической реакции, орган или ткань в организме, станки и оборудование на производстве и т. п. Фондовые компоненты, как правило, не подвергаются изменениям в ходе процессов (хотя это и не исключено категорически), но необходимо присутствуют и являются условием протекания процессов. В качестве обменных компонент могут фигурировать запасы и потоки энергии в различных её видах. В пределах системы должны соблюдаться законы сохранения вещества и энергии, а также второй закон термодинамики.

Заметим, в заключение, что компоненты системы могут не быть независимыми; одна из компонент может входить в состав другой и быть её постоянным спутником, как, например, углерод входит в химический состав сахара или двигатель — в состав автомобиля.

1.8. Метаболирующая система может считаться «управляемой». Понятие «управления» принадлежит кибернетике и представляет собой, надо признаться, вряд ли наиболее слабое понятие. Мы не имеем возможности обсуждать этот трудный вопрос во всех подробностях. Наиболее популярной концепцией управления является, пожалуй, определение: управление есть любое воздействие на управляемый объект. Его мы и будем придерживаться, оговорив, впрочем, что в случае построения модели подобное любое управляющее воздействие является предметом выбора автора модели и задаётся им в виде сценария или же алгоритма, реагирующего на состояние системы или, наконец, по его собственному разумению и произволу — путём прямого вмешательства в процесс функционирования модели. Очень часто стратегия управления является предметом поиска («оптимальная стратегия управления») ради нахождения которой и строится модель.

Гл. 2. Как строятся модели

2.0. Математическая модель строится всегда, когда оказывается необходимым что-либо «сосчитать». Часто счёт ведётся по готовому трафарету или алгоритму, согласно уже готовой и вошедшей в традицию модели. Но бывает, что нужно построить правила и порядок счёта, тогда приходится строить модель.

В школьные годы каждый из нас чётко различал на уроках арифметики «примеры» и «задачки». Первые не требовали построения моделей, вторые — требовали и потому у некоторых из учеников вызывали затруднения и недовольство. Чтобы решить задачу из учебника мало уметь складывать и вычитать, нужно ещё чётко представить себе «как это происходит» и выделить нужные величины и их связи. Это, собственно говоря, и есть «математическое моделирование». После того, как стало ясно, что труба, наполняющая бассейн за два часа, вливает полбассейна в час, а та — что за четыре — четверть, остаётся только сложить половинку с четвертью и взять обратную величину, чтобы получить час двадцать минут, за которые бассейн наполняют обе трубы одновременно.

Построение утилитарных, то есть нужных для практики, моделей отличается только, быть может, меньшей ясностью представлений о моделируемом явлении. Дело в том, что мы всегда строим модель не самого явления, а лишь модель наших, правильных или нет, представлений о явлении.

Общий порядок работы при составлении модели можно представить в виде нижеследующего перечисления:

1) Уяснить задачу, ради решения которой строится модель.

2) Построить подробное описание моделируемого объекта, — применяя «системный подход».

3) Выбрать «метатеорию» модели, математический аппарат для её построения.

4) Произвести «кодировку» модели, — записать все гипотезы, заложенные в модель в виде математических соотношений относительно выбранных переменных.

5) Произвести серию просчётов с помощью модели («прогонов» модели) и зафиксировать результаты.

6) Произвести «верификацию» модели, — сравнить полученные на модели результаты с прямыми данными об объекте.

7) Внести корректировку в модель в соответствии с результатами верификации (быть может — построить новую модель!).

8) Перейти к использованию модели по её назначению, или, в случае неудачи, — начать всё сначала.

Прежде, чем перейти к более подробному описанию каждого из этапов, уместно заметить, что наиболее значительные результаты при использовании моделей получаются чаще всего когда модель бывает до крайности упрощена, когда отброшены все детали и оставлено лишь самое главное. Далее, уже зная основное, сравнительно нетрудно оказывается постепенно усложнять модель, уточняя и детализируя полученные данные и оставаясь, притом, в пределах уже известных, «интересных» для исследователя, границах.

Тем не менее сразу начинать с предельного упрощения довольно опасно. Гораздо надёжнее начать с противоположного конца и, начиная строить описание новой модели, пытаться сделать его возможно более подробным, близким к реальности, не забыв ни одной детали.

Когда такое описание составлено и продумано, не следует (как это ни странно), строить до конца модель в соответствии с ним. Следует приступить к последовательному упрощению описания, отбрасывая сначала наиболее маловажные свойства и признаки, а затем (набравшись духу) и те, отказаться от которых не хотелось бы, но которыми на первых порах работы, посвящённых грубому приближению, всё же следует пренебречь ради простоты модели. В процессе упрощения приходится и нужно широко пользоваться числовыми оценками, чтобы выяснить долю, вносимую в результат тем или иным ингредиентом системы.

2.1. Рассмотрим более подробно каждый из этапов построения модели.

Построению модели всегда предшествует чёткое представление о назначении модели, некоторая задача — требование на получение некоторого результата. Модель должна решить или помочь решению этой задачи, и лишь с этой точки зрения можно судить о её ценности или качестве. Поскольку подобного рода практическая задача возникает в пределах некоторой конкретной естественной науки, из арсенала которой будет черпаться материал представлений, необходимый при построении модели, постольку «хозяином» модели, её конструктором и потребителем всегда должен являться представитель данной области знаний, специалист, заинтересованный в получении результата и ответственный за его качество. Математик той или иной специальности, участвующий в построении модели, является исполнителем важной, но не главной роли. Это не значит, что математик не может или не должен самостоятельно строить содержательные модели; есть много примеров успешной деятельности такого рода. Нужно только не забывать, что приступая к самостоятельному моделированию, математик выходит за пределы своей специальности и берёт на себя ответственность за ту область знаний, к которой относится содержание модели (например, — экономика, производство, биология и др.). Если же математик сотрудничает в построении модели со специалистом, то на его долю падает ответственность за корректное применение математических формализмов, их усовершенствование и развитие и, быть может, — разработка новых.

Нам представляется, что математика, в том числе наиболее отвлечённые и далёкие от непосредственных практических задач прикладных наук её разделы, в истоке своём имеют модели практически важных ситуаций или явлений. Достаточно вспомнить возникновение основ теории вероятностей из моделей азартных игр, или современной теории игр из формализованной модели ситуации конфликта, или, наконец, появление алгоритмов линейной оптимизации из практических задач раскроя материалов и т. д. К этому надо добавить, что многие естественнонаучные явления, по-видимому, требуют построения новых математических методов и теорий; это особенно чувствуется, как нам представляется, в современной физике элементарных частиц, но не только там. Всё это сказано к тому, что математик, участвующий в построении моделей, вовсе не является «слугой» или исполнителем и совсем не обязан отказываться от своей специальности. Напротив, для него открывается огромное поле деятельности и приложения его профессиональных знаний и способностей. Вместе с тем он должен волей-неволей входить в «суть дела» и не бояться нарушить «чистоту» своей науки вмешательством в содержание модели, которую он, вместе с другими, строит.

Часто считают и заявляют что математика, в области моделирования, является всего лишь «языком» на котором излагаются содержательные идеи, относящиеся к предмету моделирования. Нам представляется такое высказывание лишь частично правильным. Разумеется, математика позволяет адекватно записать многие содержательные высказывания (при условии наличия правильной кодировки, о которой мы скажем ниже) и обладает строгой грамматикой; в этом отношении её можно уподобить языку. Но кроме этого математика располагает сильной собственной «семантикой», дающей возможность не только записывать высказывания, но и проверять их непротиворечивость, полноту, независимость и, так сказать, содержательную состоятельность. Она способна «отличить истину от лжи» или, лучше сказать, «произвол от доказательства». В математическом моделировании сила математики в том, что все выводы оказываются доказательствами и возможные ошибки оказываются лежащими лишь в формулировке содержания модели. Такие свойства не присущи «языку».

Попутно трудно воздержаться от замечания, относящегося к деятельности математика в области математического моделирования. Бывает, что «чистый» математик, взявшись за построение модели, оказывается в плену своих знаний и стремится построить модель так, чтобы оказались применимыми его излюбленные и хорошо ему известные из университетского курса алгоритмы и методы (чаще всего, — разработанные для решения некоторых древних естественнонаучных проблем). Для этого ему достаточно лишь немного «подстрогать» содержательные посылки модели, что он делает, не задумываясь, ибо не считает себя вполне ответственным за суть дела. Таким образом, рождаются часто встречавшиеся мне по разным поводам, «стохастические модели производства», «статистические теории популяций» или «кинетические модели организма» и т. п. В этом может и не быть вреда, но отсутствие пользы — более или менее несомненно. Позволив себе вольное сравнение, можно сказать, что математик в моделировании подобен кузнецу; он может ковать и мечи, и орала хорошо или плохо, но для того, чтобы изобрести лёгкую саблю вместо тяжелого двуручного меча, он должен стать воином, а чтобы заменить соху плугом — пахарем.

К этому хочется добавить, что существует два типа знаний: во-первых, знание учебников и, во-вторых, понимание связей всего сущего. Они не эквивалентны и не взаимозаменяемы. Превалирование первого типа и пренебрежение вторым порождают стремление всё неизвестное свести к существующим сегодня представлениям, а в случае неудачи заставляет прибегать к отказу от исследования («не научно!»). Второй тип знаний — постановка новых задач, поиск новых подходов и методов, не может принести успеха без основательного знакомства с уже завоёванными результатами, хотя и требует критического к ним отношения. Этот второй тип в случае редких успехов ведёт к расширению горизонтов науки и к фундаментальным открытиям.

2.2. Приступая к составлению математической модели некоторого объекта, исследователю рекомендуется применять уже установившуюся ремесленно совокупность приёмов, получившую общепринятое название «системный подход» или «системный анализ». Системный подход, по нашему мнению, является предварительным «литературным» этапом математического моделирования. Впрочем, не будем спорить, с равным правом можно объявить математическое моделирование «заключительным этапом» системного подхода.

Разумеется, системный подход — не панацея и потому, применяя (или не применяя) его, нужно быть готовым к тому, что придётся много и тяжко *думать*. Первым вопросом, над которым следует задуматься, применяя системный подход, будет вопрос о назначении модели, о задаче, которую предстоит решать с помощью будущей модели. О возможных применениях модели мы скажем ниже, а пока примем, что модель нужна для построения научной теории функционирования объекта моделирования.

Следующий этап системного подхода — выявление и обрисовка существенных для решения поставленной задачи черт, признаков, ингредиентов объекта; разделение объекта на части, вплоть до самых мелких частей — «элементов системы», которые уже не подлежат расчленению на более мелкие части. Далее следует достаточно подробное описание свойств элементов, в которое должен входить перечень «состояний» каждого элемента и правил, по которым эти состояния сменяют друг друга. В состав подобных правил входят влияния на состояние данного элемента состояний других элементов, взаимодействующих с ним. Совокупность состояний элементов, быть может с некоторыми дополнительными фактами, образует состояние системы, которое меняется вместе с изменениями состояний каждого из элементов системы. Попутно приходится решать вопрос, — меняются ли состояния элементов и системы непрерывно или дискретно, то есть скачками. С этим связан и выбор метатеории для построения модели.

Описанный таким образом объект моделирования превращается в «систему», готовую к следующему этапу моделирования — выбору метатеории и кодированию модели. Таким образом, «система» есть не что иное, как описание объекта моделирования, выполненное по некоторым правилам. Или, если угодно придать термину «система» более объективное звучание, «система» есть любой объект, описанный абстрактно с разбиением на элементы и указанием свойств элементов их состояний и взаимодействий.

Строя систему, следует чётко и тщательно провести границу между системой и «средой», окружающей систему и взаимодействующей с нею. Подчас это бывает нелегко сделать. В самом деле, — считать ли кислород, заполнивший бронхи и альвеолы лёгких млекопитающего принадлежащим организму животного, — вошедшим в систему, — или нет? Сырьё, хранимое на заводском или базовом складе, — пересекло ли оно уже границу системы производства? Каждый раз подобные вопросы должны быть решены (быть может — произвольно), и граница, пусть хотя бы воображаемая и условная, проведена и зафиксирована.

Далее следует выделить и зафиксировать существенные черты функционирования системы, в смысле решаемой моделью задачи, и выделить существенные признаки моделируемого объекта, которые должны быть отображены в модели.

Не существует ремесленных правил выделения «существенных» и «несущественных» признаков, явлений, процессов и т. п. Моделирование — скорее искусство (как и наука в целом), чем ремесло. Именно в отделении существенного от несущественного должны проявляться все черты «творчества», что бы это слово ни значило, — фантазии, интуиции, догадки (по возможности — гениальной!), и т. п.

В качестве тривиальных примеров перечислим несколько существенных и несущественных признаков объектов моделирования: так, в моделях производства, предназначенных для поиска рационального расписания работ, несущественным может оказаться физическая природа изделий, материал изготовления, технология, зато существенным будет перечень состояний полуфабриката, перечень типов станков для обработки, время операций обработки на каждом станке и т. п. И уж кардинально существенным окажется ответ на вопрос: является ли процесс производства непрерывным (прядильная, ткацкая, химическая промышленность) или дискретным (холодная обработка металла, литьё). В моделях биологических объектов несущественным может оказаться название вида, фактическая природа и состав химических веществ (например — гормонов, ядов), зато существенными — тип химической реакции, стехиометрические числа, черты поведения и т. п.

На этапе формулировки описания объекта в рамках системного подхода, даже если дальнейшая работа по составлению модели не будет продолжена, исследователь, как правило, начинает получать полезные результаты. Аккуратное и подробное изложение представлений об исследуемом (моделируемом) объекте позволяет заметить пробелы в имеющейся информации, обратить внимание на незамеченные ранее противоречия и сформулировать содержательные вопросы. Системный подход позволяет по-новому увидеть задачу, а порой, уже на этом этапе, заставляет переформулировать её.

2.3. При построении «системы», то есть описании объекта моделирования, может оказаться, что система распадётся не непосредственно на элементы, но на «блоки», состоящие в свою очередь из элементов или же блоков более мелких. Таким образом, появляется некоторая иерархия, как их не очень удачно принято называть, «уровней» или степеней деления, каждая из которых вкладывается в более крупную и содержит более мелкие. Нужно сказать, что представление об «уровнях» несколько примитивно и условно. Дело в том, что внутри системы может оказаться несколько шкал «уровней», — по пространственным масштабам, по временным и т. п., взаимоотношения которых подчас бывают сложны.

Создавая в модели иерархию «уровней», следует заботиться, во-первых, о том, чтобы таких «уровней» было не слишком много, иначе модель может оказаться слишком усложнённой и может «выйти из повиновения» в эксплуатации, а во-вторых, — и это важно, — о том, чтобы все блоки «одного уровня» были бы согласованы между собой по масштабам во времени и пространстве.

Модель, построенная в соответствии с правилами «системного подхода», позволяет перейти от гипотез, относящихся к элементам и их взаимодействиям, к описанию функционирования системы в целом. При этом описания и элементов, и системы относятся лишь к некоторому кругу явлений, а не представляют исчерпывающего представления объектов. Отсюда вытекает «существенность» или «несущественность» тех или иных признаков. Масштабы, как правило, определяют существенность признаков. Так, например, изучая отражение света или радиоволн от движущегося объекта, часто можно пренебречь скоростью самого объекта и считать его неподвижным по сравнению со скоростью света. Иногда можно считать «неподвижным» объект, движущийся с большой скоростью, например, если встаёт вопрос о пересечении его траектории медленно движущимся предметом, — прохождение самолёта через «неподвижный» луч посадочного радиолокационного устройства аэродромной службы. Можно воспользоваться другим примером, — исследуя изменения плодородия почвы или генетического состава сортового посева, можно и нужно пренебречь процессами ежегодного развития посева и флюктуациями погоды; если же составляется модель развития растения как организма в пределах одного сезона, то можно считать постоянными почвенные условия и генетические характеристики.

Упрощая описание объекта, приходится часто прибегать к «агрегированию» компонент, то есть к объединению в одно наименование нескольких различных в натуре веществ и существ. Так в моделях экономики вместо перечисления типов изделий по наименованиям считать единым продуктом «станки», «транспортные средства», «двигатели» и т. п. или, объединяя в ещё более крупные агрегаты, — «изделия машиностроительной промышленности». В моделях популяций и биоценозов часто прибегают к объединению популяций различных видов по признаку «общности потребления» корма (синузии) или общности пожирания одним хищником, или общности местообитания и т. д.

Часто в процессе укрупнения модели и отказа от деталей приходится несколько процессов, протекающих последовательно или параллельно, объединять в один. При этом важно не нарушить масштабы времени и правильно учесть задержку по времени, а также не ошибиться при оценке интенсивности суммарного процесса.

Приём агрегирования помогает избежать ситуации, когда система приобретает недопустимые размеры и сложность, что не только затрудняет, но подчас исключает саму возможность моделирования. Популярный термин «большая система» отражает эту ситуацию. Термин этот не следует всегда понимать буквально. Чаще всего он означает лишь то, что исследователь, строя модель, горит желанием сразу учесть так много подробностей, что у него на это не хватает средств. Если мы почему-либо ограничены возможностью работать только с двумя переменными, то система с тремя — уже окажется для нас «большой». Иногда ограничения касаются не числа переменных, а точности счёта или вынужденной его длительности. Порой подобную ситуацию бывает очень трудно обойти и возникают многочисленные и серьёзные проблемы, связанные с «большими системами».

2.3.1. При составлении описания системы нужно заботиться также о том, чтобы изменение состояния системы в данный момент времени зависело только от этого самого состояния и не зависело от состояний в предыдущие моменты. Иначе говоря, модель следует строить так, чтобы она обладала бы свойством «марковских» систем. Так если система содержит в себе некоторый механизм, представляющий собой задержку по времени (например, — транспортный механизм типа конвейера, на прохождение которого требуется определённый отрезок времени T), то в данный момент с выхода конвейера будет снята деталь, положенная на его вход T единиц времени тому назад. Иначе, — текущее состояние выхода конвейера, как части системы, зависит от её прошлого состояния. В этом и подобных случаях следует ввести в описание системы состояние конвейера в целом, — всех его позиций, и их перемещения в пространстве с течением времени. Аналогичные соображения могут быть высказаны, если мы имеем дело с трубопроводом, по которому течёт раствор переменной концентрации, или сосудом в тканях организма, проводящим растворённые метаболиты и т. д.

2.4. Построив «систему» исследуемого явления или объекта, следует подробно и чётко записать все предположения или гипотезы, принятые в процессе работы. Этим не следует пренебрегать, ибо без этого трудно уследить за последующими изменениями гипотез, которые неизбежно появятся в процессе работы и которые тоже следует тщательно регистрировать, во избежание трудностей и путаницы. Список гипотез полезно обсудить со специалистами и не только со специалистами данной области знаний. Особенно следует ценить при таких обсуждениях критические замечания, они могут оказаться весьма полезными при дальнейшей работе по усовершенствованию модели. Следует фиксировать варианты системы гипотез и все высказанные возражения. Если обсуждение по каким-либо причинам невозможно, исследователю-автору модели следует на некоторое время стать на точку зрения «предвзятого оппонента» и попытаться подвергнуть свою работу самостоятельно «критике на уничтожение». Это требует душевных усилий, умения отрешиться от пристрастия «изобретателя» к своей выдумке и, увы, далеко не всем доступно. Если не удалось, несмотря на честные усилия, опровергнуть самого себя, можно приступать к следующему этапу моделирования — выбору метатеории и кодированию модели.

2.5. Выбор метатеории модели, то есть аппарата того или иного раздела математики, чаще всего является либо традиционным, если модель принадлежит к некоторому классу уже существующих моделей, либо отражает склонности, симпатии и образование автора. Каких-либо строгих правил здесь не существует, и трудно было бы сформулировать. Можно только давать более или менее полезные советы.

Если изучаемое явление дискретно во времени, как, например, сбор урожая и посев или просто развитие фитоценоза за несколько сезонов, то естественно воспользоваться дискретной шкалой времени с шагом, равным периоду самого явления (сезон, год), приняв его за единицу. Тогда состояния системы будут описываться в моменты времени $T_0, T_1, T_2, \ldots$ и т. д., причём $T_{k+1} = T_k + 1$, где $k = 1, 2, 3, \ldots$ — номер периода. Такого рода дискретная шкала времени применяется, например, в моделях систем производства или экономики. Единицей измерения времени служит здесь «отчётный период», то есть месяц, квартал или год.

Непрерывная шкала времени применяется, если природа явления непрерывна, как в случае химических реакций или некоторых биологических процессов. В подобных случаях значения времени, как независимого аргумента, принадлежат множеству действительных чисел. Для дискретных задач естественно записывать переходы состояний системы с помощью алгебраических преобразований с использованием векторов состояния и операторов переходов (в линейном случае — матриц). В случае непрерывной шкалы времени чаще всего пользуются аппаратом дифференциальных и интегро-дифференциальных уравнений.

Сказанное выше не следует считать непреложным правилом. Для одного и того же объекта часто оказывается возможным выбирать непрерывное или дискретное представление, — по произволу.

То же справедливо не только для шкалы времени, но и для компонент модели. Непрерывные по природе своей компоненты можно представлять в модели дискретными «порциями». Весьма часто также дискретные объекты, которые естественно было бы задавать целочисленными переменными, задаются, однако, действительными числами, вернее, — действительными (непрерывными) переменными. Так — изменения поголовья популяции моделируют с помощью дифференциальных уравнений, а известные «уравнения Ланчестера» в исследовании боевых операций, суть дифференциальные уравнения относительно численности войск на поле боя. Возможные и частые недоразумения и сомнения в существовании «бесконечно малого солдата» разрешаются различными авторами по-разному. Некоторые из них утверждают, что уравнения составляются не относительно поголовья популяции, а относительно её биомассы, которую законно считать непрерывной величиной (или, соответственно, — относительно «боевой мощи» войска, которую можно измерять как угодно, благо не очень ясно, как её измерять). Другие авторы, имеющие дело с той же проблемой в кинетической теории газов, предлагают понятие «физически бесконечно малой» величины, которая, дескать, будучи бесконечно малой, относительно объёма газа, тем не менее, содержит бесконечно много частиц.

Нам представляется наиболее свободным от противоречий и натяжек оправдание применений дифференциальных уравнений для (достаточно больших значений) целочисленных переменных, состоящее в том, что траектория, задаваемая решением дифференциального уравнения или системы, проходит через точки, определяемые решением уравнений в конечных разностях.

Эквивалентность конечного и дифференциального оператора, действующего на вектор состояния модели, легко проверить в случае линейных уравнений. В нелинейном случае это не всегда легко проверить в явном виде, но идея применения дифференциальных уравнений остаётся в силе и в этом случае.

Если круг изучаемых явлений включает в себя случайные события и их числовые оценки (случайные числа), приходится прибегать к аппарату математической статистики и теории вероятностей. При этом в принципиальном плане необходимо убедиться, что постулированные распределения вероятности объективно существуют, ибо это не всегда так (как например, — в случае игры в математическом смысле слова, за исключением казусов, когда противники сознательно используют фиксированные смешанные стратегии). Важным является также знание, хотя бы приближённое, истинных (в объекте) распределений вероятности.

В «самых трудных» для описания случаях остаётся воспользоваться аппаратом программ для ЭВМ, пожалуй, наиболее гибким и универсальным орудием моделирования.

2.6. Применение упомянутых выше (а также — не упомянутых) математических приёмов моделирования разбивает модели на классы: дискретные или непрерывные, детерминированные или стохастические, аналитические или машинные и т. п. Мы не придаём большого значения классификации, однако один классификационный признак мы считаем нужным обсудить особо. Речь идёт о так называемых «имитационных» моделях. Этот термин весьма часто и широко применяется, однако относительно его точного значения не существует единодушия. В языках, родственных латинскому, «имитация» и «модель» практически равнозначны и взаимозаменимы. Однако по-русски принято говорить «имитационная модель»! Её можно таксономически противопоставить «аналитической» модели. Ввиду неопределённости термина противопоставление это может быть двояким, — в смысле возможностей модели и в смысле её конструкции.

Всякая модель в ходе функционирования может и должна повторять или имитировать функционирование объекта. Некоторые модели могут применяться, или имеют возможность применяться, только в этом смысле. Другие же, кроме имитации, пригодны ещё для поиска ответов на многие вопросы, составляющие содержание «теории» объекта. Вопросы эти многообразны, и их нельзя перечислить. Примерами таких вопросов могут быть: «возможно ли, чтобы..?», «сколько нужно, чтобы..?», «как нужно управлять, чтобы..?» и т. п. Очень обширный круг вопросов такого рода поставляют проблемы оптимизации управления, одной из наиболее важных областей применения моделей.

Модели, позволяющие непосредственно решать подобные вопросы, наряду с простой имитацией изменений состояния объекта, мы называем «аналитическими». Модели же, непригодные для непосредственного решения подобных вопросов (кроме, быть может, методов перебора), но способные воспроизводить функцию объекта, повторять её или имитировать, есть модели «собственно имитационные» или просто «имитационные».

Конструктивное различие между двумя этими классами моделей сводится к тому, что аналитические модели представляют собой обычно расчёты относительно величин, измеримых, или потенциально измеримых, в объекте (изменения запасов, концентраций, потоков и т. п.), в то время как имитационные модели могут, не прибегая к числовым оценкам в явном виде, непосредственно изображать элементы системы и их состояния. Так, в модели системы массового обслуживания (телефонный коммутатор) квадратиками, нарисованными на схеме, или приписыванием номеров ячейкам памяти ЭВМ изображаются «клиенты» системы обслуживания и «пункты обслуживания», а записями в квадратиках или ячейках — их состояния. Затем события «разыгрываются», как спектакль, до заданного финала, в котором подсчитываются нужные события и их характеристики. К такого рода моделям приходится прибегать тогда, когда в силу дефектов знаний или слабости теории не удаётся построить разумную систему расчётов для аналитической модели. Кроме систем массового обслуживания имитационные модели применяются с успехом для оценки расписаний работ в цехах дискретного производства, в задачах популяционной генетики, а в последнее время — в решении экологических проблем.

Если бы мы пытались решить задачу о времени наполнения бассейна двумя трубами, если каждая в отдельности наполняет его за известные промежутки времени, и предприняли бы попытку использовать для этого имитационную модель, то нам пришлось бы записать в модели процесс наполнения бассейна и подобрать для каждой трубы в отдельности заданную скорость наполнения; затем в модели можно было бы изобразить наполнение бассейна двумя трубами одновременно и заметить время наполнения. Таким образом мы провели бы эксперимент, изображающий реальные события, — «модельный эксперимент», или, если мы использовали ЭВМ, «машинный эксперимент».[6] Такой процедурой приходится пользоваться в случае моделей обширных и сложных («больших») систем. В нашем же простом примере уже при записи уравнений стало бы ясно, что эти уравнения позволяют найти результат посредством вычислений и решения уравнений относительно искомой величины. В этом случае наша модель использовалась бы как аналитическая, и необходимость в модельном эксперименте отпала бы. Ясно, что аналитические модели оказываются, как правило, более эффективными и экономными, чем имитационные. Последние вызваны к жизни только слабостью теории, недостаточностью существующих математических методов и фактом наличия «больших систем».

Нужно, однако, признаться, что приведённые выше определения терминов «имитационная» и «аналитическая» модель не являются не только общепринятыми, но даже и распространёнными. Это всего лишь домыслы и предложения автора.

Можно сказать, что совокупность компонент модели, как фондовых, так и обменных, образует «структуру» модели, а изменения, происходящие в процессе работы (в частности — изменения во времени), — её «функцию». Оба эти термина общеприняты и популярны. Под структурой обычно понимается то, из чего и как построена модель или система (соответствующий математический термин не имеет к этому, повидимому, никакого отношения). Структура закреплена и стабильна (хотя, быть может, и динамична), и её стабильность обеспечивает то, что в системе «каждая нужная вещь в нужный момент оказывается на нужном месте». Слово «нужная» в данном контексте означает «нужная для того, чтобы модель была похожа в выбранном нами смысле на объект моделирования». Сказанное не есть определение, разумеется, а всего лишь некоторое разъяснение смысла, быть может, полезное. Структуру модели можно фиксировать с помощью схемы, удобной для изображения и запоминания взаимоотношений частей модели.

[6] Некоторые авторы предпочитают вместо «машинный эксперимент на модели» употреблять термин «псевдоэксперимент».

На такой мнемонической схеме изображаются запасы компонент или содержащие такие запасы «контейнеры» или «бункеры» (например, — в виде кружков), а также места протекания процессов или «реакторы» (в виде, скажем, — треугольников). Потоки компонент изображаются линиями со стрелками, соединяющими бункера с соответствующими реакторами. Некоторые стрелки, входные и выходные, соединяют систему с окружающей средой.

Структура содержит в себе все элементы и части модели и является носителем их состояний, которые последовательно сменяют друг друга в ходе функционирования модели. «Функция» модели состоит из последовательности состояний, причём изменения состояния происходят как спонтанно, — в силу имманентной активности заложенных в модель механизмов, так и в виде реакции на внешние воздействия со стороны окружающей среды, в том числе — управляющие воздействия. «Внешней функцией» называют воздействия со стороны системы на окружающую среду и её реакции на изменения в среде. «Внутренняя функция» есть самопроизвольная смена состояний системы и её реакции на воздействия.

Иногда оказывается необходимым учесть кроме структурных связей элементов системы, отражаемых мнемонической схемой, ещё и расположение в реальном пространстве фактических частей моделируемого объекта, соответствующих этим элементам. Иначе говоря, структурным элементам модели следует приписать координаты в некоторой системе координат. Обычно это бывает неизбежно, когда учитываются процессы транспорта компонент и оказываются важными оценки расстояний при перемещениях.

Чтобы завершить описание, необходимо задать информацию об исходном состоянии системы. Обычно эта информация меняется от одного прогона модели к другому.

В сущности, любая модель есть не что иное, как информация о ваших представлениях по поводу объекта моделирования. Важно, чтобы эта информация была бы достоверной и достаточно полной для решения поставленной задачи.

В зависимости от обилия информации меняются размеры модели, то есть её сложность и размеры текста для её записи (или машинной памяти ЭВМ). Эскизные, предельно упрощённые модели, пригодные для выяснения принципиальных вопросов теории, могут состоять всего лишь из одного переменного-компоненты и одного соотношения (как, например, модель развития популяции Мальтуса), в то время как модели, рассчитанные на точное описание конкретного сложного объекта (так называемые «портретные модели»), содержат так много компонент и соотношений, как только позволяют имеющиеся средства записи и обработки информации.

2.7. Следующий этап работы — кодировка модели в языке выбранной метатеории — состоит, прежде всего, в приписывании каждому из членов списка существенных компонент математической переменной — её символа или символа с индексом, установление её физической размерности и единицы измерения (желательно — в единой системе для всех компонент).

Все существенные соотношения между компонентами записываются в виде уравнений или неравенств относительно выбранных переменных. В случае составления машинной имитационной модели — составляется программа для ЭВМ.

В уравнения и неравенства, кроме переменных, неизбежно входят «параметры», — величины, обозначаемые специальными символами, значения которых фиксированы на протяжении срока работы (прогона) модели. Их следует не путать с константами (физическими — типа скорости света или гравитационной постоянной, и математическими — число «пи» и т. п.). Значения параметров устанавливаются автором модели и могут по его произволу изменяться в процессе усовершенствования модели, от одного прогона к другому. Более того, при расширении модели величина, изображавшаяся ранее параметром, может превратиться в переменную и получать значения в ходе работы модели. Параметры модели, как и переменные, нуждаются в том, чтобы их размерности и единицы измерения соответствовали принятой в модели системе единиц.

Наиболее распространённой ошибкой на первых порах является путаница в размерностях «запаса» и «потока», часто их не различают. Приходится слышать о «парадоксах» типа: «количество планктона, поедаемое популяцией рыб в водоёме, превышает наличный запас планктона!». Дело в том, что «количество, поедаемое в сутки» есть «поток» с размерностью «масса/время» (тонна/сутки), в то время как просто «количество» (имеющееся в наличии), имеет размерность «масса» (тонна). Величины различной размерности, как хорошо известно, нельзя ни складывать, ни вычитать, ни сравнивать. Величина «пять тонн плюс два километра» не имеет смысла (кроме, быть может, иносказательно-поэтического; в поэзии — всё можно). На самом деле «количество планктона, поедаемое в сутки», равно приросту количества планктона в сутки за счёт размножения его, а наличное количество достаточно для создания такого прироста.

Поток и запас связаны размерной величиной — «постоянной времени», равной отрезку времени, за который данный поток исчерпает данный запас (в нашем «парадоксе» — сутки), так же, как в задаче о бассейне и трубах.

Несмотря на простоту приведённых рассуждений, оказывается довольно хлопотливым делом уследить точно за такого рода «мелочами» при построении модели. Необходимо внимание и тщательность.

Уравнения модели метаболизирующей системы оказываются, как правило, уравнениями баланса относительно компонент. В моделях, где используются дифференциальные уравнения, изменения количества (запаса) компоненты в единицу времени приравниваются разности между суммарным потоком «прибыли» компоненты и потоком её «убыли». При записи выражений для всех потоков нужно снова тщательно следить за размерностями выражений, дабы не складывать тонны с километрами. Неравенства, часто встречающиеся в моделях, выражают также баланс, точнее — его предельные условия (поток потребляемого сырья не превышает доступного потока).

Балансовые соотношения, используемые в моделях, не должны приниматься простодушно и прямолинейно; часто в записи уравнений бывает трудно отыскать следы «законов сохранения». Дело в том, что упрощения, вносимые в модель по сравнению с натурой, порой «поглощают» вместе с несущественными компонентами и законы их сохранения. Поскольку одна компонента («первая») может входить в состав другой («второй»), как углерод входит в состав сахара или стали, постольку первая может поглощаться бесследно и исчезать из балансового учёта при производстве второй, а вторая, в свою очередь может, по видимости, появиться «ниоткуда», за счёт первой и других. Часто бывает, что мы перестаём следить за судьбой компоненты на границе системы, просто выбрасывая её из рассмотрения, как не интересующую нас более. Некоторые компоненты порой оказываются всегда в избытке (как вода в океане) и потому не учитываются в модели, хотя они могут существенно участвовать в балансе той или иной существенной компоненты. Все эти и многие другие обстоятельства заставляют принимать балансовые соотношения в моделях «cum grano salis», то есть не в прямую и не буквально. И, тем не менее, законы сохранения, выписаны они явно или только подразумеваются, всегда должны быть выполнены наравне с другими законами природы, иначе мы рискуем «смоделировать чудо», что не трудно сделать, но пользы не принесёт.

При кодировании модели принято различать переменные «экзогенные» и «эндогенные». Первые — либо независимые, либо управляемые (то есть выбираемые независимо или по произволу); вторые — внутренние переменные, на которых разыгрываются все события модели, либо — выходные переменные. Независимым переменным чаще всего оказывается время, однако таковыми могут оказаться и управляемые переменные, как например — в моделях, предназначенных для решения задач линейной оптимизации, которые часто не очень удачно называют «моделями линейного программирования».

Нужно признаться, что подобная подробная и назойливая классификация всех деталей, входящих в модель, и самих моделей нам представляется более или менее пустой тратой сил и бумаги. В ходе моделирования всегда оказывается достаточно ясным характер её деталей, а также тип самой модели. Кроме того, каждый автор всегда имеет в запасе или находит много нового, такого, что не укладывается в раз установленную классификацию. Полезнее составлять модели, чем рассуждать о них или пытаться их классифицировать.

Совокупность переменных, изображающих в модели физические величины, образует «фазовое пространство» системы. Точкой этого пространства изображается мгновенное состояние системы. Движение изображающей точки во времени соответствует изменениям состояния — функции системы, и образует «траекторию системы». Траектория может быть построена на основании решения системы уравнений модели, в результате расчётов — «прогона» модели. Это составляет содержание следующих этапов работы с моделью.

2.8. Для того, чтобы полностью себя оправдать, модель обязательно должна работать. Одна только формулировка описания модели и её кодировка в математических символах, хотя и полезны для исследователя, ещё не составляют никакой «заслуги». Уравнения модели должны быть решены тем или иным методом, алгоритмы — выполнены и получен результат. Таким финальным результатом является полное решение поставленной задачи. В случае имитационных моделей результатом счёта является демонстрация в виде записей характеристик функционирования системы как целого, в случае популяции это могут быть кривые численности в зависимости от времени, в случае промышленного предприятия — график выполнения плана и т. д.

В результате прогона модели мы, говоря несколько вольно, переходим от представлений о структуре системы к демонстрации её функции. Поскольку это делается посредством математических методов, такой переход имеет силу доказательства (разумеется, при условии, что методы применены корректно). Если мы почему-либо «недовольны» результатом прогона, то винить в этом мы можем только некорректность наших гипотез, которые мы заложили в модель.

Прогон модели, то есть — проведение расчётов, является прерогативой математика и целиком находится на его совести и ответственности. Полученный им результат не всегда может быть непосредственно прочитан заказчиком модели и поэтому иногда требует расшифровки или «декодирования» с языка математики на язык естественной науки заказчика или автора — «пользователя» модели. Обычно эта операция труда не представляет ввиду наличия записей кодировки модели.

Прогон модели, как правило, не ограничивается единичным актом счёта, а состоит из серии просчётов той или иной сложности до окончательного решения задачи.

2.9. В процессе прогона модели или до него производится её «верификация» или проверка на соответствие и сходство с моделируемым объектом. Верификация распадается на два этапа: первый — проверка соответствия записи модели и совокупности гипотез, заложенных в модель (грубо говоря — отсутствие ошибок кодировки) и второй — проверка соответствия гипотез и моделируемого явления, как оно известно из наблюдений и опытов (проверка правильности наших представлений об объекте моделирования).

Нужно признаться, что верификация модели часто остаётся в пренебрежении ввиду трудностей, с нею связанных. Авторы моделей опираются на свою интуицию или чутьё и принимают или отвергают модель скорее «на глазок», не ища серьёзных подтверждений или опровержений своих посылок.

Одним из простейших приёмов верификации является проверка модели на тривиальных случаях, на которых функция модели очевидна. Так, положив начальные значения одной или нескольких переменных равными нулю, можно убедиться, что в записи модели отсутствуют грубые ошибки. Этим приёмом не следует пренебрегать, несмотря на его простоту и незатейливость, ибо нередко он позволяет избежать лишней работы и потери времени.

Иногда удаётся произвести проверку по имеющимся экспериментальным данным для объекта моделирования. Надо быть при этом готовым к тому, что для такой проверки может не оказаться в распоряжении достаточно данных. Данные эксперимента, проведённого без замысла проверки модели (не «под модель»), как правило, оказываются неполными и недостаточными. Это является ещё одним доводом в пользу построения моделей даже до того, как объект начали изучать экспериментально.

Очень желательно провести серию специально поставленных опытов с натурным объектом, рассчитанных на проверку модели. Такая процедура нам представляется наиболее рациональной и логичной в ходе изучения любого объекта и должна была бы войти уже давно в научный обиход.

Сравнивая результаты эксперимента и просчётов на модели, автор либо принимает модель, считая её удовлетворительно построенной, либо намечает необходимые исправления и усовершенствования модели. Нередко приходится вовсе отказаться от модели в целом и начать всё сначала. В этом процессе усовершенствования модель представляется средством размышления над объектом изучения, обладающим силой доказательности и убедительности. Такие размышления приходится проводить любому исследователю, и они составляют основную часть труда по научному изучению объекта исследования. Моделирование существенно расширяет возможности исследователя, придавая его размышлениям систематичность, убедительность и полноту.

Гл. 3. Зачем строятся модели

3.0. Применения моделей не менее разнообразно, чем их типы. Прежде всего, как мы уже упоминали, модель необходимо присутствует всегда, когда имеется содержательная задача, которую необходимо решить математическим методом. Почти всегда в таких случаях одна и та же модель оказывается пригодной для решения не одной задачи, ради которой она составлена, а целой серии задач, относящихся к тому же реальному объекту. Более того, модель становится основанием для построения математической теории объекта.

Выражаясь несколько общё, можно сказать, что математическая теория естественного (или искусственно созданного) объекта состоит из математических формул и алгоритмов, из «правил», с помощью которых по результатам конечного числа наблюдений или экспериментов можно с нужной точностью и полной достоверностью предсказать исход любого мыслимого эксперимента. В наиболее счастливых случаях теория приобретает дедуктивный, аксиоматический характер; модель превращается в тщательно описанный «модельный объект», относительно которого формулируются некие всегда верные утверждения естественнонаучного характера, — «законы природы»; в математической теории они становятся на место аксиом, из которых далее выводятся по «правилам вывода» следствия или теоремы, являющиеся основой или самим содержанием теории.

Ярким примером подобной теории является механика материальной точки Ньютона или аналитическая механика твёрдого тела Эйлера (Лагранжа, Даламбера, Якоби, Гамильтона...). Очень важным является тот факт, что идеальный объект механики Ньютона — тело, обладающее конечной массой и исчезающе малыми (в пределе — нулевыми) размерами, — «материальная точка», НЕ является реальным объектом, не существует и не может быть воспроизведена, иначе как приближённо, ни в каком эксперименте. Равно — ситуация, относящаяся, например, к первому закону Ньютона, — движение вне поля сил, то есть в бесконечном удалении от каких бы то ни было материальных тел, также не является физически реализуемой, хотя и «мыслимой». Движение в пустом пространстве, без материального носителя системы отсчёта, не может быть зафиксировано и измерено. И, тем не менее, успех механики Ньютона обеспечен именно выбором «неестественных», абстрактных модельных объектов и ситуаций, то есть — хорошо построенной моделью.

Не менее яркими примерами «идеальных объектов» могут служить четырёхмерный мир пространства — времени Минковского, в котором развёртываются события теории относительности, или математическая теория групп — аппарат современной физической теории элементарных частиц. В этом последнем случае, хотя и не только в этом, математическая модель грозит стать единственным средством для того, чтобы составить представление об объекте, и размышлять о нём. «Непосредственная интуиция», так безотказно работавшая в трёхмерном физическом пространстве механики, оказывается лишённой опоры на непосредственный повседневный опыт и отказывает в услугах. Такая ситуация таит в себе опасности, не говоря уж о неудобствах для исследователя. Однако, иного выхода — не видно.

3.1. Математические модели в физике вошли в обиход исследования задолго до того, как само это слово стало обиходным. Подобно господи-ну Журдену из комедии Мольера физики всю жизнь говорили прозой математических моделей и не подозревали об этом факте до момента появления электронных вычислительных машин. В самом деле, предметы изучения физики немногочисленны по числу и по свойствам и обозримы. Их модели просты (зато — гениальны), а процесс построения моделей — лаконичен и не привлекает внимания сложностью методики. Лишь с развитием техники ЭВМ появилась возможность и возник «аппетит» к решению всё более сложных задач, к их постановке и к созданию моделей, уже требующих большого внимания и осторожности. Именно в этот момент и возник интерес к процессу построения моделей, где не так-то легко сделать простой модель сложной системы и притом не выплеснуть вместе с грязной водой и ребёнка.

Метод математических моделей постепенно приобрёл популярность сначала для постановки прикладных задач, а затем, и для построения теорий. Дело в том, что, как мы уже упоминали, исследователь, пользуется ли он математикой или нет, всё равно при размышлении не может обойтись без представлений о предмете исследования и без упрощений или абстракций. Однако, лишь качественные рассуждения, так сказать — «невооружённым мозгом», могут привести к ошибкам, даже, когда все посылки рассуждений правильны. Лишь математические расчёты гарантируют от ошибок.

В одной из пьес Э. Ростана герой — философ, поэт и забияка Сирано де Бержерак, — дабы отвлечь внимание собеседника, рассказывает ему о способах полёта на Луну. Один из способов заключался в том, что автор садился в железное корыто, брал в руки магнит и подбрасывал этот магнит кверху — «в сторону Луны». Магнит и корыто, взаимно притягиваясь, сближались, затем автор ловил магнит, подбрасывал его снова и так далее до достижения цели полёта. Способ полёта не наилучший, более того — очевидным образом негодный. Однако все утверждения автора проекта неоспоримо верны и лишь числовой расчёт показывает, что время полёта оказывается отрицательным или, — истолковывая этот результат расчёта, — можно сказать, что так можно упасть с Луны (разумеется, начав полёт вблизи Земли, как и полагал автор), но не достичь её.

3.2. Итак, — первым и основным применением моделей является использование их для построения строгих представлений об изучаемом объекте, постановки задач и создания математической теории. В этом смысле математическая модель принимает участие в процессе, имеющем целью заменить многочисленные и дорогие эксперименты расчётами, по известному афоризму: «нет ничего практичнее хорошей теории».

Однако замена эксперимента не обязательно включает в себя построение теории объекта и использование этой теории для проведения численных расчётов. Имитационные модели, используемые в машинном эксперименте, если они достаточно хорошо построены и проверены, могут служить дешёвой и удобной заменой дорогим и трудным для выполнения опытам с объектом.

Такого рода замена может быть использована для статистических экспериментов и определения характеристик системы по статистическим характеристикам её элементов. При этом как сама система, так и её окружение и сценарий функционирования, могут быть описаны как случайные объекты и явления и модель может изучаться в машинном эксперименте теми же способами, как и объект в натуре.

Замена объекта моделью может служить для целей демонстрации функционирования системы; такого рода модели оказываются полезными в составе тренажёров различного типа, от тренажёра для автоводителя, пилота и космонавта до тренажёра для администратора, врача и командира войск.

Модель-замена с успехом служит для интерполяции опытных данных; а также, при некоторой осмотрительности, может с успехом служить для экстраполяций и прогнозов. Правда, для последнего типа применений необходимо быть уверенным в полном соответствии модели её оригиналу; иными словами — нужна её тщательная верификация.

Исследование наличия, числа и положений в фазовом пространстве особых точек — довольно обычная задача, требующая наличия модели и притом — модели аналитической. Вместе с этим оказываются доступными исследования устойчивости системы в особых точках как обычными математическими методами, в случае аналитической модели, так и в машинном эксперименте методом «проб и ошибок».

Интересной, новой и трудной проблемой, возникшей не так давно в связи с проблемами охраны природного окружения человека, оказывается проблема «эластичности» или «упругости» системы. В отличие от устойчивости (например, — «устойчивости в малом» по Ляпунову), под эластичностью понимается способность системы возвращаться в устойчивую особую точку («гомеостазис») или на устойчивую траекторию («гомеорезис») после того как внешние воздействия выводят систему из её естественного состояния. Пределы эластичности системы, где начинаются её «остаточные деформации», выражаясь языком теории сопротивления материалов, требуют для своей оценки введения некоторой меры, способы построения которой не всегда очевидны. Эта проблематика возникла недавно и находится в процессе исследований и разработки.

Кроме стационарных точек модель позволяет исследовать и переходные процессы в их динамике, — скорости ухода от начальной точки, амплитуды «раскачки» при перерегулировании и другие характеристики процесса.

На модели удобно исследовать чувствительность системы к внешним воздействиям или внутренним перестройкам её структуры, то есть меру реакции системы, изменения её поведения или её характеристик на «единичное» изменение значений тех или иных параметров. Таким образом, можно установить и исследовать аллергические точки системы, воздействия, к которым система особенно чувствительна или на которые она отвечает катастрофически.

3.3. Самым популярным и даже «модным» в настоящее время является, пожалуй, применение моделей для «оптимизации», то есть с целью нахождения наилучшей стратегии управления объектом. Задача о нахождении оптимальной стратегии управления имеет много вариантов постановки, однако, в любом случае она требует наличия модели объекта, которая позволяла бы достоверно отвечать на вопрос: «а что произойдёт, если. . . » будет применено то или иное управление. Модель в задачах оптимизации является средством прогноза. Иногда бывает так, что аналитическая модель оказывается трудно распознаваемой в постановке задачи, ибо от неё остались лишь «следы» в виде математических следствий (отсутствует в явном виде кодировка модели и т. п.). Порой случается, что образуется класс моделей, специально приспособленных для применения того или иного метода оптимизации; в этих случаях их обозначают термином, относящимся не к объекту или к методу моделирования, а термином, соответствующим методу оптимизации. Пример, — «модели линейного программирования».

«Модели оптимизации» (обозначенные так в вышеуказанном смысле), представляют собой описание объекта и способов его функционирования (быть может, в виде псевдомодели), а также способов произвольного воздействия на объект или управления, — параметров или переменных, значения которых выбираются по произволу исследователя. Обычно на значения параметров управления бывают наложены ограничения в виде уравнений или неравенств, при выполнении которых управление считается «допустимым» или попросту — реализуемым. Ограничения описывают естественные пределы, в которых находятся значения параметров, — «нельзя истратить больше средств, чем их имеется в наличии», «не существует отрицательных значений численности поголовья» и т. п. Управление и ограничения, на него наложенные, описываются и кодируются теми же способами, как и модель.

Кроме модели объекта и модели управления в постановку задачи оптимизации входит «критерий качества» или «критериальная функция». Это — всегда — скалярная функция переменных, относящихся к функционированию модели. Состав аргументов может быть самым различным для различных задач. Критериальная функция может зависеть от характеристик структуры системы или её функции, или же от траектории. Эта функция описывает тот «смысл» или ту «ценность», которая приписывается системе в данной задаче. Значение критериальной функции в результате решения задачи оптимизации должно быть экстремальным, то есть либо максимальным (например — производительность, доход), либо минимальным (время пробега, стоимость), в зависимости от смысла и постановки задачи.

Во всех задачах, где оказываются актуальными ограничения, экстремальное значение критерия достигается на краю допустимой области. При этом некоторые ограничения оказываются выполненными в виде точных равенств (так сказать «в обрез»), другие же — с некоторым расстоянием до границы. Первые оказываются «узким местом» системы, вторые же — практически неактуальными.

Поскольку критерий качества записывается обычно как функция от функций, задача оптимизации попадает в разряд задач отыскания условного (то есть — с ограничениями) экстремума функционала. Существует весьма обширная литература, посвящённая математическим методам решения этого класса задач. Наряду с классическими методами вариационного исчисления здесь применимы все варианты так называемого «программирования» (линейного, выпуклого, целочисленного, стохастического и т. д.). Термин этот — «программирование» оказался крайне несчастливо выбранным, ибо он пересекается с тем же обозначением составления программ для ЭВМ. Однако это слово прочно вошло в обиход.

Наряду со строгими методами аналитического определения оптимума существует ряд методов более или менее суррогатных, которые, однако, не всегда дают гарантию достижения строгого оптимума, а главное — оставляют вопрос о достижении оптимума нерешённым, хотя и позволяют, как правило, существенно улучшить стратегию или «план». Иногда, вместо достижения абсолютного экстремума критериальной функции, оказывается достигнутым лишь локальный экстремум, причём часто оказывается невозможным непосредственно убедиться в том, что вычисления остановились не в глобальном экстремуме, а лишь в «тупике». Подобно тому, как при восхождении на самую высокую вершину хребта можно оказаться на вершине пригорка и не захотеть двигаться далее к вершине, ибо для этого нужно спуститься, а мы умеем только карабкаться вверх.

Каждый из методов оптимизации или «программирования» требует построения системы вычислений и — следовательно — математической модели того или иного типа.

3.4. Очень важным и интересным нам представляется совокупность проблем, связанных с решением так называемых «обратных задач». Под этим названием подразумевается довольно широкий круг проблем, из которого существенным для нас является следующая ситуация.
Пусть имеется алгоритм решения некоторого класса задач, — например, — заданы свойства и расположение в пространстве тел, отражающих некоторое излучение, а также источника и приёмников излучения; определить интенсивность излучения, принимаемого каждым приёмником с учётом интерференции отражённого излучения от тел. Назовём применение этого алгоритма «решением прямой задачи». Задачей, «обратной» к данной, будет нахождение расположения (а может быть, и отражающих свойств) тел в пространстве, если задана интенсивность излучения, измеренная приёмниками при известном их расположении относительно источника. Попутно возникают вопросы о числе приёмников, необходимом для обеспечения однозначности решения, о необходимом числе вариантов эксперимента и т. п.

Построение модели с целью развития естественнонаучной теории некоторого объекта имеет много общего с решением «обратной задачи». В самом деле, — если задана та или иная модель, структура которой известна полностью и достоверно, то определение всех свойств её функции сводится лишь к достаточному числу прогонов модели или проведения соответствующих математических исследований, если модель аналитическая. Это подобно решению «прямой» задачи. Если же объект моделирования задан серией наблюдений и измерений над объектом исследования, то построение модели (построение структуры по функции) вполне аналогично решению «обратной задачи».

Можно различать, в случае построения модели, большую и малую обратную задачу. Малая задача предстоит нам, если имеется готовая верифицированная модель и предстоит определить значения её параметров, которые приводят к совпадению результата работы модели с экспериментальными данными по наблюдению за объектом моделирования. «Большая задача» состоит в составлении (изобретении, придумывании, догадке и т.д...) структуры модели, отвечающей подобию функций модели и её прообраза (с последующим решением малой задачи).

Не будет преувеличением сказать, что все усилия, посвящённые построению теоретических моделей, направлены на решение «большой обратной задачи» во всём разнообразии её конкретных постановок.

Если построение модели приводит к желаемому результату, — модель при подробной и полной её верификации оказывается адекватной всем требованиям, — то это, как сие ни печально, отнюдь не может явиться доказательством истинности гипотез, заложенных в модель. Может существовать другая модель, и — не одна, быть может, — столь же хорошо отвечающая требованиям, как и построенная. Модель может служить «доказательством» лишь в тех случаях, когда все её варианты оказываются неадекватными поставленным к ней требованиям. При этом она доказывает несостоятельность принятых гипотез, из чего вытекает необходимость «начать всё сначала», то есть в корне изменить точку зрения на объект моделирования.

Несмотря на некоторую пессимистичность этой ситуации, к ней не следует относиться отрицательно. Как правило — отрицательный результат при попытке подтвердить традиционные представления об объекте моделирования посредством составления модели приводит к новым взглядам и концепциям, часто подсказанным неудачей, и порой служит толчком и поводом к новым существенным продвижениям. Можно сказать, что модель является как бы способом размышления над объектом, значительно превышающим по возможностям, обширности и строгости обычные размышления, которые, так или иначе, ведёт любой естествоиспытатель в ходе своей работы.

Пусть это звучит претенциозно, но нам хочется высказать афоризм, который «носится в воздухе» вокруг математического моделирования: «знать, значит уметь построить адекватную модель!». И ещё: «мы не знаем о природе ничего, кроме наших моделей её». Мы не станем обсуждать эти, несколько экстремистские, высказывания, оставляя их на суд читателя.

Библиография по «Системам Либиха» (системы с лимитирующими факторами)

1. Полетаев И. А. О математических моделях элементарных процессов в биогеоценозах. Проблемы кибернетики. 1966. Вып. 16.

2. Колесова Г. И., Полетаев И. А. Некоторые вопросы исследования Л-систем. Управляемые системы. 1969. Вып. 3.

3. Кудрина К. Н., Гильдерман Ю. И., Полетаев И. А. Модели систем с лимитирующими факторами (Л-систем). В кн.: Исследования по кибернетике. М.: Советское радио, 1970.

4. Полетаев И. А. Циклы в линейных системах Либиха. В кн.: Колебательные процессы в биологических и химических системах. Т. 2. Пущино-на-Оке, 1971.

5. Полетаев И. А. Математические модели роста. В кн.: Проблемы физиологии растений. Новосибирск, 1971.

6. Нудельман Г. Синтез систем с лимитирующими факторами в двумерном случае. Управляемые системы, 1971. Вып. 10.

7. Гильдерман Ю. И. Динамические системы с непрерывными правыми частями, линейными в углах. Сибирский математический журнал. 1972. Т 13, №1.

8. Гильдерман Ю. И., Кудрина К. Н. О положительных циклах в системах с лимитирующими факторами. Дифференциальные уравнения. 1972. №8.

9. Полетаев И. А. Модели Вольтерра «хищник-жертва» и их обобщения с использованием принципа Либиха. Журнал общей биологии. 1973. Т.34. №1.

10. Кудрина К. Н., Полетаев И. А. Модели распределённых биоценозов. В кн.: Некоторые проблемы мат. биологии. Институт гидродинамики СО АН СССР, 1974.

11. Гильдерман Ю. И. О динамических системах, линейных в конусах. Доклады Академии наук СССР. 1974. Т. 215. №1.

12. Гильдерман Ю. И. О динамических системах, линейных в клиньях. Сибирский математический журнал. 1974. №5.

13. Полетаев И. А. Использование принципа Либиха в математических моделях метаболирующих систем. В кн.: Имитационное моделирование и экология. М., 1975.

14. Гильдерман Ю. И. О предельных циклах кусочно-аффинных систем. Доклады Академии наук СССР, 1976. Т. 230. №3.

15. Полетаев И. А. О некоторых математических моделях популяций с учётом влияния окружающей среды. Журнал общей биологии. 1979. Т. 40. Вып. 6.

Ю. И. Гильдерман, К. Н. Кудрина, И. А. Полетаев

Модели Л-систем (системы с лимитирующим фактором)

Ряд прикладных задач из различных областей приводит к моделям систем, сходных между собой по формальному строению. Поэтому возникает необходимость рассмотреть единый абстрактный объект — «систему с лимитирующими факторами» или, кратко, «Л-систему», и исследовать свойства этого объекта. В статье на основании ряда примеров дается описание Л-системы и результаты некоторых ее исследований. Попутно обсуждаются вопросы управления и намечаются задачи для дальнейших исследований.

I. ВВЕДЕНИЕ

1. Процессы управления, изучаемые кибернетикой, протекают в реальных, вещественных физико-химических или биологических, естественных или искусственных системах. Системы, подвергающиеся управлению, всегда обладают структурой (пространственно-временной организацией), обеспечивающей наличие определенных компонент или элементов системы «в нужное время в нужном месте». Особенности структуры конкретной системы и функциональные свойства ее элементов категорическим образом определяют функциональные свойства и возможности в целом и потому существенны для управления ею. Другими словами, возможности управления системой существенно зависят от свойств самой системы. Это приводит к необходимости изучать структурно-функциональные свойства системы, подвергающейся управлению, до того, как приступать к изучению управления как такового.

Мы будем делать различие, в разрез с принятой в некоторых работах терминологией, между системой «управляемой», или подвергающейся управлению, и системой «управляющей», или осуществляющей управление над первой. Вторую мы будем полагать внешней по отношению к первой и отдельной от нее (что, впрочем, не препятствует первой, «управляемой» системе, уже включать в себя некоторое управление). Таким образом, мы не будем придавать термину «управление» смысл «любого взаимодействия элементов системы», а оставим для него более узкое значение, которое опишем несколько позднее.

Изучая свойства естественных систем, разумно классифицировать их по признакам сходства структуры и функционирования. Для классов сходных между собой систем можно и следует строить их единые строгие описания, или модели, пользуясь тем или иным формальным аппаратом (метатеорией). Ниже мы будем рассматривать модели одного из классов систем, функционирование которых определяется, вообще говоря, наличием «узкого места» или «лимитирующего фактора». Эти системы мы будем условно называть системами с лимитирующим фактором или, кратко, «Л-системами». Описание класса Л-систем мы начинаем с примеров.

2. Рассмотрим простую химическую реакцию, протекающую на катализаторе. Пусть имеется y «мест» на катализаторе K, где может расположиться молекула реагента A. Каждое из этих мест может быть свободно или занято. Если на место, занятое молекулой A, падает молекула реагента B, то происходит синтез молекулы вещества C, которая покидает катализатор и освобождает место для следующего акта синтеза. Обозначив (AK) комплекс: катализатор — реагент, получим схему реакции:

$$K + A \longrightarrow (AK), \tag{1}$$
$$(AK) + B \longrightarrow C + K. \tag{2}$$

Пусть x_1 и x_2 суть «потоки» — число молекул A и B, падающих в единицу времени на каждое активное «место» катализатора. Потоки x_1 и x_2 определяются (в стационарном состоянии) поступлением веществ A и B в реактор извне.

Предположим, что процессы химического взаимодействия типа (1) и (2) между молекулами происходят в течение конечного (малого) отрезка времени τ_2 и τ_4 соответственно. Тогда активное «место» на катализаторе K в любое мгновение времени находится в одном из четырех состояний (в порядке их следования во времени) :

(τ_1) свободно, в ожидании подхода очередной молекулы А;

(τ_2) взаимодействует с молекулой A;

(τ_3) занято молекулой A, находится в ожидании подхода молекулы B;

(τ_4) взаимодействует с молекулой B.

Пусть потоки частиц A и B настолько интенсивны, что временами ожидания τ_1 и τ_3 можно пренебречь; вся активная поверхность катализатора непрерывно занята. Тогда скорость реакции — скорость «поглощения» или «переработки» веществ A и B и «выдачи» вещества C будет зависеть только от числа активных мест катализатора y (и от констант τ_2 и τ_4). Никакое увеличение потоков молекул A и B не приведет к увеличению скорости реакции. Напротив, увеличение поверхности катализатора вызовет пропорциональное увеличение скорости. В этом случае катализатор является «узким местом» процесса и его количество представляет единственный существенный фактор, определяющий скорость реакции.

Пусть теперь катализатор и вещество A имеются в изобилии, а поток x_2 вещества B мал. Тогда катализатор почти всё время будет находиться в состоянии (τ_3) и τ_3 будет велико. Если не увеличивать приток вещества B в реактор извне, то изменение y и x_1 не повлияет на производительность реактора (в стационарном состоянии).

То же самое рассуждение справедливо для вещества A.

В последних двух случаях «узким местом», определяющим интенсивность процесса реакции и его производительность, является субстрат реакции, «сырье» A или B.

Разобранные идеальные ситуации являются предельными, недостижимыми точно в ходе реальной реакции. В действительности, если A и B подаются к месту реакции стохастическим процессом диффузии, активные «места» катализатора делят время между состояниями (τ_1), (τ_2), (τ_3), (τ_4) в пропорциях, определяемых величиной y, концентрациями веществ X_A и X_B и температурой (средней скоростью хаотического движения молекул A и B). «Кинетика химической реакции» определяется в данном примере не столь протеканием самого химического взаимодействия (обычно очень кратковременного), сколько характеристиками транспорта вещества к «месту реакции».

Если бы субстрат подавался к месту взаимодействий «организованно» и регулярно, как это приблизительно имеет место при сложных биохимических реакциях на биологических структурах, то та же самая реакция протекала бы кинетически совершенно несходно с течением в реакторе при диффузионном «транспорте».

Все сказанное обосновывает разумность такого описания процесса химической реакции, когда собственно процесс взаимодействия рассматривается отдельно от процессов переноса и накопления субстрата и продукта, что мы и предполагаем делать в моделях, описываемых ниже. При этом процесс химического взаимодействия (собственно реакции) характеризуется «набором» — перечнем входных компонент и компонент, не перерабатываемых в ходе взаимодействия, не исчезающих, но необходимо присутствующих и участвующих в процессе (катализатор), заданием стехиометрических чисел реакции или пропорций (в случае химической реакции — целых чисел, согласно закону Дальтона) и временем единичного акта взаимодействия (или обратной ему величиной — числом актов взаимодействия в единицу времени при отсутствии пауз ожидания). Компонента, поступающая или имеющаяся в избытке, не используется из-за отсутствия партнеров и невозможности войти в «набор» и удаляется без участия в процессе или же «простаивает» и накапливается.

Модель идеализированной химической реакции, работающая без учёта времени ожидания, можно описать, таким образом, целочисленными векторами

$$\bar{A} =< \alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_i, \ldots, \alpha_I, \beta_1, \beta_2, \ldots, \beta_j, \ldots, \beta_J >; \tag{3}$$

$$\bar{B} =< \gamma_1, \gamma_2, \ldots, \gamma_k, \ldots, \gamma_K >;$$

$$i \in \{1, 2, \ldots, I\};\ j \in \{1, 2, \ldots, J\};\ k \in \{1, 2, \ldots, K\}, \tag{4}$$

где $\alpha_i,\ \beta_j,\ \gamma_k$ суть соответственно стехиометрические коэффициенты реагентов, катализаторов и продуктов реакции, $I,\ J,\ K$ — общее число «входных» компонент, типов катализаторов и «выходных» компонент.

Кроме того, в описание входит действительное число p_0 — условная единица интенсивности реакции, при наличии всех веществ типов i и j в количествах α_i и β_j ($p_0 = 1/\tau$, где τ - полное время единичного взаимодействия). Тогда ход процесса реакции при наличии потоков «входных» веществ в размерах $< x_1, x_2, \ldots, x_i, \ldots, x_I >$ и катализаторов в размерах $< y_1, y_2, \ldots, y_j, \ldots, y_J >$ будет описываться интенсивностью P (в единицах p_0) в виде

$$P = \min_{\{i\},\{j\}} \left\langle \frac{x_i}{\alpha_i}, \frac{y_j}{\beta_j} \right\rangle;\ i \in \widetilde{I}, j \in \widetilde{J}. \tag{5}$$

Компоненту с индексом i или j, на которой достигается минимум, будем называть «лимитирующим фактором» или «узким местом» вектора A.

Количество веществ, поглощаемых в единицу времени реакцией, определяется выражением

$$x_i^{(\text{вх})} = \alpha_i P \geq 0 \tag{6}$$

Количество избыточных (неиспользуемых в реакции) входных компонент

$$x_i^{(\text{н})} = x_i - \alpha_i P \geq 0 \tag{7}$$

(для компонент «узкого места» имеет место равенство). Количество производимых в единицу времени веществ:

$$z_k = \gamma_r P \geq 0. \tag{8}$$

Описанная модель идеализированной химической реакции является примером «системы с лимитирующими факторами» или Л-системы.

3. Рассмотрим систему массового обслуживания (производство, пункт медицинского обслуживания населения, торговое предприятие, систему противовоздушной обороны и т. п.). Система состоит из ячеек обслуживания — «мест», имеющих комплект оборудования, персонала и расходных материалов. В каждую ячейку в некоторый момент времени поступает «клиент» или «набор клиентов» (комплект сырья и полуфабрикатов, лицо или группы лиц, подвергающихся совместному обслуживанию — например, бракосочетающаяся пара и свидетели, самолет противника и т. п.); клиент занимает ячейку на некоторое время — «время обслуживания» (которое может быть случайной величиной) и затем освобождает ее. При освобождении ячейки исчезает первоначально наличествующий набор объектов (сырье) и появляется новый набор (продукт производства и отходы).

При отсутствии клиентов ячейка может простаивать в ожидании. Если же все ячейки заняты, то новые клиенты вынуждены либо ожидать в очереди или на складе, либо уходить необслуженными.

Полная загруженность системы достигается при изобилии и организованном подходе клиентов в точном соответствии с моментами освобождения ячеек. Производительность системы (число актов обслуживания в единицу времени z) определяется временем единичного акта обслуживания τ и числом ячеек y ($z = y/\tau$).

Описание работы организованно загруженной системы совпадает с предыдущим параграфом и дается формулами (3)–(8) с соответствующим переименованием переменных и параметров.

В действительности «кинетика» работы реальной системы обслуживания часто существенно зависит от случайного характера подхода («транспорта») клиентов на вход системы (поиск покупателем продавца на рынке, появление самолетов противника в зоне ПВО и т. п.). Процессы появления клиентов должны быть в этих случаях описаны отдельно от собственно обслуживания для того, чтобы модель соответствовала прообразу ее. Отделив процессы обслуживания от транспорта, снова, как и в §2, получим пример Л-системы.

4. Рассмотрим популяцию простых живых организмов. Все особи популяции ведут одинаковое существование, включающее в себя поглощение питательных веществ (анаболизм), выделение отходов (катаболизм), рост, размножение, смерть и некоторые виды активности. Интенсивность процессов метаболизма для особи ограничена сверху (размерами и свойствами организма) и снизу (необходимостью обеспечивать основной обмен даже при полном отсутствии активности).

Рассмотрим сначала только основной обмен. Для него необходимы определенные вещества в составе продуктов питания и свободная энергия и притом в определенных количествах и в заданных пропорциях. Сами продукты питания могут быть весьма разнообразными по качеству и составу и могут поглощаться организмом неравномерно по времени. Однако в среднем за длительный период организм должен выдержать строгую диету по некоторым элементарным веществам, ибо недостаток хотя бы одного из необходимых веществ ведет к гибели. Вещества, поглощенные с пищей в избытке, организмом не усваиваются и уходят в выделения.

Популяция организмов представляет собой по основному обмену Л-систему, у которой в состав вектора A входят поглощаемые вещества и энергия, а также биомасса популяции, а в состав вектора B — новорожденные особи, а также отходы и трупы.

Различные активности организмов (добывание пищи, рост, размножение) требуют, сверх основного обмена, дополнительного расхода определенных веществ и свободной энергии в определенных пропорциях и пропорционально размерам активностей. Эти дополнительные расходы также ограничены сверху свойствами организма.

Поскольку организмы с простым, стереотипным поведением демонстрируют в среднем относительно постоянный набор активностей, популяция в целом представляет собой Л-систему. При изобилии продуктов питания узким местом является число особей (биомасса) популяции и прирост пропорционален поголовью (экспоненциальный рост). При недостатке питания или фондовых компонент существования (мест обитания и др.) узким местом становится фактор внешней среды, рост популяции замедляется, приостанавливается или происходит уменьшение поголовья (вымирание).

В данном примере мы имеем дело не с единственным типом процесса, представляющим собой Л-систему (как это имело место в примерах §2 и 3), а с системой, *построенной* из элементарных звеньев. При этом каждый отдельный процесс (звено), входящий в систему (кроме основного обмена), может быть включен или выключен не только воздействием узких мест самого этого процесса, но и факторами иного характера, имеющими природу нейро-гуморальных воздействий внутри организма, диктуемых характером поведения организма. В этом случае нам представляется обоснованным говорить об «управлении» физико-химическими процессами метаболизма и активности. Итак, популяция живых организмов представляет собой пример сложной управляемой Л-системы. (Подробнее этот пример разобран одним из авторов. *)

Список примеров Л-систем можно без труда продолжить, включив в их число такие объекты, как химическое производство, систему биохимических реакций, живую клетку, живую ткань, орган, организм, биогеоценоз, биосферу в целом, промышленное или сельскохозяйственное производство в масштабе станка или агрегата (бригады), цеха, предприятия, отрасли и системы производства страны или мирового хозяйства в целом, системы обработки, хранения и передачи информации, а также некоторые абстрактные объекты, представляющие теоретический интерес (саморазмножающиеся автоматы, растущие автоматы и т. п.).

Таким образом, разнообразие Л-систем достаточно велико, что делает их интересными для изучения. Мы не будем продолжать разбор примеров, а перейдем к описанию абстрактного объекта — модели Л-системы.

II. ОПИСАНИЕ Л-СИСТЕМЫ

5. Любая Л-система представляет собой реальный объект. Это означает, что при ее моделировании мы обязаны иметь в виду ее материальную природу, существование в реальном трехмерном физическом пространстве, выполнение в ее пределах и в окружающей среде всех законов природы и, в первую очередь, закона сохранения вещества, первого и второго законов термодинамики. Любая Л-система построена из веществ, являющихся химическими соединениями элементов таблицы Менделеева.

*Полетаев И. А. О математических моделях элементарных процессов в биогеоценозах. Проблемы кибернетики. М.: «Наука», 1966. Вып. 16. С. 171–191.

Рассматривая Л-систему, мы выделяем ее из ее окружения, проводя (быть может, лишь мысленно) отделяющие границы и очерчивая таким образом область физического пространства.

Модель Л-системы задается перечислением совокупности компонент, отмеченных внутри системы, совокупности описаний процессов, протекающих в системе, и графом-схемой взаимосвязей процессов. Кроме того, над Л-системой может быть задана схема управления процессами. Таким.образом, в модели мы разделяем систему на две части: «управляемую» (или собственно Л-систему) и «управляющую». Это диктуется не только удобствами (над одной и той же Л-системой могут быть надстроены различные системы управления), но и стремлением отделить явление кибернетического управления от обычных «неуправляемых» физико-химических процессов. Специфику процессов управления мы вкратце обсудим ниже.

6. Компонента системы есть любой класс объектов, отличаемый (в модели) от других компонент (тип химического вещества или энергии, тип сырья, деталей, изделий, особи биологического вида и т. п.). Для каждой компоненты задается ее физическая размерность и единица измерения. Все компоненты, учитываемые в модели, получают «имя» — целочисленный индекс i, принадлежащий списку компонент

$$i \in \widetilde{I} = \{1, 2, \ldots, i, \ldots, I\}.$$

Компоненты не являются независимыми; одна компонента может входить в состав других. Компонента, в состав которой не входят никакие другие компоненты модели, называется элементарной (в модели). Каждая компонента может быть задана вектором $\bar{a}_i$, перечисляющим количество элементарных компонент, входящих в состав единицы данной компоненты i («химический состав»).

Можно различать компоненты, вносимые в систему извне — «входные» ($i \in \widetilde{I}_1$), выносимые из системы вовне — «выходные» ($i \in \widetilde{I}_3$) и обращающиеся только внутри системы — «внутренние» компоненты ($i \in \widetilde{I}_2$). Компоненты локализованы внутри системы либо в активных узлах переработки, либо в каналах транспорта, либо в местах хранения («бункерах» или «депо»).

Процессы, протекающие в Л-системе, суть реальные физические процессы, имеющие необратимый в термодинамическом смысле характер. В моделях Л-систем рационально рассматривать каждый из элементарных процессов раздельно и локализовать его в определенной области пространства — узле, которому приписаны, если это необходимо, геометрические координаты. Основными типами процессов являются:

1) — процессы «переработки» компонент, иллюстративным прообразом которых может служить идеализированная химическая реакция, описанная выше, в §2;

2) — процессы «транспорта» или переноса компонент в пространстве (с затратой времени);

3) — процессы хранения (переноса во времени — с использованием для этого области пространства — бункера);

4) — процессы управления, частично пересекающиеся с предыдущими тремя типами и являющиеся их частью, частично же по необходимости выделяемые в модели в особые узлы, например, узлы распределения входных компонент между параллельно работающими узлами — потребителями.

В модели все узлы поименованы различными целочисленными индексами j, входящими в список узлов $j \in \widetilde{J} = \{1, 2, \ldots, j, \ldots, J\}$. Каждый узел j, который описывается векторами A_i и B_j [(3)–(4)] и функционирует в соответствии с формулами (5)–(8), называется «элементарным Л-узлом» (или Л-процессом). Компоненты β_{ij} из $\bar{A}$, не потребляемые в ходе процесса, а лишь присутствующие (типа катализаторов в примере §2), называются «фондовыми компонентами» или «фондами» узла j, компоненты α_{ij} из $\bar{A}$ — входными, а γ_{ij} из $\bar{B}$ — выходными компонентами узла j. Заметим, что физическая размерность величин α_{ij} и γ_{ij} (x_{ij}, z_{ij}) есть размерность потока (размерность компоненты, деленная на время), отличная от размерности фондов $\beta_{ij}(y_{ij})$, которая совпадает с размерностью компоненты. Размерность интенсивности процесса P_j нулевая.

В описании каждого процесса, если он исчерпывающим образом описан, должно быть соблюдено соответствие закону сохранения вещества для элементарных компонент, закону сохранения полной энергии и закону неубывания энтропии. Иначе говоря, для каждого процесса j

$$\sum_{i \in \widetilde{I}_1} x_{ij} = \sum_{i \in \widetilde{I}_3} z_{ij}, \tag{9}$$

где x_{ij} — количество i-й элементарной компоненты, имеющейся в составе каждой из входных компонент $i \in \widetilde{I}_1$ процесса j, z_{ij}— количество той же элементарной компоненты, имеющейся в составе каждой из выходных компонент $i \in \widetilde{I}_3$ (закон сохранения вещества). Далее

$$\sum_{i \in \widetilde{I}_1} E_{ij} = \sum_{i \in \widetilde{I}_3} E_{ij}, \tag{10}$$

где E_{ij} — полная энергия, содержащаяся в каждой из компонент процесса j, входных ($i \in \widetilde{I}_1$) и выходных ($i \in \widetilde{I}_3$) соответственно (закон сохранения энергии).

Кроме того,

$$\sum_{i \in \widetilde{I}_1} u_{ij} \geq \sum_{i \in \widetilde{I}_3} u_{ij}, \tag{11}$$

где u_{ij} — свободная энергия, содержащаяся в каждой из компонент i процесса j (закон неубывания энтропии).

7. Система, в состав которой входят взаимосвязанные элементарные Л-узлы, образует Л-систему. Для задания модели Л-системы кроме списков компонент и узлов и описания процессов необходимо задать связи узлов между собой. Каждая связь осуществляется между парой узлов направленно и заключается в передаче компонент от начального узла к конечному. Поскольку Л-узел представляет собой в модели единственный процесс, реальные объекты в модели приходится изображать несколькими связанными узлами. Так, например, химический реактор (реальный объект) можно представить в модели как процессы (узлы) собственно химических преобразований, узлы хранения реагентов (раствор) и узлы транспорта реагентов к месту реакции из раствора и от места реакции в раствор.

Совокупность связей задается нагруженным графом, вершинами которого являются процессы, перенумерованные индексом j и снабженные их описаниями, а ребрами — каналы передачи компонент. Отметим, что ребра *не представляют* собой узлы транспорта и им *не приписывается* задержка по времени; ребро лишь указывает на непосредственную (мгновенную) передачу компоненты от предыдущего узла к последующему. Каждый узел имеет входные и выходные ребра.

В графе связей отмечаются ребра, пересекающие границы Л-системы — входные и выходные ребра системы.

Подмножество элементарных взаимосвязанных Л-узлов системы можно выделить из системы, проведя соответствующую границу, и объявить сложным узлом той же системы. При этом ребра графа, пересекающие проведенную границу нового узла, объявляются его входными и выходными ребрами. Естественно полагать, что сложный узел не будет, вообще говоря, обладать функциональными свойствами элементарного Л-узла и его описание не будет укладываться в формулы (3)–(8).

Описание функционирования сложных узлов, состоящих из элементарных Л-узлов, составляет одну из задач исследования моделей Л-систем.

Для описания сложного узла модели (в пределах модели) могут и *не выполняться* балансные соотношения (9) — (11), выражающие законы физики. Это имеет место, если некоторая компонента i_0 имеется всегда в изобилии и потому (в условиях, которые отображаются в модели) никогда не образует узкого места (например, вода в океане). В таком случае эта компонента просто не записывается в векторах A_j. Однако в ее состав могут входить элементарные компоненты $i_1, i_2, \ldots$, оказывающие существенное влияние на течение процессов внутри системы и на производительность. В таких случаях в пределах модели создается ситуация, когда элементарные компоненты $i_1, i_2, \ldots$ возникают «из ничего» или же пропадают «никуда» (если компонента i_0 выносится из системы). Кажущееся нарушение в модели законов физики не должно нас смущать при условии, что построенная модель будет применяться *только* к изучению объектов, для которых выполнено условие изобилия по i_0. Лишь в моделях, которые исчерпывающим образом учитывают все участвующие компоненты, законы (9)–(11) обязаны строго выполняться.

8. Л-системы могут быть управляемыми. Термин «управление» мы будем понимать узко и специфично, а именно как систему воздействий на все или лишь некоторые процессы (узлы), внешнюю по отношению к управляемой Л-системе.

Формально управление процессом вводится в модель посредством записи в вектор A_j дополнительной координаты (одной или нескольких) — координаты управления u_j, на которой может, наравне с другими координатами, реализоваться узкое место процесса. Таким образом, управление может затормозить или выключить процесс, но не может поднять его интенсивность выше естественных ограничений сверху. Компонента u_j (компонента управления процессом j) вырабатывается и передается не в самой Л-системе, а в выделенной управляющей системе, природа которой не имеет в модели решающего значения. Работу системы управления определяют следующие факторы: узлы с которых снимается информация, перечень измеряемых признаков, алфавит, скорость передачи, алгоритм обработки информации, узлы, на которые воздействуют выходные команды, и характер воздействия. Управляющая система может быть централизованной или рассеянной и даже состоящей из несвязанных между собой локальных подсистем.

В различных реальных Л-системах управление может реализоваться различными конкретными способами. В системах, включающих в себя человека, это может быть устный или письменный приказ, распоряжение, план и т. п.; в физических системах — замыкание и размыкание контактов, изменение параметров схемы (электрического сопротивления, емкости и т. п.), открывание заслонки, перемещение регулятора; в химических системах — добавление специфического катализатора, фермента; в биологических системах — нервный импульс, выделение гормонов. Управление реализуется посредством реальных процессов, несущих информацию (сигнальных процессов). Система, реализующая управление (управляющая система) *над данной* Л-системой (управляемой), всегда содержит метастабильные звенья, питаемые свободной энергией и способные усиливать и преобразовывать (перекодировать в новый алфавит) сигнал. Регулирующее или управляющее воздействие на узлы Л-системы по своему энергетическому и вещественному содержанию может быть и, как правило, бывает малым по сравнению с процессами в Л-системе; тем не менее в силу своей природы и структуры оно оказывает решающее воздействие на течение процессов в Л-системе.

Управление придает системе (любой, не только Л-системе) новые свойства и возможности, которые, однако, проявляются лишь на фоне собственных характеристик неуправляемой системы, и лишь в меру возможностей последней. Синтез системы управления *над* неуправляемой системой, направленный на выполнение определенной цели и обеспечение заданного функционирования (в частности, синтез оптимальной системы управления) может быть эффективно выполнен лишь с учетом собственных свойств неуправляемой системы. Это служит основанием для разделения управляемой и управляющей систем, первая из коих задана, вторая же — проектируется (быть может, в различных вариантах).

Таким образом, разбиение системы на две части — управляемую и управляющую — диктуется методологией задачи синтеза и должно проводиться в интересах исследования. Следовательно, деление это может носить несколько условный характер и, в частности, игнорировать тот факт, что отдельные узлы управляемой системы могут по формальному определению и описанию совпадать с типом узлов управляющей системы (например, являться активным метастабильным узлом).

Более того, система, над которой строится управление, может, в частности, уже обладать собственной (внутренней) системой управления с некоторым заданным (известным или неизвестным) алгоритмом управления; пример тому — конфликтная или «игровая» ситуация, когда на систему оказывают управляющие воздействия (и, может быть, не только управляющие) несколько управляющих (или иных) систем — «игроков».

При моделировании естественных систем *первым* вопросом является, по нашему убеждению, построение модели основной неуправляемой системы как базы для изучения структуры и функции управления ею. То же относится и к задаче синтеза систем управления над заданной системой. Поэтому мы сосредоточим внимание в основном на описании неуправляемых Л-систем и коснемся вопросов управления лишь вкратце.

III. ПРИМЕР Л-СИСТЕМЫ

9. Рассмотрим в качестве примера с некоторыми подробностями один частный класс Л-систем.

Пусть в системе обращается n компонент $x_i,\ i \in \{1, 2, \ldots, n\}$ и имеется N процессов переработки, идущих с интенсивностями $P_s,\ s \in \{1, 2, \ldots, N\}$. Кроме того, в системе имеется n бункеров хранения компонент, по одному на каждую компоненту, и соответствующее число процессов транспорта от бункера к узлу переработки (входные компоненты узла переработки) и от узла переработки к соответствующему бункеру (выходные компоненты узла переработки). Каждый бункер имеет столь большую емкость, что она никогда не лимитирует величину запасов компоненты. Процесс транспорта работает без задержки по времени.

Обозначим через x_i, величину запаса i-й компоненты в «ее» бункере. Поток этой компоненты к s-му узлу переработки ξ_{is} положим пропорционфльным запасу x_i с коэффициентом k_{is}

$$\xi_{is} = k_{is} x_i;\ k_{is} \geq 0;\ x_i \geq 0.$$

Положим также, что каждый s-й процесс использует внешние компоненты системы, не вырабатываемые внутри системы. Нам нет нужды рассматривать их все, поэтому мы вводим в рассмотрение лишь внешнюю компоненту системы E_s для каждого процесса, а именно ту, на которой раньше других достигается минимум отношения E_s/b_{0s} — потребление внешней компоненты E_s процессом s при его единичной интенсивности.

Мы будем допускать, что каждый процесс переработки может одновременно и потреблять и производить одну и ту же компоненту i; соответствующие константы будут помечаться a_{is}^{+} и a_{is}^{-}.

Фондовые компоненты процессов будем полагать изобильными и не записывать их в выражении интенсивностей процессов.

10. Предположим, что все переменные x_i суть непрерывные функции времени. Это дает нам возможность построить и изучить систему дифференциальных уравнений, описывающих кинетику Л-системы.

Обозначив через Δx_i приращение запаса i-й компоненты за промежуток времени от t до $t+\Delta t$, можем записать

$$\Delta x_i = \sum_{s=1}^{N} a_{is}^{+} P_s \Delta t - \sum_{s=1}^{N} a_{is}^{-} P_s \Delta t. \tag{12}$$

Здесь a_{is}^{+} — количество i-й компоненты, производимое s-м процессом в единицу времени при единичной интенсивности процесса; a_{is}^{-} — количество i-й компоненты, потребляемое s-м процессом в единицу времени при единичной интенсивности процесса; P_s — интенсивность s-то процесса; s-е слагаемое в первой сумме справа соответствует прибыли, а во второй сумме — убыли запаса i-й компоненты от s-го процесса за промежуток $(t, t+\Delta t)$.

Разделим уравнение (12) на Δt и перейдем к пределу при $\Delta t \to 0$. Тогда получим

$$\frac{d\,x_i}{d\,t} = \sum_{s=1}^{N} a_{is}^{+} P_s - \sum_{s=1}^{N} a_{is}^{-} P_s, \quad i \in \{1, 2, \ldots, n\}.$$

Интенсивность P_s равна единице, если в процесс поступает ровно a_{is}^{-} i-й компоненты и b_{0s} внешних ресурсов. В противном случае будем полагать, что

$$P_s = \min\left(\frac{E_s}{b_{0s}}, \frac{k_{1s}x_1}{a_{1s}^{-}}, \frac{k_{2s}x_2}{a_{2s}^{-}}, \ldots, \frac{k_{ns}x_n}{a_{ns}^{-}}\right). \tag{13}$$

Здесь $k_{is}x_i$ — поток компоненты i в s-й узел. При этом $E_s(t) \geq 0$;

$a_{is}^+,\ a_{is}^-,\ b_{0s}\ \geq 0$. Подставив выражение P_s в систему, будем иметь

$$\begin{aligned}\frac{d\,x_i}{d\,t} &= \sum_{s=1}^{N} a_{is}^+ \min\left(\frac{E_s}{b_{0s}}, \frac{k_{1s}x_1}{a_{1s}^-}, \frac{k_{2s}x_2}{a_{2s}^-}, \ldots, \frac{k_{ns}x_n}{a_{ns}^-}\right) \\ &- \sum_{s=1}^{N} a_{is}^- \min\left(\frac{E_s}{b_{0s}}, \frac{k_{1s}x_1}{a_{1s}^-}, \frac{k_{2s}x_2}{a_{2s}^-}, \ldots, \frac{k_{ns}x_n}{a_{ns}^-}\right). \end{aligned} \tag{14}$$

Мы получили систему n обыкновенных дифференциальных уравнений относительно n неизвестных функций x_i — компонент Л-системы, записанную в нормальной форме Коши.

И. А. Полетаев

К определению понятия «информация». I. Семантический аспект. Об «информации по смыслу»

Автоматы породили кибернетику.
Академик В. А. Трапезников

Сделана попытка очертить понятие «информации по смыслу» в отличие от «количества информации по Шеннону» с помощью упрощенной модели отображения множества вершин конечномерного единичного куба. Устанавливается связь введенных понятий с общей задачей распознавания образа.

1. Уоррен Уивер [1] во введении к статье К. Шеннона отметил, что понятие «информация» имеет семантический, технический и прагматический аспекты. Термин «информация» употребляется в настоящее время чрезвычайно широко.

Развитие идей и применений кибернетики — науки, изучающей информацию и управление посредством информации, как ни странно, мало прибавило к четкости и строгости определения понятия, представленного этим термином. Более того, в ряде работ последних лет этот термин применяется столь произвольно, что его употребление может вызвать и вызывает недоразумения.

Теория информации в том виде, как она построена и изложена Клодом Шенноном [2], отражает лишь технический аспект информации как естественного явления. Истоком и областью применения этой теории являются технические устройства связи, работающие в весьма узком классе ситуаций, а именно в условиях стационарного потока символов (сообщений), выдаваемых источникои. Целью построения теории является введение меры (количество информации) и единицы измерения (бит), с помощью которых достигается получение ряда оценок качества устройств передачи (скорости передачи, пропускной способности) и способов кодирования.

Многочисленные попытки распространить аппарат теории информации и использовать его за пределами очерченной ситуации — в биологии, социологии и даже эстетике — часто ведут к явным или скрытым недоразумениям, о чем предупреждал и сам автор теории [3].

Подчас имеет место смешение понятий и терминов «информация» и «количество информации (по Шеннону)», хотя второе не может и не призвано заменить первое. Позволив себе прибегнуть к аналогии, можно сказать, что здесь дело обстоит так же, как с понятиями вещества и массы. Любое вещество обладает массой, но одна лишь масса не исчерпывает характеристик вещества. В отношении понятия «информация» кроме ее технической меры (количества информации) необходимо выяснить его семантический и прагматический аспекты, что до сего времени не достигнуто в достаточной степени.

Еще более запутанная и чреватая недоразумениями картина складывается в тех случаях, когда некоторые авторы не проводят четкого различия между энтропией источника информации и физической энтропией системы (подробно это мы обсудим во второй части статьи). Цепь порождаемых таким образом недоразумений ведет к тому, что информацией объявляют любое взаимодействие элементов системы, а к управляющим системам причисляют «...такие объекты, в которых управления в обычном смысле нет». В результате полностью исчезает специфика кибернетической проблематики, и кибернетика как наука становится «всеобъемлющей наукой наук», что ей отнюдь не свойственно по ее природе.

2. Приступая к попытке очертить семантический аспект понятия информации, мы будем исходить из того, что историческим первоисточником понятий управления и информации является автомат в его техническом воплощении. Существенными являются при этом следующие свойства автомата:

1) система открыта и непрерывно снабжается свободной энергией от источника извне;

2) система *метастабильна*, т. е. имеет свойство демонстрировать реакцию высокого уровня энергий на специфические *слабые* воздействия извне (сигналы); при формировании реакции используется энергия внешнего источника. При этом, разумеется, в составе системы допустимы и пассивные звенья, *не* обладающие свойством метастабильности;

3) разнообразие реакций и их приуроченность к определенным сигналам определяются структурой (конструкцией) автомата, быть может, лабильной.

Наличие аналогичных свойств у любой системы, отличной от технического автомата, делает такую систему в потенции объектом, способным демонстрировать явление управления посредством информации;

такую систему будем называть системой, допускающей управление.

Автомат или подобная ему система со свойствами 1, 2, 3 демонстрирует возможности, которыми не обладает замкнутая система — традиционный объект изучения физики. Укажем наиболее существенные из этих возможностей.

Во-первых, *усиление* сигнала. На выходе автомата результат воздействия оказывается по уровню энергии существенно выше энергии входного сигнала. Последовательное включение звеньев усиления позволяет достичь в принципе произвольно высоких коэффициентов усиления.

Во-вторых, физическое *кодирование* (преобразование физической природы) сигнала. Реакция автомата на сигнал может иметь отличную от самого сигнала физическую природу. Последовательное включение кодирующих звеньев допускает получение любого физического преобразования сигнала. Наличие для каждого преобразования ему обратного делает любое физическое кодирование обратимым. Универсальность физического кодирования делает природу сигнала в автомате мало существенной и от нее без труда удается отвлекаться в теоретических построениях. Существенным, однако, остается множество состояний, или алфавит, сигнала. Сигнал на выходе цепочки кодирующих звеньев перестает быть самоочевидным «физическим» следствием сигнала на входе, а становится скорее его «знаком» или «символом», условным в силу конструкции автомата. Независимо от физического кодирования осуществляется также абстрактное кодирование (изучаемое в теории информации), быть может, в тот же физический алфавит.

В-третьих, *передача* сигнала, если он кодируется в физическом алфавите процесса, имеющем, в силу своей природы, характер распространения.

В-четвертых, *запоминание* сигнала и считывание его из памяти, т. е. перекодирование сигнала из алфавита процессов, протекающих во времени, в алфавит состояний объектов в пространстве, и наоборот.

В-пятых, *комбинирование* совокупностей сигналов и появление в результате новых сигналов, являющихся функциями исходных. Обычно такой процесс называется «обработкой информации», но сводится он всегда и непосредственно к обработке сигнала, как физического объекта или процесса, или совокупности сигналов.

И, наконец, в-шестых, *исполнение* сигнала, т. е. перекодирование его в достаточно мощную реакцию автомата, направленную на внешнюю среду и уже не обязательно являющуюся сигналом для какой-либо системы.

3. Как мы уже отмечали, разнообразие способов кодирования и алфавитов влечет за собой то, что сигнал или реакция на выходе кодирующего автомата зависит от структуры последнего и может быть весьма разнообразной. Тем не менее, для каждого данного автомата в силу постоянства его структуры и правил кодирования выходной сигнал является закономерно связанным со входным. По выходу автомата может быть восстановлен входной сигнал, хотя, быть может, лишь с точностью до принадлежности к классу. Это именно тот типичный случай, о котором в просторечии принято говорить, что выходной сигнал «несет информацию» (сведения, данные) о сигнале на входе или о породившем его событии внешней среды либо, что выходной сигнал является отображением, знаком, символом, отпечатком, сигнала на входе.

Таким образом, явление, называемое обычно информацией, состоит в том, что некоторые события на входе системы (автомата) влекут за собой некоторые другие события внутри системы и на ее выходе, которые связаны с первыми цепочкой процессов кодирования и потому условно, в коде системы, «соответствуют» им. Иначе говоря, явление информации состоит в *наличии* любого *кода* (и реальной системы, реализующей код) над любыми алфавитами. Изменения кода меняют смысл информации, содержащейся в данном сообщении (символе, сигнале), но не устраняют факта наличия осмысленной информации вообще. Лишь полное отсутствие кода делает сигнал «бессмысленным», уничтожает наличие информации в нем и превращает его в «шум» или «помеху».

Отметим попутно, что термин информация употребляется в речи по крайней мере в двух различных контекстах: например, во фразе: «он получил информацию о данном событии» или в другой фразе: «он получает регулярно информацию о таких событиях».

В первом случае смысл сводится к наличию конкретного соответствия между прообразом (событием) и образом (сообщением); во втором — к наличию соответствия между множествами прообразов и образов.

Формально понятие информации по содержанию (по смыслу, семантически) сводится к наличию отображения множества объектов (фактов, состояний) внешнего мира во множество сообщений, реализованных символами физического алфавита сигнала. Отображение это может быть в общем случае неоднозначным в обе стороны.

Выходной сигнал кодирующего автомата A_1 может быть воспринят другим автоматом (или иной системой) A_2, если будет подан на вход последнего. A_2 по полученному сигналу вырабатывает реакцию на внешнее событие, послужившее прообразом сигнала, являющегося «смыслом сообщения, реализованного сигналом» и переданного от A_1 к A_2. При этом мыслимы два типа исходов:

1) Автомат A_2 согласован на входе по коду с выходом автомата A_1 и потому полноценно реализует функцию, заложенную в него по мысли конструктора; такой автомат A_2 мы будем называть компетентным к сигналам с выхода A_1.

2) Автомат A_2 работает в произвольном коде, несогласованном с кодом на выходе A_1; он некомпетентен к получаемым сигналам, которые для него не несут информации об исходных событиях, и потому, реагируя на шум, он не в состоянии реализовать назначенную ему функцию.

Таким образом, «информация по смыслу» является релятивной; данный сигнал может нести информацию для компетентной системы и является одновременно шумом для системы некомпетентной. Некомпетентность может обусловливаться как невосприимчивостью к физической реализации сигнала («не слышу»), так и к различию кодов («не понимаю»).

4. Высказанные выше очевидные соображения послужат нам подходом к более подробному *описанию* «информации по содержанию», которое должно послужить, по нашему замыслу, возможности сравнивать различные *отображения*, устанавливать между ними отношения и выделять их *свойства* или признаки классификации.

Для того чтобы пояснить на *уровне интуиции* мысль о существовании различных видов «информации по содержанию» в одном и том же объекте, приведем простой пример. Если мы имеем перед собой рукопись и желаем узнать как можно больше о ее авторе, мы будем не только читать текст и вникать в его содержание, но заинтересуемся неизбежно также литературным стилем, языком, грамматикой, почерком или шрифтом, расположением текста на странице, числом и характером помарок и исправлений, размером и качеством бумаги, типом чернил или красок, быть может, даже запахом и т. д. Каждый из этих признаков несет «свою собственную» информацию, быть может взаимно противоречивую, об авторе рукописи.

Чтобы очертить проблему несколько строже, прибегнем к упрощению и представим себе некоторую *модель* ситуации.

Пусть имеется система R — конечная совокупность элементов, каждый из которых независимо от других может принимать дискретные состояния из некоторого множества состояний. Мы можем положить, что состояние каждого элемента описывается логической переменной $x_i \in \{0,1\},\ i \in \{1,2,\ldots,n\}$, а состояние системы R в целом — значением логического вектора

$$\tilde{x} =< x_1, x_2, \ldots, x_i, \ldots, x_n > .$$

Любое из 2^n состояний системы достижимо, и других состояний не существует.

Будем считать, что система R при достаточно большом n является грубой моделью среды или внешнего мира. Трудности, возникающие в связи с утверждением о бесконечной протяженности мира в пространстве и времени, мы обойдем заявлением, что моделированию подвергается лишь та *часть* мира, которая может оказать влияние на исход *реальных* экспериментов и наблюдений, каждый из которых относится лишь к конечной области физического пространства (вмещенной в сферу конечного радиуса ρ), длится конечный промежуток времени T (равный, например, времени существования человечества) и измеряется с конечными значениями погрешностей. Тогда наши интересы не простираются за пределы «практического мира», вмещенного в сферу радиуса $\rho + cT$ (c — скорость света), и касаются лишь конечного числа объектов и состояний. *

В пределах системы R или вне ее представим себе систему I меньшего объема, описанную подобно предыдущему в виде вектора $\tilde{y} =< y_1, y_2, \ldots, y_j, \ldots, y_m >$, где $y_j \in \{0,1\},\ j \in \{1,2,\ldots,m\};\ n \gg m$, и предназначенную служить грубой моделью наблюдателя, y_j — суть признаки объектов $[\tilde{x}]$, доступные, так сказать, непосредственному восприятию наблюдателя I.

Будем считать, что система R служит источником информации, а система I — ее реципиентом. Каждое состояние $\tilde{x}$ системы R является «содержанием» (смыслом, прообразом) сообщения, передаваемого по некоторым каналам связи от R к I и фиксируемого в виде определенного состояния $\tilde{y}$ системы I — состояние памяти I. Множество состояний $M_I = \{\tilde{y}\}$ системы I есть алфавит, в котором кодируется и фиксируется сообщение о состоянии $R:\ \tilde{x} \in M_R = \{\tilde{x}\}$.

Совокупности M_R и M_I состояний R и I могут быть представлены как множества вершин единичных пn- и M-мерных кубов, каждая из которых записывается как значение логического вектора $< \sigma_1, \ldots, \sigma_k >$

*Учитывая корпускулярную, т. е. дискретную, физическую структуру материи.

и отмечается конъюнкцией $K = \bigwedge\limits_{i-1}^{k} \xi_i^{\sigma_i}; \ \sigma_i \in \{0,1\}$.

Для обозначения вершины мы будем использовать как синонимы термины: состояние, событие, слово (n-или m-двоично-разрядное), сообщение, объект, факт.

Любая совокупность вершин $M_\varphi \subset M_R$ характеризуется некоторой булевой функцией $\varphi(\tilde{x})$ от n переменных $< x_1, x_2, \dots, x_n >$. Для обозначения булевых функций мы будем также применять термин признак.

5. Информация от R к I о состоянии R есть отображение $M_R \to M_I$ конечного множества M_R во множество M_I с меньшим числом элементов, быть может не всюду определенное и неоднозначное.

Если $|M_R| = 2^n$ и $|M_I| = 2^M$ суть соответственно числа вершин системы R и I, то число Θ попарно различных отображений равно

$$\Theta = \left(2^{|M_I|}\right)^{|M_R|} = 2^{2^{n+m}}.$$

Рассматривая слово $\tilde{y} =< y_1, y_2, \dots, y_m >$ как сообщение, принятое наблюдателем I о событии $\tilde{x}$ в R в смысле отображения («информации») $M_R \to M_I$, можно утверждать, что не исключены особенности следующих типов:

1) неоднозначность прообраза (омонимия); одному слову $\tilde{y}$ в I соответствует несколько различных слов $\tilde{x_1}, \tilde{x_2}, \dots, \tilde{x_k}$ в R. Для этого достаточно неоднозначности отображения $M_I \to M_R$;

2) неоднозначность образа (синонимия); одному слову $\tilde{x}$ в R соответствует несколько различных слов $\tilde{y_1}, \tilde{y_2}, \dots, \tilde{y_l}$ в I. Для этого достаточно неоднозначности прямого отображения $M_R \to M_I$;

3) отсутствие образа; существуют слова $\{\tilde{x}^*\}$ в R не имеющие образа в I. Для этого достаточно, чтобы отображение $M_R \to M_I$ было не всюду определенным;

4) отсутствие прообраза; существуют слова $\{\tilde{y}^*\}$ в I не имеющие прообраза в R. Для этого достаточно, чтобы отображение $M_R \to M_I$ было инъективным (*во* множество M_I).

Перечисленные очевидные особенности отображения («информации») являются не свойствами объекта R, а свойствами системы, передающей сигналы от R к I, которую мы будем именовать *восприятием* (R в I). Восприятие реализует «информацию по содержанию» от R к I.

6. Рассмотрим модель восприятия, в котором перечисленные выше особенности, или аберрации, полностью отсутствуют. Положим $m = n$

и построим взаимно однозначное отображение M_R на M_I. Это можно сделать различными способами. Положим y_j равным $y_j(\tilde{x})$ — булевой функции от n переменных $\tilde{x}$. Будем рассматривать только такие булевы функции $\varphi(\tilde{x})$, для которых число вершин — элементов множества M_R, характеризуемых функцией, равно точно половине числа вершин единичного n-мерного куба R. Такие функции будем называть функциями, правильными относительно M_R.

Выберем одну такую функцию; это можно сделать числом способов, равным $\mathrm{C}_{2^n}^{2^{n-1}}$, и положим ее равной y_2. Пусть характеризуемое ею множество есть $M_{y_1} \subset M_R$, а его дополнение есть $\overline{M_{y_1}}$.

Выберем теперь вторую функцию y_1, правильную относительно M_R, M_{y_1} и $\overline{M_{y_1}}$; это можно сделать числом способов, равным $\left(C_{2^{n-1}}^{2^{n-2}}\right)^2$.

Продолжим выбор аналогичным образом, требуя чтобы на k-м шаге функция была правильной относительно M_R и всех пересечений ранее полученных множеств

$$M_{y_1} \bigcap M_{y_2} \bigcap \cdots \bigcap M_{y_{(k-1)}};$$

$$\overline{M}_{y_1} \bigcap M_{y_2} \bigcap \cdots \bigcap M_{y_{(k-1)}} \ldots \overline{M}_{y_1} \bigcap \overline{M}_{y_2} \bigcap \cdots \bigcap \overline{M}_{y_{(k-1)}}.$$

Выбор y_k может быть осуществлен числом способов, равным $\left(C_{2^{n-k+11}}^{2^{n-k}}\right)^{2^k}$.

На n-м шаге процесс заканчивается и мы получаем логический вектор

$$\tilde{y}(\tilde{x}) =< (y_1(\tilde{x}), y_2(\tilde{x}) \ldots, y_n(\tilde{x}) >,$$

который мы будем именовать базисом «правильного» отображения M_R на M_I. Нетрудно видеть, что любое пересечение множеств

$$M_{y_1}^{\sigma_1} \bigcap M_{y_2}^{\sigma_2} \bigcap \cdots \bigcap M_{y_n}^{\sigma_n}$$

(где $\sigma_k \in \{0,1\}$ и $M_k^{\sigma_k} = M_k$, если $\sigma_k = 1$; а $M_k^{\sigma_k} = \overline{M_k}$, если $\sigma_k = 0$) состоит из единственной вершины куба R и характеризуется единственной конъюнкцией

$$y_1^{\sigma_1} \bigwedge {y_2}^{\sigma_2} \bigwedge \cdots \bigwedge {y_n}^{\sigma_n}$$

— вершиной куба I. Этим обеспечивается однозначность отображения.

Число правильных базисов, т. е. число способов, которыми может быть выбран базис $\tilde{y}(\tilde{x})$:

$$\nu = \prod_{k=1}^{n} \left(C_{2^{\text{п}-k+11}}^{2^{n-k}} \right)^{2^k} = (2^n)!,$$

равно числу различных подстановок без повторений из 2^n элементов. Отображения посредством правильных базисов исчерпывают все возможные взаимно однозначные отображения множества M_R на M_I (при $m = n$, т. е. на себя).

Отображение посредством правильного базиса $\tilde{y}(\tilde{x})$ допускает однозначное и полное воспроизведение прообраза, т. е. построение правильного базиса $\tilde{x}(\tilde{y})$ обратного преобразования. Отображение такого рода отвечает тому, что принято называть «полной информацией» (I относительно R).

Способ задания отображения посредством базиса $\tilde{y}$ (булевых функций y_j позволяет оперировать не со всем множеством M_R (с числом элементов 2^n), а лишь с n-объектами $y_1, \ldots, y_n$. Это достоинство способа задания отображения разумно сохранить и в общем случае.

7. Мы можем воспользоваться построением базиса $\tilde{y}(\tilde{x})$ с помощью булевых функций также и для случая «неполной информации». При этом можно положить $m < n$ и выбрать в качестве базисных булевых функций не только правильные, а любые функции. Полученный таким путем базис реализует модель восприятия $M_R \to M_I$ и может обладать первой и четвертой особенностями из числа отмеченных в п. 5. Попутно заметим, что для реализации моделей восприятия, обладающих второй и третьей особенностями, достаточно, по-видимому, воспользоваться переменными и функциями трехзначной логики, приписав третьему значению переменных свойство «не определено» (не имеет смысла).

Для базиса $\tilde{y}(\tilde{x})$, построенного из булевых функций при $m < n$ (такой базис мы будем называть неполным), всегда имеет место неоднозначность обратного отображения. Прообраз $\tilde{x}$ данного слова $\tilde{y}$ есть подмножество $M_y \subset M_R$. Таким образом, восприятие с неполной информацией всегда является *классификацией* и неспособно *различать* элементы внутри класса. Учитывая, что число возможных базисов для не слишком малых n и m чрезвычайно велико, попытки построить восприятие, имитирующее некоторое заданное (по типу классификации) восприятие и использующие для этой цели случайный выбор или жребий, заведомо обречены на неудачу. По-видимому, это подтверждается практикой построения перцептронов, пытающихся имитировать *человеческое* восприятие. Последнее, несомненно, является весьма специфичным частным случаем. Возможно, что люди, и даже животные, столь непринужденно решают задачу классификации («распознавания образа») лишь потому, что эта классификация является для них врожденной, диктуемой сложившейся онто- и филогенетически органической структурой восприятия. Возможно, что для животных не существует единственного «хорошего» восприятия, которому они должны выучиться в онтогенезе. Генетически, онтогенетически и социально сложившееся восприятие должно лишь обеспечивать нужды организма в среде на достаточном уровне, устанавливаемом отбором. Восприятие может быть различным для разных видов и даже, быть может, особей внутри вида.

Пусть $\tilde{y}(\tilde{x})$ — неполный базис. Любая булева функция $\varphi(\tilde{y})$ характеризует некоторое множество вершин куба $I{\sim}M_\varphi^{(I)}$ и, следовательно, множество $M_\varphi^{(R)} \subset M_R$ вершин куба R. Пусть $\{\varphi(\tilde{y})\}$ — множество *всех* булевых функций от $\tilde{y}$, а $\mathfrak{M}_\varphi^{(R)} = \{M_\varphi^{(R)}\}$ — множество всех подмножеств M_R, характеризуемых этими функциями. Тогда $\mathfrak{M}_\varphi^{(R)}$ является собственным подмножеством множества $\{M^{(R)}\}$ (множества всех подмножеств M_R).

Иначе, — в M_R всегда найдется подмножество M_u, не принадлежащее $\mathfrak{M}_\varphi^{(R)}$ и, следовательно, такое, что, пользуясь только функциями y_j из неполного базиса $\tilde{y}(\tilde{x})$, невозможно построить его характеристическую функцию. Назовем такое множество неотделимым в базисе $\tilde{y}(\tilde{x})$, а базис — неполным относительно M_u.

Пусть некоторые функции $y_{j_1}, y_{j_2}, \ldots, y_{j_j}$ из неполного базиса $\tilde{y}(\tilde{x})$ могут быть выражены через остальные функции того же базиса. Тогда такой базис мы будем называть избыточным. Характерной особенностью нзбыточного базиса является то, что часть слов, построенных в $\tilde{y}$, не имеет прообраза в R, т. е. эти слова являются бессмысленными или фантастическими.

Базис неполный и/или избыточный будем называть неправильным.

Дополнив правильный базис «лишними» функциями $y_{n+1}, y_{n+2}, \ldots, y_N$, а затем, быть может, подвергнув его правильному преобразованию $\tilde{y}_{(N)} \to \tilde{z}_{(N)}(\tilde{y})$, получим базис полный и избыточный. По нему могут быть восстановлены все прообразы $\tilde{x}$ в исходном базисе, причем кроме них будут иметь место «пустые» слова, не имевшиеся первоначально в базисе $\tilde{x}$.

Любой базис $\tilde{y}^*(\tilde{x})$ в совокупности с перечнем (характеристической функцией множества) слов, пустых в нем (не имеющих прообраза в $\tilde{x}$), есть «основной словарь содержательных или осмысленных понятий» в данном отображении $M_R \to M_I$. Такой словарь принято называть *тезаурусом.*

Исходя из тезауруса, можно построить все производные понятия (классы) в виде булевых функций, отвечающих подмножествам $M_\varphi^{(R)} \subset M_R$, отделимым в данном базисе $\tilde{y}^*(\tilde{x})$. Подвергая базис $\tilde{y}^*$ *правильному* преобразованию $\tilde{y}^* \to \tilde{y}^0(\tilde{y}^*)$, мы сохраним в новом базисе (полном относительно $\tilde{y}^*$) полностью все множество отделимых подмножеств $\{M_\varphi^{(R)}\}_{\tilde{y}^*} = \{M_\varphi^{(R)}\}_{\tilde{y}^0}$, но изменим тезаурус (т. е. в качестве основных будут выбраны другие понятия или классы).

Множество слов M_I в базисе $\tilde{y}^*$ может быть подвергнуто снова преобразованиям $\tilde{y}^* \to \tilde{y}^0 \to \tilde{y}^{(1)} \ldots$ с помощью базисов уменьшающейся размерности и сужения (и преобразования) тезауруса. Такую цепочку (или дерево, если базис $\tilde{y}^*$ подвергается нескольким *различным* отображениям $\tilde{y}^* \to \tilde{y}_1;\ \tilde{y}^* \to \tilde{y}_2; \ldots$) можно рассматривать как иерархию абстракций.

8. Рассмотрим модель задачи распознавания образа. Пусть во множестве M_R имеется подмножество $M_u \subset M_R$, элементы которого (и только они) представляют особый «интерес» или «ценность»; они должны легко «опознаваться» или выделяться из прочих. M_u характеризуется булевой функцией $\varphi_u(\tilde{x})$. Пусть задан неполный базис $\tilde{y}(\tilde{x})$.

Чтобы решить задачу распознавания, требуется, используя только признаки $\tilde{y}$, определить, принадлежит ли любой $\tilde{x}$ к M_u или нет [найти значение $\varphi_u(\tilde{x})$].

Для любых $\tilde{y}$ и M_u могут иметь место два (и только два) случая:

(A_1): $\varphi_u(\tilde{x})$ может быть выражена через переменные y_j, входящие в заданный базис $\tilde{y}$. Задача классификации или распознавания в этом случае оказывается решенной, если найдено $\varphi_u(\tilde{y})$. Определение вида φ_u есть задача «обработки информации».

(A_2): $\varphi_u(\tilde{x})$ не может быть выражена только через $\tilde{y}$ (M_u неотделимо в $\tilde{y}$). Задача распознавания в этом случае не решается точно. Можно найти такое множество M_u', которое выражается через $\tilde{y}$ и притом «мало отличается» от M_u. Для точного решения задачи требуется изменить базис, введя в него новые функции, т. е. расширить тезаурус.

9. Пусть мы имеем случай (A_2). Выделим одну вершину $I \sim [\tilde{y}_1]$, такую, что множество ее прообразов $M_u \subset M_R$ пересекается с M_u на непустом множестве. Теперь, не меняя значения $[\tilde{y}_1]$, т. е. закрепив все «условия эксперимента», данные нами в смысле информации $\varphi(\tilde{y})$, будем перечислять в некотором порядке (например, в лексикографическом) элементы M_y, наблюдая появление или непоявление элементов, принадлежащих M_u. Серии подобных экспериментов «при неизменных условиях» [в смысле информации $\varphi(\tilde{y})$] почти при всех порядках перечисления дадут результат, неотличимый от появления случайного события $(\tilde{x} \in M_u)$. При этом вероятность появления события $\tilde{x} \in M_u$ будет существовать и равняться отношению мер множеств $M_u \cap M_y$ и M_y.

Пусть теперь задан некоторый порядок перечисления элементов M_R. В процессе перечисления будем отмечать частоты появления «сообщений» $[\tilde{y}]$. Эти частоты определяются постоянными значениями вероятностей, т. е. отношениями мер множеств M_{y_1} и M_R. R в таком эксперименте вполне соответствует «источнику информации в смысле Шеннона» с определенной энтропией на символ.

Возвращаясь к задаче распознавания в случае (A_2), мы можем выделить множество вершин $M_u^{(I)}$ такое, что перечислением только их прообразов — элементов $M_u^{(R)}$ — мы получим максимальную вероятность появления элемента. Процедура выделения так называемых информативных признаков, принятая во многих современных методиках машинного распознавания образа, направлена именно на такое построение.

10. Представим себе два автомата I_1, и I_2 одинаковой размерности $m_1 = m_2 = m < n$, имеющие разные (неполные) базисы $\tilde{y}_1$ и $\tilde{y}_2$ и получающие информацию от R. Пусть оба они способны реагировать на сообщения от R и притом некоторым «адекватным» (избранным конструктором автомата) способом. Для наугад выбранных $\tilde{y}_1$ и $\tilde{y}_2$ могут иметь место «взаимонепонимания», когда несколько сообщений, совпадающих по содержанию для одного из них, окажутся различными для другого и наоборот. Использование автоматов при их последовательном включении, когда I_1 получает информацию от R, передает ее I_2, а I_2 исполняет, в ряде случаев не могло бы быть осуществлено, ибо не существует кода из $\tilde{y}_1$ в $\tilde{y}_2$, служащего «переводом смысла» сообщения. Для того, чтобы такого рода совместное использование автоматов было возможно, необходимо, чтобы $\tilde{y_1}(\tilde{x})$ и $\tilde{y_2}(\tilde{x})$ оказались бы связанными правильным преобразованием, которое и сможет служить рабочим кодом взаимной коммуникации (и притом — единственным).

11. Рассмотрим один частный случай постановки задачи распознавания образа. Пусть на R задано преобразование с правильным базисом

$$\tilde{\Gamma}(\tilde{x}) =< \gamma_1(\tilde{x}), \gamma_2(\tilde{x}), \ldots, \gamma_n(\tilde{x}) > .$$

Позволим себе рассматривать γ_i как новые координаты точки $\tilde{x}$. Тогда базис $\tilde{\Gamma}$ будет задавать отображение M_R на себя. Соединим дугами вершины $\tilde{x}$ с их образами. В полученном графе дуги образуют непересекающиеся траектории, замкнутые в циклы. Вершины, принадлежащие одному общему циклу, образуют класс, являющийся инвариантом преобразования $\tilde{\Gamma}(\tilde{x})$. Значение булевой функции $\varphi(\tilde{x})$, характеризующей класс или объединение классов, также будет инвариантом $\tilde{\Gamma}(\tilde{x})$. Из числа таких функций можно выбрать s функций и образовать базис

$$\tilde{L}(\tilde{x}) =< \varphi_1(\tilde{x}), \varphi_2(\tilde{x}), \ldots, \varphi_s(\tilde{x}) >$$

так, чтобы любой наименьший инвариантный класс характеризовался конъюнкцией функций φ_l и их отрицаний.

Базис $\tilde{L}(\tilde{x})$, сопряженный с $\tilde{\Gamma}(\tilde{x})$, является неполным и строится неоднозначно, с точностью до правильного преобразования. Базис $\tilde{L}(\tilde{x})$ сопряжен с несколькими различными $\tilde{\Gamma}_k(\tilde{x})$ одновременно, например, быть может, с базисом $\tilde{\Gamma}_2(\tilde{x}), \tilde{\Gamma}_3 k(\tilde{x}), \ldots$.

Любая булева функция $\psi(\tilde{x})$, выражаемая через базис $\tilde{L}$, удовлетворяет условиям инвариантности

$$\psi(\tilde{\Gamma}(\tilde{x})) = \psi(\tilde{x}),$$

откуда

$$\psi(\tilde{\Gamma}^k(\tilde{x})) = \psi(\tilde{x}),$$

где $\tilde{\Gamma}^k$ означает преобразование $\tilde{\Gamma}$, выполненное последовательно k раз.

Неполный базис $\tilde{L}$, сопряженный с базисом преобразования $\tilde{\Gamma}$, как бы «отделяет» информацию о преобразованиях $\tilde{\Gamma}$ и исключает ее из рассмотрения, оставляя лишь информацию об инвариантах.

Базис $\tilde{L}$, сопряженный с базисом $\tilde{\Gamma}$, неполон. Можно дополнить его, приписав функции $\tilde{\Phi} =< \varphi_{s+1}(\tilde{x}), \ldots, \varphi_p(\tilde{x}) >$, которые можно выбрать, например, так чтобы перечисление вершин в порядке их естественной нумерации в $\tilde{\Phi}$ соответствовало бы перечислению вершин $\tilde{x}$ в M_R внутри каждого инвариантного класса в порядке повторного применения $\tilde{\Gamma}$ по траектории цикла. Для этого внутри каждого инвариантного класса в M_R нужно зафиксировать одну из вершин в качестве начала отсчета. Дополненный базис $\tilde{\mathfrak{L}}^* =< \tilde{L}, \tilde{\Phi} >$ может оказаться избыточным. В нем содержится вся информация об R, но в разделенном относительно $\tilde{\Gamma}$ виде. Переменные $\tilde{L}$ суть инварианты относительно $\tilde{\Gamma}$; переменные $\tilde{\Phi}$ указывают число k примененных преобразований $\tilde{\Gamma}$ относительно начала отсчета по всем траекториям.

12. Пусть на кубе R задано N преобразований координат посредством правильных базисов $\tilde{\Gamma}_1, \tilde{\Gamma}_2, \dots \tilde{\Gamma}_N$,. Последовательное их применение представляет циклическую группу с N образующими. Для каждого базиса $\tilde{\Gamma}_k$ существуют сопряженные базисы $\tilde{L}_k$. Для пары (тройки, ...) базисов $(\tilde{\Gamma}_k, \tilde{\Gamma}_l)$ могут быть построены сопряженные базисы $\tilde{L}_{kl}$, выделяющие инвариантные классы вершин при групповом преобразовании. Размерность s_{kl} базиса $\tilde{L}_{kl}$ меньше размерностей s_k и s_l базисов $\tilde{L}_k$ и $\tilde{L}_l$, сопряженных с $\tilde{\Gamma}_k$ и $\tilde{\Gamma}_l$ соответственно, ибо преобразование $\tilde{\Gamma}_l$ лишь объединяет, а не разделяет инвариантные классы $\tilde{\Gamma}_k$.

Если $\tilde{\Gamma}_1, \tilde{\Gamma}_2, \dots \tilde{\Gamma}_N$ заданы явно, возможно построить сопряженные базисы $\tilde{L}_{k,l,r}$. Распознавание образов в смысле "классификации с 'точностью до преобразования $\{\tilde{\Gamma}_k\}$"достижимо при этом сразу, без обучения. В этом смысле процесс обучения сводится, по-видимому, к построению базиса $\tilde{L}$ (тезауруса) или приближения к нему. Поскольку $\tilde{\Gamma}_k(x)$ может быть *любым* отображением M_R на себя, построение $\tilde{L}_k$ без знания $\tilde{\Gamma}_k(\tilde{x})$ лишь по "обучению на образцах" в общем случае требует исчерпывающего перебора.

В примитивных случаях о структуре $\tilde{\Gamma}_k(x)$, если она достаточно проста, можно «догадаться» по нескольким предъявлениям образцов. Однако такого рода легкий успех может быть достигнут лишь в небольшом числе специально подобранных случаев.

13. В качестве естественно-научной иллюстрации изложенного выше приведем несколько примеров. Первый касается различия в типах восприятия у естественных информационных систем — животных.

Как известно, пчелы по возвращении из полета обычно не находят летка́, если улей в их отсутствие сдвинут на несколько метров, но безошибочно находят место, где улей стоял ранее. Млекопитающие в подобной ситуации легче обнаруживают знакомый предмет, чем его бывшее положение.

Нижеследующие примеры касаются классов задач на распознавание образа с известными (или частично известными) преобразованиями $\tilde{\Gamma}_k$, инварианты которых служат основанием для классификации.

Музыкальная транспозиция является примером, в котором имеется единственное преобразование $\tilde{\Gamma}_k$ — повышение или понижение всех звуков на полутон. Мажор или минор являются примерами инвариантных классов; дополнительный базис $\tilde{\Phi}$ перечисляет 12 значений доминанты.

Смещение, поворот, растяжение рисунка на экране дает совокупность преобразований, сохраняющих в качестве инвариантов образы прямой, треугольника и т. п.

Для восприятия животных характерно исключение преобразований во времени (идентификация предмета или лица независимо от возраста).

14. Приведенные выше соображения применительно к модели $(R \to I)$ восприятия, по нашему мнению, достаточно иллюстрируют, на естественно-научном уровне, специфику понятия «информация по содержанию» как отображения конечного алфавита в другой конечный алфавит, позволяют провести некоторую классификацию типов «информации по содержанию» (или восприятий) и четко отличить это понятие от скалярной меры «количества информации» (пригодной для любого восприятия).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Shannon C. E., Weaver W.* A Mathematical Theory of Communication. The Univ. of Illinois Press, 1949.

2. *Shannon C. E.* A Mathematical Theory of Communication. Bell Syst. Techn. Journ., v. 27, 1948, № 3, p. 373–423, № 4, p. 623–656.

3. *Shannon C. E.* Bandwagon. Trans. IRE, 1956, IT–2, № l, p.3. [2 и 3] см. в русском переводе К. Шеннон. Работы по теории информации и кибернетике. Изд-во иностранной литературы, 1963.

И. А. Полетаев

К определению понятия «информация». II. Прагматический аспект. О ценности информации

Обсуждается различие физической и информационной энтропии и негэнтропии и их связь в процессе функционирования управляющей системы. Сделана попытка построить обобщенную оценку информации для некоторого класса функционирующих систем.

1. Прагматический аспект понятия информации [1] относится к числу мало обсуждаемых проблем. (Этой теме посвящена, например, работа [2]). Обычно к оценке *ценности* информации подходят, исходя из ситуации конфликта (антагонистической игры) или принятия решения и сопоставляют с количеством информации значения критерия качества, достижимые при отсутствии и при наличии информации. Ценность информации выражается при этом через повышение значения критерия качества. Такой подход вполне закономерен и может дать полезные оценки. Однако он страдает тем недостатком, что для каждой задачи оказывается необходимым пользоваться отдельным критерием, и, таким образом, оценки могут оказаться несравнимыми. Представляется желательным обсудить более общий и единый подход к построению подобного рода оценок. Возможность к этому открывается тем обстоятельством, что, как известно из практики исследования операций, функционирование любой системы (технического автомата, узла или управляемого коллектива людей, использующих оборудование), имеющей цель, всегда подчинено (в смысле цели) более широкой системе; функционирование же последней, в свою очередь, не имеет самостоятельной цели, но подчинено еще более широкой системе и т. д. Цепь эта, однако, не бесконечна, и представляется возможным, пользуясь упрощенной моделью, рассмотреть некоторую общую ситуацию относительно системы, которую мы будем называть условно автономной и которая, не будучи сама целеустремленной или подчиненной в смысле цели более широкой системе, тем не менее рождает целеустремленность и критерии качества работы своих частей.

Для того чтобы подойти к оценке ценности информации в автономных системах, нам придется определить понятие *автономной системы* и, кроме того, сделать несколько замечаний по поводу различия физической (или «энергетической») и информационной (или «кибернетической») энтропии, $H_{\text{Э}}$ и $H_{\text{К}}$ и соответственно негэнтропии, N и I.

2. Начнем с того, что природа величин $H_{\text{Э}}$ как функции состояния замкнутой равновесной термодинамической системы и $H_{\text{К}}$ как меры количества информации, выдаваемой источником, совершенно различна. Формальное совпадение вида зависимости этих величин от значений вероятности дает основание для использования общего названия, но отнюдь не для их отождествления как физических величин. То же самое относится соответственно к физической негэнтропии N и количеству информации I (не путать с «информацией», о которой шла речь в ч. I). О разнице между $H_{\text{Э}}$ и $H_{\text{К}}$ свидетельствует, в частности, то, что имеет физическую размерность (эрг $\times$ градус$^{-1}$ $\times$ моль$^{-1}$), а $H_{\text{К}}$ — величина безразмерная. Сравнивать эти величины можно лишь с помощью размерного коэффициента пропорциональности (постоянной Больцмана).

Энергетическая энтропия $H_{\text{Э}}$ определена только для равновесного состояния замкнутой термодинамической системы. Распространение этого понятия на неравновесные, открытые системы требует особых модельных построений (наложения дополнительных полей сил и т. п.), подобно тому, как это делается для использования в тех же случаях понятия температуры.

Кибернетическая энтропия $H_{\text{К}}$ определена для стационарного случайного процесса выдачи сообщений источником информации. Распространение этого понятия на другие ситуации нестационарного типа также требует специальных построений во избежание неудач.

Энергетическая энтропия $H_{\text{Э}}$ для любой физической системы имеет конечное значение согласно теореме Нернста [3]. Из этого факта непосредственно вытекает дискретный, квантовый характер строения вещества и энергии [4].

Кибернетическая энтропия $H_{\text{К}}$ может быть отнесена к любому алфавиту, в том числе и к математической идеализации (модели)—континууму или непрерывной переменной. В последнем случае $H_{\text{К}}$ оказывается бесконечной, что приводит к известным теоретическим трудностям [5].

Все сказанное в равной мере относится и к абсолютным значениям негэнтропии. Заметим, что чаще всего расчеты ведутся не с абсолютной величиной энтропии, а с разностями ее значений для различных состояний системы.

На основании сказанного о различии энергетической и кибернетической энтропии ясно, что утверждение о «поглощении информации живым существом в процессе метаболизма» является либо художественным иносказанием, либо досадной оговоркой, не имеющей прямого смысла.

3. Количество информации I и негэнтропия N (а равно H_{K} и $H_{\mathrm{Э}}$) оказываются сопоставимыми и тесно связанными в процессах управления. Эта взаимосвязь двусторонняя. С одной стороны, получение, передача, обработка информации, переносимой сигналами — физическими реальными процессами, связаны с расходом, деградацией свободной энергии и, следовательно, с ростом энтропии $H_{\mathrm{Э}}$. С другой стороны, управление может (но отнюдь не обязательно должно) быть организовано таким образом, чтобы компенсировать за счет потока свободной энергии извне потери в системе и, в частности, деградацию структуры системы, неизбежную в силу второго закона термодинамики. В последнем случае речь идет вовсе не о «самопроизвольном понижении энтропии» системы, а всего лишь о *перераспределении* негэнтропии N, поступающей в систему извне и о ее временном запасании в системе.

Оценки величины возрастания энтропии при получении информации посредством измерений обсуждались Бриллюэном [6].

Если в процессе управления используется информация, то получать оценки запасаемой в системе негэнтропии, по-видимому, несколько сложнее. Вряд ли это вообще возможно сделать сразу для всех возможных систем. Здесь мы можем обсудить лишь некоторые вопросы, связанные с этой оценкой.

4. Представим себе модель функционирующей открытой системы общего вида. Внутри системы, а также между системой и средой, перемещаются потоки вещества и энергии разных видов, которые мы будем называть текущими компонентами и различать их индексами i; $i \in \tilde{I} = \{1, 2, \ldots, I\}$. Структура системы построена из элементов и узлов, называемых фондами и обозначенных индексами j; $j \in \tilde{J} = \{1, 2, \ldots, J\}$.

Построим модель так, чтобы в каждом узле протекал только один процесс. Процессом мы называем преобразование некоторого набора текущих компонент, заданных их количествами $\tilde{X}_j =< x_{1j}, \ldots, x_{kj} >$ (где x_{kj} — положительное число, результат измерения количества компоненты i в заданной системе единиц), в другой набор $\tilde{Y}_j =< y_{1j}, \ldots,$ $y_{kj} >$. При этом набор $\tilde{X}_j$ полностью расходуется и исчезает, а набор $\tilde{Y}_j$ появляется. Каждый узел занимает объем и имеет координаты;

процесс протекает во времени. Необходимым условием протекания процесса j является наличие *фондовых* компонент в наборе, задаваемом $\tilde{Z}_j =< z_{1j}, \ldots, z_{mj} >$.

Заметим, что многочисленные прообразы нашей модели можно найти среди естественных и искусственных систем самой различной природы:

— системы химических (в том числе, биохимических) реакций,

— органеллы живых клеток и клетки в целом, орган в организме и сам организм,

— популяция в пределах биоценоза и сам биоценоз, биосфера,

— производственное предприятие, отрасль промышленности, система производства в целом,

— система обслуживания населения (транспорт, связь, торговля),

— система обработки информации и т. д.

Чаще всего процессы в узлах системы носят жестко регламентированный характер, при котором входные, выходные и фондовые компоненты присутствуют в строго заданных пропорциях. Если поток входных компонент или фондов отклоняется от заданных пропорций, то имеет место ограничение интенсивности процесса по закону «лимитирующих факторов», или «узких мест». При появлении узкого места по одной из компонент остальные компоненты оказываются в избытке и потребляются или участвуют в ходе процесса неполностью. Избыток при этом может либо удаляться, либо накапливаться в запас (см. [8]).

Могут иметь место несколько параллельных процессов, производящих одни и те же выходные компоненты (хотя, может быть, и не все), но из различных входных и по различным «технологиям». Совокупность таких процессов можно рассматривать как один процесс с нежестко закрепленной технологией.

Поскольку мы различаем состояния процессов во времени и рассматриваем положение узлов в пространстве, существенными оказываются также процессы транспортировки компонент и их хранения. Эти процессы не меняют состава транспортируемых и хранимых компонент (хотя, быть может, и расходуют некоторые компоненты), но лишь меняют их координаты во времени и пространстве. Все процессы описываются как реальные, необратимые, расходующие свободную энергию.

Описанная система допускает управление. Управляющие воздействия на узлы системы, т. е. сигналы, команды регулирования, включаются в списки виртуальных «узких мест» и наряду с дефицитами фондов или входных компонент могут рассматриваться как потенциальный лимитирующий фактор любого процесса. Система управления может быть выделена и рассматриваться независимо от основной части системы.

Общая структура взаимосвязи процессов, потоков компонент и управляющих сигналов может быть задана одной или несколькими схемами с описанием характеристик функционирования узлов.

Описанную модель будем называть моделью функционирующей системы или моделью Ф-системы.

Интересной особенностью Ф-систем является ярко выраженная зависимость характера функционирования от совокупности внешних и внутренних лимитирующих факторов.

5. Допустим в модели Ф-системы изнашивание фондов в процессе их функционирования в соответствии со вторым законом термодинамики. Изнашивание означает монотонное убывание величин z_{ij} в зависимости от времени функционирования или просто от времени или же от интеграла интенсивности процесса по времени и т. д. Процесс изнашивания может быть как стохастическим, так и детерминированным.

Процесс изнашивания фондов приводит к появлению «узких мест» по фондам, а затем к поломкам — нарушению функционирования системы в целом. На этом фоне возникает обширная проблематика надежности, поисков неисправности или тестов и организации ремонта и профилактики оборудования. Без восстановления фондов Ф-система (модель) обречена лишь на кратковременное существование — в течение «технического срока службы».

Теперь усложним нашу модель еще раз и предположим, что ремонт и профилактика фондов производятся силами самой системы при соответствующих затратах компонент на эти процессы. Точнее, внутри системы имеется некоторое множество процессов $\tilde{J}_1 \subset \tilde{J}$, выходными компонентами которых являются фонды той же самой системы. Более того, в результате протекания совокупности $\tilde{J}_1$ этих процессов производства, хранения и транспорта оказывается, что изношенные фонды или некоторые из них заменены на новые. Наличие процессов $\tilde{J}_1$ может привести к удлинению срока службы — времени безаварийного функционирования системы. Если производительность процессов $\tilde{J}_1$, оцененная по минимуму, достаточно высока, то срок службы может вырасти как угодно высоко. Более того, системна не только получит возможность существовать произвольно долго, но и увеличивать объем своих фондов. Иначе говоря, система получает возможность роста, либо увеличиваясь в размерах, либо производя себе подобные системы, либо, наконец, выдавая вовне некоторые из своих продуктов. Если среда не лимитирует рост системы, то рост может происходить экспоненциально; при этом фонды оказываются внутренним лимитирующим фактором. Однако рост фондов системы может отклоняться от экспоненты вниз за счет внутренних причин, например, за счет относительного увеличения расходов энергии и вещества на транспорт, при увеличении размеров системы [6].

Назовем Ф-систему, самостоятельно заменяющую свои фонды (полностью или частично) автономной системой или А-системой. Модель А-системы напоминает систему обмена веществ в живом организме.

Было бы заманчиво ожидать, что совокупность закономерностей, известных в физике, химии и кибернетике, достаточна для построения полной теории жизненных процессов. Сегодня ничто нам не препятствует принять такое предположение в качестве рабочей гипотезы. Однако от строгого ее доказательства мы, по-видимому, еще достаточно далеки.

Существование А-систем, способных к самостоятельному росту, влечет за собой усиление не только сигнала или потока энергии (см. ч. I), но и потока экземпляров А-систем [7]. Внесение «затравки» в подходящую среду в виде популяции А-систем малого поголовья, вызовет лавинное нарастание процесса размножения до достижения предела, налагаемого средой либо внутренними факторами.

6. Если обеспечено постоянство благоприятной среды, А-система может функционировать произвольно долго. Это свойство не присуще, разумеется, всем без исключения А-системам, ибо оно должно быть обеспечено выполнением ряда требований к совокупности процессов системы и, в частности, к процессам управления. Если требования к совокупности управляемых процессов сводятся к их экономности и высокой производительности, то требования к системе управления относятся к «хорошей» организации взаимодействия всех управляемых процессов. Отсутствие, задержка или недостаточность возобновления фондов хотя бы в одном звене ведет к «старению» и «смерти» системы.

Управление А-системой состоит в получении системой управления информации из внешней среды и от узлов самой А-системы, ее обработки и выдачи команд на регулирование процессов. Получаемая информация соответствует некоторому восприятию (в смысле ч. I), ее обработка для получения исполнительных команд — построению внутреннего восприятия, быть может, более высокой степени абстракции. Не всякое мыслимое восприятие обеспечит достаточно длительное существование А-системы. Нетрудно построить пример управления, быстро разрушающего структуру А-системы и приводящего ее к «преждевременной смерти». Наугад выбранное восприятие может оказаться автодеструктивным или недостаточно эффективным в поддержании существования А-системы. Очевидным образом ставится вопрос о сопоставлении свойств А-системы и оценки качества восприятия или «ценности информации», воплощаемой ею.

Рассмотрим один из способов построения подобной оценки.

7. В нашей модели мы отделили узлы управления от основной системы. Тем самым мы обеспечили возможность рассматривать одну и ту же систему при различных способах управления ею.

Все процессы в А-системе протекают с расходованием физической негэнтропии (т. е. с повышением энтропии), в том числе и процессы управления. Однако некоторые выходные компоненты процессов (например, возобновляемые фонды) обладают структурой и, следовательно, несут в себе запас негэнтропии в метастабильном состоянии. Сами фонды также имеют запас негэнтропии. Запасы негэнтропии внутри системы образуются за счет потребляемой системой свободной энергии извне, причем в запас уходит лишь часть потребляемой энергии (часто очень незначительная), а другая часть деградирует в ходе процесов, продуцирующих энтропию.

Будем рассматривать величину накоплений в А-системе негэнтропии и скорость ее накопления как критерий качества информации, используемой для управления системой. В том случае, когда речь идет только об одной определенной А-системе, для которой депо негэнтропии остается неизменным, можно для простоты вместо запаса негэнтропии с равным успехом использовать просто размеры фондов, продукцию, биомассу, поголовье и т. д.

Допустим, что данная А-система находится в определенной среде. Пусть в среде произошло некоторое событие, на которое А-система может реагировать. Рассмотрим две возможности:

а) А-система получила сообщение и совершила реакцию $P_{\text{с}}$, продиктованную ее управлением;

б) А-система не получила того же сообщения, в результате чего совершила некоторое другое действие (быть может никакого), $P_{\text{н}}$. Действия $P_{\text{с}}$ и $P_{\text{н}}$ А-системы ведут к различным последствиям, в частности в отношении накопления негэнтропии. Пусть порции запасенной негэнтропии равны соответственно $E_{\text{с}}$ и $E_{\text{н}}$. Их разность может служить мерой ценности *сообщения*.

Если сообщения рассмотренного типа образуют стационарный поток, можно вводить средние оценки (негэнтропия N на бит I) относительно *количества* информации, а не ее *содержания* [но при заданном восприятии $\tilde{y}(\tilde{x})$ (см. ч. I)].

Пусть в данной среде некоторая А-система существует либо с восприятием $\tilde{y}_1$, либо $\tilde{y}_2$. Разность скоростей накопления негэнтропии будет мерой относительного качества для двух восприятий. Усложняя восприятие некоторым рациональным образом, мы можем добиться повышения эффективности А-системы в запасании негэнтропии (росте, продуктивности и т. д.). Однако слишком сложное восприятие будет требовать слишком много негэнтропии для обеспечения своего функционирования. Плата за информацию по ее негэнтропийной стоимости будет превышать ценность информации (потребительную стоимость) в тех же единицах. Дальнейшее усложнение восприятия будет приносить лишь «убыток».

Любое изменение управления А-системой или изменение ее структуры, приводящее к увеличению накопления негзнтропии $H_{\text{Э}}$, назовем «*адаптивным*».

Очевидно, что ценность сообщения, к которому система некомпетентна, равна нулю.

Получение сообщений о состоянии среды и использование их для выработки адекватной реакции И. П. Павлов называл «непрерывным уравновешиванием со средой». Выражение это не совсем удачно, ибо дело идет не о равновесии в собственном смысле, а о поддержании на постоянном уровне скорости протекания процесса накопления негэнтропии.

8. При определении стоимости и ценности информации естественно ставить вопрос о ее рентабельности. Для длительно существующих А-систем доход от информации всегда превышает расход на ее получение и обработку. Однако попытки сформулировать закон типа законов сохранения при этом не удаются.

Постановка вопроса о рентабельности информации позволила, как известно [6], решить парадокс о демоне Максвелла.

Для работы демона необходима информация о положениях и скоростях молекул относительно заслонки. Оказывается, что верхние оценки увеличения негэнтропии газа за счет деятельности демона не превышают нижних оценок расхода негэнтропии на получение информации. Кибернетический демон не в состоянии нарушить второй закон термодинамики.

Не нарушают этого закона и живые существа, вопреки многочисленным ошибочным утверждениям противоположного характера. Живые существа лишь отводят в запас, в метастабильное состояние, малую часть негэнтропии, падающей на Землю с потоком излучения Солнца.

9. В процессе функционирования A-системы ее рост может задерживаться не только дефицитом свободной энергии, но и любым другим лимитирующим фактором как внешнего, так и внутреннего характера. Если наличие лимитирующего фактора будет отмечено в системе управления и сам фактор ею идентифицирован, то в результате в пределах восприятия системы может возникнуть образ цели, в смысле адаптивной реакции и как образ класса изменений или действий или финальных ситуаций, адаптивных по данному узкому месту. Поведение системы становится телеологическим, целеустремленным в направлении частной задачи. Детали решения этой задачи могут, в свою очередь, породить задачи более дробные, причем адаптивный характер частных целей будет вытекать из критериев более широкой задачи. Возникает иерархия критериев, высшим в которой окажется запасание негэнтропии или рост, размножение, выживание, «процветание», долголетие и т. д. Телеология, или целеустремленность, появляется, таким образом, лишь на этапе «представления о цели» или «образа цели» в восприятии A-системы, которая сама по себе не подчинена никакой цели. Объективно A-системы обладают лишь большей или меньшей устойчивостью или адаптивностью. Устойчивость A-системы и длительность ее существования проверяют правильность или адаптивность всей цепи управления, в том числе и образов цели. В этом смысле «практика — критерий истины». Кратковременно могут существовать и системы, обладающие неадаптивными и даже деструктивными реакциями.

10. Для неадаптивных и автодеструктивных систем данное выше описание ценности информации и цели, очевидно, не имеет смысла. В этом нет ничего удивительного, ибо сам факт наличия смысла как-то связан, по-видимому, с существованием A-систем. Нас этот факт не слишком огорчает, ибо неадаптивные системы, если они и появляются тем или иным способом, то существуют лишь короткое время, по сравнению со временем существования адаптивных систем. По этой причине в природе они редко присутствуют и потому не играют большой роли.

Однако нельзя целиком сбрасывать со счёта неадаптивные или деструктивные системы из соображений прагматических. Такое обширное и важное поле применений кибернетики, как военное дело, особенно богато примерами деструктивных систем.

К счастью (если только можно употреблять это выражение в связи с военным делом), военные задачи в большинстве случаев являются частными задачами, смысл и критерии качества которых вытекают из более общих задач обеспечения благополучия в политико–экономическом аспекте страны и государства в ситуации военного конфликта. Поэтому в принципе критерии ценности информации для деструктивных систем военного применения могут быть выведены из более общих критериев устойчивой, адаптивной А-системы, частью которой они являются.

В ситуации, которая описывается методами теории игр и допускает решение, т. е. определение оптимальных стратегий и цены игры, ценность информации может быть определена как разность цен двух аналогичных игр (при одинаковой функции платы), в первой из которых используется информация, а во второй — нет. Таким же путем — построением игры с расширенным множеством стратегий — может быть решен вопрос о ценности мероприятий по скрытию информации (маскировке), дезинформации и т. д.

Если одним из участников игры является природа, и, следовательно, имеет место ситуация выбора оптимального решения по заданному критерию, мерой ценности информации снова может явиться разность значений критериальной функции (в частности, вероятность достижения цели [2]) при использовании и без использования информации.

Почти необозримое множество конкретных и отвлеченных проблем в этой области еще ждет своего решения.

11. Адекватные реакции А-системы и адаптивные изменения ее структуры далеко не всегда достигают крайней степени, оптимума, достижимого максимума скорости запасания негэнтропии. В природе (а нередко и в деятельности человека) характерным является скорее случай стационарного существования с нулевым ростом, весьма далекий от оптимума. Щедрость природы позволяет А-системе существовать с несовершенной структурой и далеким от оптимальности управлением, лишь бы они обеспечивали в среднем своевременную замену изношенных фондов. В частности, в системе управления в ряде случаев оказываются допустимыми ошибки, сбои и отказы, избыточность информации, пустые (фантастические) образы, ложные представления, ошибочные идеи (в том числе и научные). Следуя иллюзорным представлениям, порождаемым неоптимальной системой управления, А-система реагирует частично наугад. Если при этом выигрыш при случайных удачах не меньше проигрыша при случайных неудачах, реакции оказываются (слабо) адаптивными. А-система продолжает благополучно существовать, даже расти.

Широко распространенное, в особенности среди биологов, глубокое убеждение в том, что будто бы «в природе все оптимально» (адаптивно), является скорее иллюзией, чем обоснованным утверждением.

Именно поэтому нам представляется неудачным определение кибернетики как «науки об оптимальном управлении». Оптимизация управления является лишь ветвью приложений кибернетики, быть может, одной из важнейших, но не исчерпывает содержания этой науки.

Развитие науки, расширение человеческих знаний являются адаптивным расширением компетенции человека к информации о среде обитания человечества в целом как А-системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Shannon C. E., Weaver W.* A Mathematical Theory of Communication. The Univ. of Illinois Press, 1949.

2. *Харкевич А. А.* О ценности информации. «Проблемы кибернетики», вып. 4, 1960, стр. 53.

3. *Планк М.* Термодинамика. Л., 1925.

4. *Планк М.* Новейшие теории в термодинамике. Доклад Герм, хим. об. 1911, Петр. 1920.

5. *Колмогоров А. Н.* Теория передачи информации в сб. «Сессия АН СССР по научным проблемам автоматизации производства», 15-20 окт. 1956 г., АН СССР, 1957, стр. 63. 6. *Бриллюэн Л.* Наука и теория информации. М., 1960.

7. *Тимофеев-Ресовский Н. В., Ромпе Р. Р.* О статистичности и принципе усилителя в биологии. «Проблемы кибернетики», вып. 2, 1959, стр. 212.

8. *Гильдерман Ю. И., Кудрина К. Н., Полетаев И. А.* Модели Л-систем (системы с лимитирующими факторами). в сб. «Исследования по кибернетике». Москва 1970.

И. А. Полетаев, А. А. Титлянова

О «теории» явления жизни

L. b. s!

1. Жизнь есть процесс, а не состояние.

Это определение поворачивает проблему — что есть жизнь — под несколько непривычным углом, ибо при определении жизни либо перечисляются свойства живого, либо даётся философское определение, что жизнь — это есть высшая, по сравнению с физической и химической, форма существования материи, либо, к примеру, живое определяется как одно из состояний вещества, и живыми называются тела, обладающие способностью отвечать сохраняющими реакциями на внешние воздействия и имеющие управляющие системы (определение А.А. Ляпунова).

Определение Полетаева нацеливает внимание на постоянное изменение параметров живого. И это несколько декларативное утверждение получает бóльшую определенность в другом пункте, где жизнью Игорь Андреевич называет процесс организации потока энергии на структурах.

2. Живое существо — организм — непрерывно поглощает и «деградирует» (частично выделяет) значительный (больший, чем повседневные неживые процессы) поток свободной энергии.

В качестве иллюстрации приведем несколько примеров. Если оценить всю падающую на поверхность нашей области солнечную энергию и грубо считать, что она вся взаимодействует с метровым слоем почвы — нагревание, испарение воды, отражение и т. д. — то 1 г почвы всеми этими путями рассеивает 0,002 ккал/сутки. Находящееся в этой же области живое вещество определённой экосистемы в среднем поглощает, а затем деградирует 0,04 ккал/г сухого вещества; растения в фазу максимального развития могут потреблять до 6 и рассеивать до 3 ккал в сутки. Культура бактерий только для поддержания своего существования потребляет и деградирует до 8 ккал на 1 г в сутки. Таким образом, действительно живые организмы поглощают и деградируют значительный поток свободной энергии.

3. Энергетические процессы в живом существе (сопровождаются ...) представляют собой преобразование веществ (анаболизм — катаболизм), сиречь химические реакции (ХР).

4. Почти все БХР ферментативны, ферменты вырабатываются внутри живых существ.

5. Если предположить, что синтез каждого фермента Φ_0 **требует тоже своего специфического фермента** $\mathbf{\Phi_1}$ $(\mathbf{\Phi_0}, \mathbf{\Phi_1}, \mathbf{\Phi_2} \ldots$ **ad int), то совокупный процесс не финитен и не реализуем. Значит, создание ферментов (и может быть других веществ — белков) универсален по технологии и меняет технологию (и продукт) по управлению с помощью информации (РНК, ДНК)**.

6. Процесс жизни производителен по веществу, иначе: в единицу времени он создает больше, чем расходует. [Что-то не так!] Так, но до поры до времени.

7. В силу ферментативности и сцепленности жизненные процессы протекают на структурной базе — биомассе — на специфических тканях, органеллах.

ФАР поглощается пигментами хлорофилла. Превращение CO_2 в углеводы происходит в строме хлоропласта, гликолиз — в цитоплазме, реакции, сопряжённые с дыханием, в митохондриях и т. д.

Структурная база отмирает, возобновляется (с избытком, в комфорте), растёт.

7а. При этом фондовое структурное вещество (биомасса — живая ткань) участвует в метаболизме не только как база — скелет для крепления молекул субстрата и фермента, но и сама участвует в реакции. Так некоторые молекулы базы уходят в продукт реакции и заменяются в ходе реакции такими же молекулами из анаболита. Это происходит (в силу 2-го закона термодинамики) с деградацией (и запасанием) свободной энергии. (Анаболит метастабилен и отдает свободную энергию ткани). Тому могут быть многочисленные варианты.

8. Основой жизненных процессов (и их основным отличием от процессов неживой природы) является энергетическая метастабильность — долговременное запасание свободной энергии в молекулах и освобождение ее лишь в ключевых ситуациях — (по сигналу или при структурном сопряжении).

Таким структурным сопряжением является расщепление дыхательного субстрата — глюкозы, которое состоит из ряда последовательных этапов и обеспечивает энергией разнообразные процессы клеточного метаболизма.

Сигнальным действием в растении обладают фитогормоны, которые активируют процессы органогенеза и роста, а, следовательно, расход энергии.

9. Структурное и функциональное сопряжение химических реакций позволяет (за счет разрядки свободной энергии метастабилей) происходить эндоэнергетическим реакциям (реакции — потребителю в сопряжении) и т. о. будто бы преодолевать второй ЗТД (отсюда масса заблуждений). Т. о. образуются вещества с высоким энергетическим потенциалом.

Жиры, белки, полисахариды, из которых строятся ткани, сохраняющие этот энергетический потенциал при своем отмирании (дрова, уголь, нефть ...).

10. Тут мы переходим к пункту, которому Игорь Андреевич придавал решающее значение.

Постоянное наличие метастабильных состояний вещества, живых тканей порождает «раздражимость» — специфические и/или генерализованные реакции тканей на «раздражение», т. е. электрические, химические, механические воздействия на ткань или её участок (м. б. неспецифические).

Способность к раздражимости является основой возможности выбора и целенаправленного действия. Элемент выбора поведения присутствует на очень низких уровнях развития. Таксис, при котором, например, парамеция избегает неблагоприятной для неё химической среды и перемещается в направлении благоприятной, уже содержит элемент выбора. Таковы также тропизмы у растений, в результате которых зелёные части поворачиваются к свету, а корни растут в направлении силы тяжести (геотропизм). Не важно, что эти движения бессознательны — это выбор. Способность же к выбору: «хорошо — плохо», «добро — зло» Игорь Андреевич считал гранью между живым и неживым.

11. Наличие метастабилей допускает управление (в смысле Винера) со всеми вытекающими из этого последствиями, т. е. с возможностью существования любого автомата с вычислимым поведением.

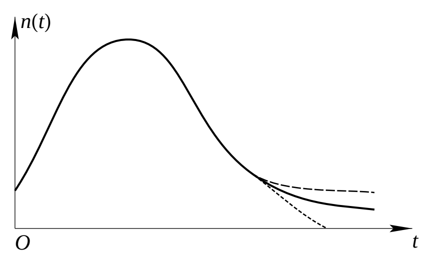
Разнообразие реакций и их приуроченность к определённым сигналам определяются структурой автомата, которая может быть лабильной.

Живые системы, которые снабжаются энергией извне, обладающие метастабильностью и разнообразием реакций, демонстрируют уже такие возможности как: усиление сигнала, преобразование физической природы сигнала — сигнал на выходе перестает быть самоочевидным физическим следствием сигнала на входе, передачу, запоминание и считывание сигнала из памяти, комбинирование совокупностей сигналов и появление в результате новых сигналов, являющихся функциями исходных, и, наконец, исполнение сигнала, т. е. преобразование его в достаточно мощную реакцию, направленную на внешнюю среду.

Т. о. наличие матастабилей, дающих возможность выбора и управления, является базой для генезиса автомата поведения.

12. Генезис автомата поведения в процессе эволюции протекает не только по Дарвину, т. е. методом проб и ошибок. Фундаментальная, дополнительная (к Дарвину) гипотеза: генетически детерминированная структура обладает широким спектром возможных функций (возможностей действия); в процессе онтогенеза (индивидуального развития) спектр сужается за счёт отбрасывания неадекватных реакций, поведение сужается до «рационального».

13. Врождённые адекватные реакции (новорождённый олень бегает, вылупившийся из яйца цыпленок клюёт) формируются либо отбором по Дарвину (что маловероятно), либо имеет место наследование приобретённых признаков по Ламарку неизвестным доселе механизмом (возможно через управление функционированием генов; сие требует обдумывания и серьёзнейшего при том).



14. Жизнь индивидуума конечна во времени, она оканчивается либо для живого организма в целом, либо для его части (ползучие растения, партикулирующие, отмирающие в центре

и расползающиеся). До гибели организм дуплицируется. Иногда дупликация (митоз, деление клетки) соответствует (заменяет) индивидуальную гибель (1$\rightarrow$ 2).

Заметим, что все жизнеспособные системы (популяция, ценозы, экономика, нация) развиваются по сходным типам кривых $n(t)$ (n — параметр благополучия, t — время). Видимые причины различны в каждом случае. Общий (не сформулированный) закон развития, несомненно, общий. Каков он?

P.S. Текст не закончен. Вряд ли я решилась бы привлечь к нему внимание, если бы почти случайно не прочла статьи про автопоэз Матураны. Что-то мне в этом автопоэзе показалось знакомым.

«Любой продукт функционирования компонентов живой системы питает ту самую организацию, которая производит эти функциональные компоненты».

«Живые системы — это познающие системы. Жизнь в качестве процесса — это процесс познания» [Maturana H., Varela F., 1980]

Я не сразу поняла, почему эти положения для меня не новы, а потом вспомнила «почему» и вытащила из архива текст, теперь предлагаемый вашему вниманию. См. пункты 7а и 10–11. Они перекликаются с положениями Матураны, но кажутся мне более четкими, менее «лингвистическими». Увиденная мной связь концепций и послужила поводом для включения статьи «О «теории» явления жизни» в книгу «Игорь Андреевич Полетаев».

P. P. S. L. b. s! — Lectori benevolo salutem! (лат.) Привет благосклонноиу читателю

Коллектив авторов под общей редакцией д.ф.н., проф. А.Б. Иванушко-Простачук

Очерк мориалогии. Опыт введения в науку

Рига, Ереван, Магадан, Тюмень, Зеленоград, 1974 г.

Серия: «Апокрифы отечественной мысли»

Всё разумное — действительно, всё действительное — разумно
Георг Вильгельм Фридрих Гегель

Так вот это — неверно!
Авторы

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВВЕДЕНИЮ

Мориалогия (по-русски - дураковедение, от греческого $\mu o \rho \iota \alpha$ — мориа — глупость и $\lambda o \gamma o \sigma$ — логос — разум, наука) — наука сравнительно молодая и не вполне сложившаяся. Недоразвитие её определяется не столько отсутствием наличия возможностей её развития в наше время, в нашем месте и даже не наличием отсутствия потребностей в её методах и результатах, но лишь одним единственным обстоятельством: абсолютным мажорированием объекта изучения над субъектом. Последнее обстоятельство проявляется многогранно и изобильно, как внутри, так и снаружи, как количественно, так и качественно. Прежде всего, очевидно, довлеет прямое численное превосходство объекта над субъектом. Однако, это явление, пожалуй, не является единственно определяющим. Более существенным оказывается проникновение объекта изучения в субъект изнутри и, так сказать, качественное влияние, проистекающее из этого обстоятельства. Происходит специфическое для данной науки проникновение предмета в метод со всеми вытекающими отсюда импликациями проблематики самоприменимости, разрешимости теории, что не может не уводить исследователя, если он серьезно относится к своей сверхзадаче, в малоисследованные дебри семантики, математики, и, главным образом, их практических приложений, где, сознаемся честно, ещё и конь не валялся.

Тем не менее, потребности в развитии этой безусловно полезной отрасли знаний поистине грандиозны и этим объясняются (почти тщетные) усилия, прилагаемые многочисленными партизанами науки, к постановке и решению бесчисленных теоретических и прикладных проблем этой науки.

Настоящая монография вкратце подытоживает те скудные (не станем спорить об этом) результаты, которые имеются на сей день и одновременно намечает новые пути, и смело ставит ещё недостаточно обсуждённые проблемы, освещая тем самым, как мы надеемся, перспективы развития, и вселяя уверенность в неотвратимость неизбежного. Во всяком случае, усилия коллектива авторов не пропадут даром даже если отдельные положения, высказанные ниже, и не получат экспериментальной верификации или же в результате подобной верификации будут отвергнуты наукой и даже, наконец, не понравятся начальству. Даже в подобных прискорбных случаях материалы настоящей монографии послужат отправным пунктом дальнейших обсуждений и, таким образом, унавозив своими трупами будущий урожай, конструктивно лягут в основу грядущих научных достижений.

Мы позволим себе опустить исторический обзор развития мориалогии, отсылая читателя к многочисленным, ещё не написанным трудам по этому вопросу. Упомянем только наиболее ярких основоположников, или лучше сказать, — провозвестников мориалогии: Великого Эрасма, попавшего, к слову сказать, в эту историю не вполне преднамеренно (как, впрочем, случалось и с другими основателями), Себастиана Бранта, Илью Сельвинского и некоторых других, имена коих нам неизвестны.

Гл. 0. ВВЕДЕНИЕ

0.1. (О науке вообще). Приступая к изложению основ науки, следует задуматься о том, что представляет из себя наука вообще и каковы её цели. По этому вопросу не было и не будет полного единодушия; однако, честный автор должен предупредить читателя — какой из точек зрения будет придерживаться он сам на протяжении данной книги.

Мы представляем себе дело так, что науки бывают разные и для каждой из них цели и методы представляются различными. Более того, в пределах одной науки различные лица, объявляющие себя (или объявляемые) учеными данной специальности, понимают сей предмет не только по-разному, но, частенько, — прямо противоположным образом.

Не пытаясь вдаваться в тонкости науковедения и классификации наук, скажем только, что нам самим для дальнейшего изложения удобно будет придерживаться упрощённой, но чёткой классификации всех наук, разбивая их на два класса, которые мы условно, не претендуя на глубокую осмысленность нашей терминологии, будем называть соответственно — «правильными» и «неправильными». Пояснение этим терминам мы дадим ниже, впрочем, не настаивая на нем. Можно было бы, например, пользоваться другой дихотомией — точные и неточные, естественные и неестественные и т. п. В дальнейшем мы будем заниматься только «правильными» науками, оставляя прочие их горькой судьбе.

Ради провизорного пояснения термина приведем лишь примеры наук из соответствующих классов; к правильным мы относим: физику, химию (и иже с ними), математику с логикой (математической) — это науки хотя и не естественные, но правильные) — все науки о мертвой и живой природе, гео-, био-, физио- и прочие логии (хотя и неточные, но естественные). В то же время все науки о человеке (чохом), кроме разве что анатомии, медицинской патофизиологии, мы будем считать неправильными, не вдаваясь в пустое обсуждение этого факта.

Наука правильная начинается с заинтересованного и непредвзятого наблюдения фактов и явлений, их регистрации и описания, продолжаясь сбором коллекций, классификацией, сопровождающимися вызреванием вопроса: «А как же всё это происходит?» Далее, если науке повезет, начинает создаваться теория. Этот факт многозначительный, и на него стоит обратить внимание особо.

Настоящая полноценная теория — вещь безмерно ценная. «Нет ничего практичней хорошей теории», — сказал Людвиг Больтцман незадолго до того, как повеситься, и был прав. Полноценная теория позволяет по ограниченному множеству хорошо подобранных экспериментов путем хитро-разумной обработки их результатов правильно ответить на вопрос, каковы будут исходы любых других экспериментов. Если же науке, напротив, не повезёт, то ее теория останется на уровне «учения», где любой псевдо-мудрец может изречь любую псевдомудрость и все будут равномерно счастливы.

У правильной науки всегда бывает «правильная» теория. Иначе говоря, эту теорию можно в любой момент с любой строгостью проверить, и проверка покажет правильность теории и, значит, науки в целом. Кроме того, правильная наука всегда знает, что она знает и чего она не знает и, вдобавок, умеет отличать осмысленные вопросы от бессмысленных.

В науке неправильной всё обстоит примерно наоборот и, пожалуй, этим всё и сказано. Главной задачей науки неправильной является, чаще всего, стремление показать, что Я прав, а Он, напротив, не только ошибается, но и вообще человек плохой и нестоящий.

В неправильной науке автор, обуреваемый страстишками, заранее нацеливается на своего коллегу (ближнего, или, реже, дальнего), хитро выискивает, к чему бы придраться, где подковырнуть и как просочиться, а затем громко, искусственным басом провозглашает подборку цитат из источников, которые сегодня не принято опровергать (а то — по морде!). Собственный текст при этом является лишь кратчайшим путем от цитаты к цитате, и состоит по большей части, из выражений вроде: «...давно опровергнуто всем ходом развития», «облыжно извращая», «ибо, в писании сказано, — ...» и т. п.

Если неправильная наука примыкает к естествознанию, где по традиции вынь да положь эксперимент, данные экспериментов тщательно подбираются, просеиваются, разрозняются и трактуются, в наиболее тяжких случаях — фальсифицируются, например, используется неправильно применённая статистика, — одно из сильнейших средств обмана, и — дело сделано.

Если «не прошло», — неправильная наука течет далее по пути извещения «кого следует» о качествах оппонента, хождения по коридорам с коврами, звонков по телефону друзьям и друзьям друзей, включения жён, тещ и кого только не... Наука требует жертв, если она — неправильная.

Неправильная наука бессмысленных высказываний от осмысленных не отличает, охотно их путает и чаще всего подобными различиями не интересуется. Более того — в особо хитрых случаях, не обмолвившись о том и словечком, именно на таких различиях и играет, выдавая бессмысленности за осмысленный текст. Очень удобно!

0.2. (О Мориалогии как науке). Наука мориалогия ещё никакая — ни правильная, ни неправильная. Это потому, что её еще не существует. Ей грозит опасность стать с самого начала неправильной, ибо она призвана улучшать человечнейшего из человеков — дурака. Более того, она рискует оказаться беспредметной псевдонаукой, ибо существование предмета изучения еще предстоит доказать, поскольку его существование бесспорно лишь в сказке, фольклоре, и, увы, в брани.

Однако, несмотря на такие грозные опасности, мы рискуем предложить приступить к заложению основ новой науки и смеем выразить при этом надежду и пожелание, чтобы мориалогия складывалась в дальнейшем по образу наук правильных. Сколь сие трудно — ясно любому непредвзятому наблюдателю и единственное, что мы можем обещать читателю - это возможно чаще обращаться к материалу экспериментальному, собранному либо в результате личных наблюдений, либо просто обращаясь к очевидности.

0.3. (О терминологии). Терминология в науке имеет решающее значение, в некоторых (неправильных) науках — единственно важное. Ученым становится не тот, кто наблюдает новые факты и/или делает из фактов правильные заключения и прогнозы, а тот, кто даёт новые названия. Этот факт сам по себе имеет существенное значение в мориалогии, и к нему мы ещё вернемся впоследствии. Приведем тому единственный, но сильный пример: понятие об условном рефлексе у высших млекопитающих было известно задолго до работ И.П. Павлова (Сеченов, Бехтерев, Ухтомский и др.), однако считается несомненным, что это понятие ввёл в науку именно И. П. Павлов, ибо он придумал ему подходящее название.

Итак, термин в науке предмет чрезвычайно важный и даже опасный. Вся наука вращается вокруг терминов, ибо нет науки вне языка. Если термин определён плохо или вовсе не определён, то в науке можно доказать что угодно, применяя в процессе аргументации или доказательства один и тот же термин то в одном, то в другом (противоположном) смысле.

Как можно термин определить? Определения и объяснения близкородственны. Объяснить — значит понятным способом свести непонятное к понятному. Но что же такое «понятное»?

Об этом надо говорить несколько подробнее и, может быть, это будет ещё более скучно, чем параграф 0.3.

Язык есть сигнификация (обозначение условными знаками) знакомых предметов и их отношений. Язык можно полноправно и полноценно трактовать как формализованную систему. Очень важно, что в основе каждого языка лежат несколько интуитивно очевидных фактов, явлений, объектов. «Право» и «лево», «горячо» и «холодно», «сила» и «слабость» и т. д. Каждое из этих понятий является или оказывается близким к непосредственному телесному ощущению или же умозрению и никогда не вызывает вопросов. Дальнейшее содержание языкового словаря состоит из производных объектов, так или иначе исходящих из основных, то есть из непосредственных данных. Построение смысла таких производных слов в языке и представляет собой «объяснение» термина или его определение. Известно, что механика может быть построена без понятий «силы» и «скорости» (используя вместо них, впрочем, им неэквивалентные понятия «энергии», «импульса», «действия»), что и делается в современной науке. Однако механика началась именно с понятий силы и скорости ввиду интуитивной очевидности, «ощущаемости» этих понятий.

Следует сознаться, авторам неизвестен точный и полный перечень исходных понятий языка, да и вряд ли это вообще-то известно кому бы то ни было. Построить из понятного понятным способом (то есть интуитивно бесспорными операциями) непонятное — значит «объяснить». Впрочем, кто же этого не делал, не считая нас!…

0.4. (О «дураке» как явлении терминологическом). Возможно, что понятие «дурак» или его более мягкие и вежливые варианты («неумный», «недалёкий», «простецкий», «простодушный» и мн. др.) есть необъяснимые первичные термины языка, принимаемые как интуитивно данные. Если так, дефиниции неуместны. Но тогда исчезает, как всегда в подобных случаях, гарантия однозначности или «одинаковости» понимания этого термина разными людьми. Скажем, я ему говорю: «Ты дурак», а он отвечает: «Сам дурак» (а дураки мы оба). Следует поэтому прибегнуть хотя бы к сопоставлению этого термина с другими с тем, чтобы исключить волюнтаризм и произвол толкований, иначе говоря — снова необходима дефиниция.

Итак, дефиниции важны! Но важны не только дефиниции. Мы надеемся, что вдумчивый читатель, будь он дураком, или не будь он дураком, сам без труда обнаружит самое главное, или хотя бы для себя самое главное, и потому нет смысла заранее излагать то, что будет изложено в данном научном труде во всем его объеме.

Вопрос самоприменимости мориалогии (то есть вопрос о том, может ли внести позитивный вклад в мориалогию дурак и может ли дурак вынести позитивные сведения, для себя полезные, из изучения мориалогии?). Ответ на этот вопрос положителен. Да, дурак может внести в мориалогию позитивный вклад (хотя бы в виде собственной глупости) и может извлечь для себя многое полезное (если только он не «глупый дурак» — см. ниже). Читать эту книгу дурак может, это ему вреда не принесет, а может принести даже удовольствие, — считать эту книгу глупой. Чего от души тебе желаем, дорогой читатель!…

Мы делаем это заключение отчасти по собственному опыту, ибо в нашу научную методику изучения объекта гармонически входила интроспекция, чему мы обязаны гармоническими результатами.

Мы намерены вести изложение догматически. Это означает, что первоначально мы высказываем некоторые (почти очевидные, впрочем), утверждения в качестве постулатов, затем будем пытаться выводить из этих догм некоторые следствия, не слишком подробно останавливаясь на доказательствах необходимости и достаточности условий дабы не утомлять читателя излишне, а затем на примерах и на общеизвестных фактах верифицируем результаты, тем самым проверяя истинность постулатов. Подобный метод повсеместно принят ныне в математическом моделировании всевозможных непонятных процессов. Заботу о том, чтобы не спутать импликации с эквиваленциями, мы берём на себя, ибо нам эта разница хорошо известна, как ни странно.

Термин «**ДУРАК**», принятый нами ради общепонятности, в быту применяется (по крайней мере) двояко: 1) как оценка, неодобрение личности или бранное слово. В таком виде и смысле оно нам не понадобится, а если случится, то будет в этом смысле приводиться в кавычках и полностью; 2) как научный термин, обозначающий стихийное явление природы и общества. Во втором значении термин этот, как мы считаем, полностью лишён какого бы то ни было оттенка одиозности и потому не должен оскорблять ничьего слуха. Для того, чтобы читатель не забывал об этом, мы будем всюду научный термин **ДУРАК** заменять прописной буквой **Д**, а падежные окончания приписывать далее через дефис: **Д**-м, **Д**-ку, **Д**-ками и т. д.

0.5. (О существовании **Д**). Прежде чем приступить к нумерации глав и изложению, ответим сразу и прямо на основной вопрос кардинальной важности: *СУЩЕСТВУЕТ ЛИ* **Д**? Не занимаемся ли мы изучением свойств элементов пустого множества?

На прямой вопрос дадим прямой и исчерпывающий ответ: *ДА*, существует, иначе откуда было бы столько глупости? Из этого «нулевого» постулата мы исходим, начиная изложение основ науки. Для его обоснования или доказательства нужно слишком много того, что излагается ниже. Поэтому, следуя догматически-аксиоматическому методу, анонсированному выше, мы оставляем этот постулат лежать в основе наших исследований, и если и вернемся к нему, то лишь в самом конце.

Д существует, **Д** существенен в природе и обществе, **Д** многообразен и градирован, более того — **Д** необходим и достаточен! Мало того, **Д** есть явление планетарное и формообразующее, грозное и вечное, конструктивное и эволюционно обусловленное. **Д** — это очень важно!! Здесь есть над чем задуматься. Более того — задуматься серьёзно, без хихиканья и ужимок, без попыток принизить вместе с предметом и его важность, ибо многие чудеса света сего не могут быть поняты, объяснены и осилены без познания объективных явлений ГЛУПОСТИ и её последствий для рода людского и всей планеты Земля!...

Изучая человека вообще и мориалогию в частности, не следует ни на миг забывать о многообразии явлений, условности квалификации и возможности попасть в путаницу по неосторожности. Мориалогия расположена вплотную близко, часто пересекается, местами совпадает с предметом и методом родственных наук, из которых главными (после мориалогии) нам представляются: ФОРОЛОГИЯ (жуликоведение), и еще наука, для которой мы не знаем греческого корня и потому (ради научности! нельзя же — по-русски) используем первый попавшийся язык, далекий от родного (японский) ТЕКУСЕТИКА или текуселогия (сволочезнание, сволочеведение), или акутодомология.

Обсуждение этих вопросов даже вкратце грозит увести нас в дебри, поэтому для назидания читателя мы хотели, но не успели, поместить в приложении краткий обзор смежных с мориалогией проблем данных наук. Неплохо также вдумчивому читателю быть ориентированным в вопросах амуристики, а также общей, частной и прикладной плутократиологии. Эти вопросы, однако, выходят далеко за пределы...

Однако к делу, дорогой читатель!

Гл. 1. МОРИАСКОПИЯ И МОРИАГРАФИЯ. I
Как **Д** обнаружить и как **Д** описать? Что есть **Д**?

1.1. (Определение первое и основное). **Д** есть человек (любого пола), деятельность которого в некоторой заданной области человеческой активности неэффективна, несмотря на добросовестное приложение усилий с его стороны.

Возникает вопрос, — а что такое «эффективна»? Очень просто — часы ходят, мост не проваливается, в тексте нет опечаток, котлета вкусна и съедобна, больной быстро выздоровел и так далее. Ну, а как быть в тех случаях деятельности, где эффективность не столь очевидна? Как, например, оценить «эффективность» стихотворения, да что там, — лекции по международному положению или научной статьи? Да-с, тут дело хуже! И надо заметить, что вот тут-то и обнаруживаются любимые местечки укрытия, маскировки и безнаказанной активности **Д**.

Что поделаешь, — наука туда еще не просочилась, потерпим. А пока признаем, что опр. 1 работает не всюду, хотя и работает!

Второй вопрос, — если **Д** определён как таковой в «некоторой заданной области», то может ли он быть одновременно и не **Д** в других областях? Да, конечно! Например, очевидным образом, он может быть «не **Д** выпить»! Иначе говоря, из определения вытекает, что понятие **Д** эксплицируется математически не как скаляр, но как вектор в некотором плохо описанном пространстве человеческих возможностей. Впрочем, ГЕНИЙ тоже вектор, ибо он может быть, например, «**Д** выпить». Возникают вопросы о размерности вектора и о мере **Д**. Об этом мы скажем подробнее в главе о мориаметрии (измерении **Д**), а здесь ограничимся замечанием, что существует предельное понятие «КРУГЛОГО **Д**», для которого в определении слово «заданной» нужно заменить на «любой».

1.2. (О том, почему бывает **Д**). Давайте с полной серьезностью и уважением к предмету зададимся вопросом о причинах, порождающих **Д**-ка, выясним этиологию этого явления природы, его причины и условия, его порождающие.

Основным свойством, и, можно сказать, причиной наличия **Д**, очевидно, является глупость. Глупость есть природное и общераспространенное свойство организма (не только человеческого, бывают глупые собаки и другие животные), унаследованное от родителей или дальних предков или благоприобретенное и состоящее в том, что в пределах внимания и памяти не помещается, и потому в нужный момент отсутствует, необходимая для деятельности информация. Для выполнения хоть сколь-нибудь сложной работы необходимо знать и помнить одновременно о многих вещах, свойствах вещей, их возможных желательных или нежелательных взаимодействиях и т. д. Так, держа в руке палку и режа ее ножом, необходимо помнить о том, что нож, соскользнув с палки, может порезать руку, и потому руку надо держать безопасным образом и не резать ножом «на руку». Умному это удаётся, а **Д**-ку — не всегда. Очень важно для явления глупости то обстоятельство, что **Д** не подозревает о необходимости думать сразу о многих вещах, просто не догадывается об этом. Это тоже не содержится в его памяти и зоне внимания. Умный человек способен понимать, и, следовательно, прощать. **Д** — никогда! Отсюда — соседство **Д**-ка со «сволочью» — совершенно иным, хотя и не менее интересным явлением природы, которого мы слегка коснемся в приложении.

По тому, чего именно не помнит **Д** во время работы и бодрствования, можно провести краткую классификацию **Д**-ков.

Основной тип «выпадения внимания», — (назовем это так), составляет, пожалуй, НЕПОЛНОТА ДИЗЪЮНКЦИИ. Работая с предметом или идеей, **Д** не видит всех свойств, признаков, качеств и при том упускает существенные для него же самого. Проявляется это по-разному. Например, оценивая результат своей деятельности, **Д** упускает подчас в своей оценке весьма существенные признаки и часто не отличает успех от неудачи. Неполное перечисление возможных следствий из заданных причин или условий ведет к ошибкам, иногда непоправимым. Недооценка многосторонности и многообразия качеств тех средств, которые **Д** применяет в своей деятельности, ведёт к неожиданным, порой смешным и часто грустным последствиям. Наконец, наиболее распространенное явление, — незнание, невольное игнорирование или забывание ЦЕЛИ деятельности порождает «мартышкин труд», столь характерный для **Д**-ка. Выражаясь жаргоном теории автоматического регулирования, **Д** — узкополосен; он способен пропускать только узкую полосу частот, содержащую лишь часть необходимой для успешной деятельности информации.

Второй, тоже очень важный тип «неполноты внимания», представляет собой забвение в нужный момент правил логического вывода. Эти правила доступны **Д**-ку и часто известны полностью, но в нужный момент они не работают. Отсюда проистекает невладение логическим выводом со всеми вытекающими отсюда последствиями, — ошибками в умозаключениях. Наиболее часто встречающиеся в **Д**-кой практике ошибки в рассуждениях суть:

1) Неумение правильно пользоваться отрицанием кванторов. Пример (цитируется по А. А. Ляпунову в дискуссии с И. Г. Эренбургом «о физиках и лириках»; 1959 год, Клуб им. Войтовича в Москве): утверждение — «искусство нужно всем»; дурацкое (распространенное) толкование отрицания: «искусство не нужно никому»; правильное отрицание, — «искусство нужно не всем».

2) Импликация принимается за эквиваленцию. Пример — импликация: «если нечто умно, то оно сложно и простому человеку непонятно» (не станем спорить с этим по существу, хоть и можно, это всего лишь пример), обратная импликация не утверждается, но если спутать импликацию с эквиваленцией, то из сказанного будто бы следует, что: «если нечто сложно и непонятно простому человеку, то оно — умно». Последнее (ложное) утверждение не раз служило оправданием демон-

страции идиотических живописных композиций, где без толку нагорожены были, как в Сибири говорят, — «чо попало»! Отсутствие или дефекты логики **Д**, когда его уличают, как правило называет «диалектикой» и на неё ссылается.

1.3. (О примерах). Предыдущий параграф был тяжеловат и скучноват, прости, читатель! Самое время немного развлечься примерами.

«**Д** на проходе».
Двери любого общественного помещения всегда бывают узким местом. Вода, вытекающая из сосуда через узкое горло, течёт быстрее всего в самом узком месте. То же, казалось бы, должно было происходить и с потоком людей, выходящих из помещения. Ан, не тут-то было! Обязательно затешется один-два **Д**-ка, которые, выйдя из двери на простор, обязательно задумаются, — куда им идти дальше? Хорошо еще, если не начнут при этом в носу ковырять. В присутствии таких всегда в дверях затор. **Д** не умеет (хочет, может) сообразить, что идти надо быстро, а мог бы, не трудно это! В этой ситуации **Д** не следует путать с ХАМОМ, делающим то же самое, но нарочно, со знанием того, что он делает.

Трое из коллектива авторов настоящего труда недавно посетили один из институтов Академии Наук и были поражены обилием стоявших в коридоре сотрудников одного из наиболее серьезных отделов института, которые вели себя классическим для **Д** образом, игнорируя проходящих и присутствующих и мешая им самым вопиющим образом. Ученые!

Еще пример: «**Д** и подносы».
В столовой самообслуживания в один прекрасный день стало не хватать подносов, и за ними образовалась очередь. Очередь нам дело привычное и существует общее и твердое (пред)убеждение, что бороться с этим бесполезно и потому — не следует (кстати, это — неверно!). Очередь стояла и росла, а на раздаче и в кассе непривычно пусто и просторно. Нашелся тип, который пошел к (новой, как оказалось) заведующей столовой выяснить — куда делись подносы. Заведующая любезно разъяснила, что она сама убрала «лишние» подносы, ибо «их так много, что не успевают помыть». После краткого и спокойного разговора, состоявшего из вопросов посетителя и ответов (правильных!) заведующей столовой, подносы были возвращены в оборот. Заведующую спросили: «Сколько подносов использует один посетитель?», «если в столовой один поднос, то сколько раз нужно его вымыть при наличии ста посетителей в день?», «а если подноса два?», «три? и т. д. ... ?»,

«видите, какая стоит очередь и как она недовольна Вами?»

Заведующая не была **Д**-й высокой степени **Д**-посвящения и могла понимать простые посылки, однако связать их в цельное рассуждение, тем более такое рассуждение построить самостоятельно она была не в состоянии. Если где-нибудь стоит очередь, будьте уверены, среди администрации имеется **Д**, а может быть, — не один. Может быть, **Д** и **С** или **В** одновременно (см. приложение). Умный и честный администратор никогда не допустит такого сраму, чтобы в его учреждении стояла бы очередь, тем более, что не допустить её — дело нехитрое.

«Старушка в автобусе и курица у забора».
В практике научного исследования поведения животных («этологии») существует такой эксперимент для проверки способностей животного решать ситуационные задачи: животное и кормушку с привлекательным кормом разделяет частокол, позволяющий видеть кормушку, но не позволяющий к ней подойти по кратчайшему пути. «Правильным решением» для сообразительного животного является обход препятствия-частокола справа или слева и достижение кормушки. Животные «глупые» (мы уже упоминали выше, что и животные бывают глупыми, например, курица), вместо того, чтобы обойти препятствие, просовывает голову в промежуток между кольями частокола и тянется к кормушке, несмотря на явную непригодность такого способа поведения.

Двое из авторов настоящего труда, едучи в автобусе, наблюдали поведение старушки, которой хотелось пройти в переднюю часть автобуса. Путь ей преграждали два рослых нахала, стоявших рядом в проходе и не обращавших внимания на окружающих. Старушка выбрала из всех возможностей «куриную»: она просунула голову между нахалами и долго молча подскакивала и нажимала на нахалов, несмотря на явную непригодность такого способа поведения.

1.4. (Думает ли **Д**?) Изложенное выше может вызвать вопрос: а думает ли **Д**? Ответ на этот вопрос так же труден и связан с теми же необходимостями выяснять семантику терминов («думать», «мышление» и т. д.), как и вопрос «может ли думать ЭВМ» (электронновычислительная машина), или «думают ли животные». Мудрый Тьюринг заявил по этому поводу, что для исчерпывающего решения этого вопроса необходимо самому стать ЭВМ (животным, **Д**-м, последнее, однако, не так недоступно, как прочее). Предварительно и провизорно можно предположить, что **Д** если и думает, то не так, как ЭВМ, то есть не быстро, не безошибочно и не по точному алгоритму. Однако, три последних наречия вовсе не претендуют на пригодность для определения «мышления» в бытовом понимании этого малонаучного термина.

Великий изобретатель Томас Алва Эдисон сказал про нас — людей: «Большинство (!) людей готово на величайшие труды ради только того, чтобы избежать необходимости хоть немножко подумать.» Хотя другой, не менее умный и опытный ученый заметил: «It would have saved time and trouble to do some thinking in the first place» (C. Northcote Parkinson. «Parkinson's Law Or the Pursuit of Progress». John Murray. London. P. 31)

1.5. (Об успехе **Д**-ка). **Д** стремится к успехам, которые он понимает как признание оных окружающими независимо от того — «провалился мост» или нет.

Д трудолюбив и энергичен. Он жизнелюбив, эмоционален, общителен, — даже эффузивен, словом — он полноценен как живое существо и даже несколько преувеличенно так.

Впрочем, любой человек, **Д** или не **Д**, любит успех и к нему стремится. Более того, он ищет ту область деятельности, где успех достаётся ему наименьшими усилиями (или — двойственно, где заданные усилия приводят к наибольшему успеху). Именно поэтому музыкально одарённый человек становится музыкантом, человеколюбивый — врачом или монахом (о, как жаль, что часто случается и не так!), сообразительный — теоретиком, умелый — практиком и т. д. Кстати, именно поэтому **Д** чаще всего оказывается грузчиком, сторожем или дворником (обратное неверно!), в иных областях, как он справедливо подозревает, ему успеха не добиться.

1.6. (О том, чего **Д** не знает). **Д** не знает, чего именно он не знает и даже не знает о том, что он чего-то не знает или знает недостаточно. Древний мудрец (Конфуций?) недаром сказал: «**Д**, который знает, что он **Д**, уже не **Д**». Это, впрочем, вовсе не означает, что **Д** не подозревает о собственном отличии от прочих смертных и не беспокоится об этом. Но он именно «подозревает», а не «знает», опасается, но не догадывается, держится осторожно, но не принимает мер крутых и решительных. **Д** способен работать методом проб и ошибок, как бактерия, накапливая опыт (в основном, отрицательный) и быть осторожным в действиях, исходя из прошлых (многочисленных) неудач. **Д** осторожен, в особенности по отношению к собственным решениям; чаще всего, он от таковых старается воздержаться полностью и переложить необходимость принимать решения на кого-нибудь другого (заместителя? жену? начальника?). Внутренняя настороженность по отношению к самому себе и внешняя осторожность приводят **Д**-ка к тому, что он работает, в случае, если уж необходимости принять решение избежать невозможно, чаще всего по подражанию, по прецеденту, по традиции и «по правилам». Последнее — настолько разительно, что существует пословица: «заставь **Д**-ка богу молиться — он себе лоб расшибет», **Д** всегда больше приверженец короля, чем сам король. **Д** не только жизнерадостен и жизнелюбив, но и эгоцентричен. Он не всегда замечает, когда наступает другому на ногу. Уж если ОН утречком поругался с женой (или ОНА - с мужем), то, будьте спокойны, ОН вам улыбаться не будет, даже если (а может, особенно если) ОН работает в системе общественного обслуживания. При этом ОН возводит сие в принцип и требует, чтобы его «понимали», не будучи сам, в силу своей природы, способен ничего понять, тем более чужую точку зрения или чужую нужду в сохранении твердого расположения духа. Если вам грубят на почте или в магазине, знайте — перед вами обиженный **Д**. Пусть остается обиженным, так ему и надо. Ему воздастся заслуженное на следующем **Д**-ке, который будет обслуживать ЕГО.

1.7. (О том, что любит **Д**). Обычному человеку всегда что-нибудь «интересно», он к чему-нибудь всегда искренне привязан душою и притом бескорыстно. Музыкант не только потому музыкант, что он способен к музыке (хотя это — так!), но и потому, что он музыку «любит».

Д ничего не любит, никакая деятельность его не привлекает сама по себе, ему ничто не интересно. Он выбирает занятие себе из престижных соображений или по подражанию, в основном паразитируя при этом на чужой деятельности; он комментатор, биограф, он цитирует и перетолковывает с точки зрения, которая ему не принадлежит, но им усвоена, он собирает личные материалы «великих людей», вынюхивая попутно «клубничку», и даже может всем этим прославиться. Но сам он при всем при этом остается **Д**-ком.

Стигматом **Д**-ка в такого рода деятельности всегда является то, что он ничего не доказывает, ни о чем не размышляет, не рассматривает и не сравнивает альтернативы, а лишь с порога вещает окончательные утверждения, и при том — либо тривиальные, либо чужие и удручающе часто — неверные. **Д** предпочитает «пребывать» в теплой атмосфере видимой и эффектной правоты, пусть бессодержательной и пустой, купаться в луже болотистой ненужности, обозревать, указывать пальцем и «еще раз подчеркивать», но не трудиться над сомнительной смесью руды и пустой породы, где «в грамм добыча, в год труды». Если **Д** сам заявляет, что ОН что-то там «любит», — не верьте! Чаще всего **Д** любит либо «культуру» (не представляя себе, что это такое), либо — природу. В последнем случае ОН либо рыбак, либо охотник, либо турист. В каждом из этих вариантов «любовь» сводится к получению добра на дармовщинку и к истреблению той самой природы, которую ОН любит. Огромный дядя во-от с таким ружьем приносит домой ма-аленьких птичек, чтобы зажарить и сожрать, а их и ощипать-то трудно. Победитель! Или идет на бедную безобидную рыбёху с бомбой. Тоже мне «любовь»! А уж ежели туристу попадется полянка с цветами, можете быть уверены — ОН не уйдет, пока не выщипет все цветочки до последнего, — так ОН их любит. Хорошо еще, что ОН не любит так свою тещу, жену и детей, а то бы и их поджег и выщипал дотла.*

1.8. (О том, что главу 1 пора кончать). Мы указали догматически несколько исходных, основных, как нам кажется, черт **Д**-ка. Остальное может быть из сказанного выведено, что мы и попытаемся сделать в следующих главах. А эта глава затянулась и её пора кончать, ибо многословие — болезнь, и от неё надо лечиться. Только лечиться не у врачей, ибо неумеренное хождение по кабинетам свидетельствует о неумеренной вере в науку, а это последнее свойство — четкий признак **Д**-ка. Не потому ли так переполнены кабинеты врачей...

Мир погружен, оставлен Богом.
Кишат глупцы по всем дорогам.
Жить дураками им не стыдно.
Но узнанными быть обидно.
(Себастиан Брант. «Корабль дураков»)

*Разум не всегда бывает там, где ему положено обязательно быть. Андрей Платонов. «Офицер и крестьянин»

Гл. 2. МОРИАМЕТРИЯ И МОРИАГРАФИЯ. II
Измеримость и размерность **Д**-ка, выводы из посылок гл. 1

2.1 (О дуракубе). Не следует впадать в тяжелую ошибку, полагая, что глупость есть всего только недостаток ума. Глупость сопровождается и порождается этим дефектом, но отнюдь к нему не сводится. Глупость представляет собой самостоятельное явление природы, самозарождающееся, саморазвивающееся, самоподдерживающееся и комплексное. Просто «отсутствие ума», тем более — его недостаток всего лишь, не породили бы таких грандиозных, глобальных, всеохватывающих следствий, к которым ведет глупость. Стало быть, не станем путать **Д**-ка и обыкновенного безумца.

Выше мы уже отмечали, что глупость **Д**-ка не эксплицируется скаляром, а скорее представима вектором. Говоря популярнее, глупость является феноменом, направленным и специализированным во всех своих частных реализациях. Каждый отдельный **Д** не просто **Д**, а **Д** в определенной области или областях. Число тех областей, в которых данный **Д** является **Д**-м, задает то, что в математике принято называть размерностью подпространства, в данном случае — «подпространства глупости» данного **Д**-ка. Перечень тех же областей по их наименованиям задает в некотором смысле «физическую размерность» **Д**-ка. Рассмотрим этот вопрос чуть подробнее. Пусть математики поскучают, а гуманисты почитают.

Представим себе абстрактную пустоту и выберем в ней произвольную абстрактную точку O, проведём из точки O в абстрактном направлении полупрямую, то есть прямую лишь в одну сторону от точки O. Выберем некий масштаб и станем откладывать по этой полупрямой (оси) в этом масштабе степень человеческой глупости в области, например, финансовых дел. Далее, из той же точки проведем вторую (третью, четвертую и т. д.) прямую, причем каждая новая должна быть перпендикулярна ко всем предыдущим. По каждой из них будем откладывать меру глупости (по игре в шахматы, «пониманию» музыки, живописи и т. д.). Мы получили ортогональную систему координат в абстрактном пространстве P, в которой мы можем репрезентировать в виде точки с заданными координатами каждого конкретного **Д**-ка. Теперь выберем на каждой оси точку на расстоянии единица от точки O — от «начала координат» и будем, естественно, пользоваться только отрезками от нуля до единицы. В нуле размещается *НЕ* **Д**, в точке с координатой единица по данной оси располагается полный **Д**.

Осей у нас много и нас это не смущает, ибо исходную пустоту мы вообразили сами. Однако, чтобы держаться за землю, для иллюстрации, представим себе лишь три оси, а пространство (точнее, куб со стороной или ребром, равным единице, — ДУРАКУБ) — в виде комнаты. Один из углов на уровне пола будет «началом», линия пола на север — осью шахматной глупости Хш, линия на восток — музыкальной Хм, а вверх — финансовой, или «деловой» глупости Хд. Остальные оси мы в примере рассматривать не будем. При этом разумеется, $0 \leq$ Хш, Хм, Хд ≤ 1; такой упрощенный, иллюстративный дуракуб изображен на рис. 2.1.

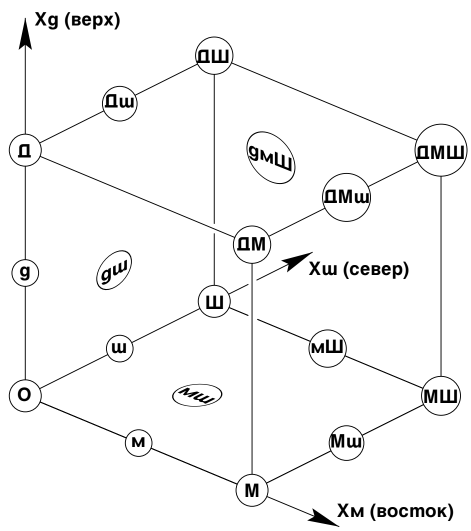


Рис. 2.1. ДУРАКУБ

В нашем дуракубе вполне умный человек будет изображён точкой, расположенной в начале координат (т. е. в нижнем, юго-западном углу комнаты). Деловитый шахматист, не слышащий музыки (все равно, что он сам об этом говорит, важна проверка слуха), разместится в нижнем, юго-восточном углу (точка М на рисунке); деловой человек — успешный бизнесмен, не умеющий играть в шахматы (пробовал — не выходит) и не слышащий музыки - точкой МШ в нижнем, северо-восточном углу; музыкант-шахматист, не умеющий наладить свои финансовые дела и взаимоотношения с людьми - точкой Д в верхнем, юго-западном углу... и так далее (читателю предлагается перебрать все восемь вершин дуракуба, назвав каждую, ради упражнения).

В верхнем, северо-восточном углу будет размещаться точка ДМШ, изображающая «полного или круглого **Д**». Точки мш на «полу» комнаты изображают **Д** шахматно-музыкального (и хорошего бизнесмена притом) различной степени неспособности; на «потолке» — полного **Д** в делах и частичного в музыке и шахматах. Нетрудно, надеемся, сообразить, что математическая размерность точек (Мм), (Шш), (Дд) — единица, точки О — нуль, точек (мш), (Мш), (мШ), (МШ), (ДМ),..., (шд),... — два, точек (дмш),...,(ДМШ) — три (круглый, полный или неполный **Д**). Оставим теперь наш трехмерный пример и вернемся к общему случаю большего — (но конечного, как мы надеемся), числа измерений. В дуракубе общего вида каждый смертный по-прежнему описывается точкой, лежащей либо «на стенке» или в «углу» (некруглый **Д**), либо в объеме (круглый **Д**). Любое множество людей, например, ныне живущих, представится в виде облака точек, распределенных в кубе с некоторой плотностью. Вопрос о плотности распределения точек в дуракубе является серьезной нерешенной проблемой мориаметрии на современном её этапе. Хотелось бы, чтобы точки «человечества» были сосредоточены в начале координат или, хотя бы, — поблизости от начала. К сожалению, по-видимому, это не так!

2.2. (Об IQ (интеллиженс квоциент)). Попытки измерить и оценить глупость не новы; они неоднократно предпринимались и продолжаются доныне, притом — не без некоторого успеха. Дело в том, что это бывает порою горько нужно, и не для какой-нибудь полувоображаемой «науки», а для самых что ни на есть практических приложений. **Д**-ка не всюду можно пускать. В нашу печально-атомную эпоху это обстоятельство вряд ли нужно пояснять подробно. Однако, «на глаз» **Д**-ка далеко не всегда можно легко и безошибочно обнаружить и отличить. Приходится придумывать, худо-плохо, хоть какие-нибудь способы удостовериться наверняка — с кем имеешь дело.

Одним из методов общей мориаскопии (дуракоразличения) и мориаметрии (дуракоизмерения) является так называемый метод определения коэффициента одарённости («интеллиженс квоциент», «IQ» или «KО»). Испытуемому предлагают решить серию постепенно усложняющихся задач-тестов, рассчитанных на сообразительность и не связанных с материалами и методами, изучаемыми в школе. Чем менее одарён человек сообразительностью, тем раньше он «забуксует» — не сумеет дать правильный ответ, и тем меньший «коэффициент одарённости» он получит. Ясно, что «KO» не оценивает специфичность способностей. Кроме того, выяснилось из практики, что многие высокоодарённые (специфично) индивидуумы часто получают обидно низкий «KO». Тем не менее, некоторое представление о человечестве метод KO» несомненно даёт, и потому он интересен.

Попробуем представить себе зависимость числа людей (или доли населения планеты) от величины «коэффициента одарённости» (выраженного числом). Пусть по горизонтальной оси вправо от начала откладывается «KO», а вверх, по оси ординат — доля людей, получивших данное значение «KO». Как вы себе представляете эту кривую, дорогой читатель? Мы бы хотели ее видеть примерно такой, как она изображена на рис. 2.2.1. Где-то посредине, на благопристойном расстоянии от нуля x_0, расположена подавляющая часть людей, а по обе стороны от этой точки кривая быстро спадает до нуля, и притом быстрее влево, чем вправо.

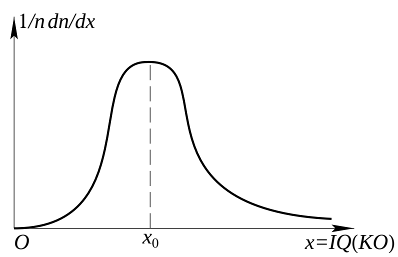


Рис. 2.2.1. Воображаемая или «желательная» зависимость $1/n\,dn/dx$ от $x = IQ$

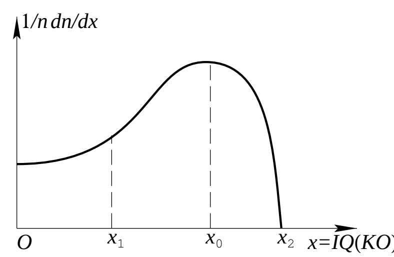


Рис. 2.2.2. Фактическая зависимость $1/n\,dn/dx$ от $x = IQ$

Так вот, ничего подобного! Фактические экспериментальные исследования, проведённые, правда, не со всем человечеством, а лишь с представительной частью оного (репрезентативной выборкой) показывают, что наша кривая имеет вид, изображенный приблизительно на рис. 2.2.2. Увы! Вправо от максимума фактическая кривая спадает катастрофически круто, и гениев с оценкой выше x_2 в природе не встречается (а так хотелось бы, чтобы вправо кривая спадала к нулю асимптотически!). Влево кривая хотя и спадает, но, о ужас, не до нуля! Доля лиц с нулевой или малой оценкой отлична от нуля. Мало этого горя — она велика! Примерно одна четверть человечества имеет оценку ниже «допустимого» x_1 — условной «нормы». Хочется не верить, но что делать?

2.3. (О кретинах, имбецилах и дебилах). Существует врождённое слабоумие, которое в соответствующей науке имеет соответствующее название -«олигофрения» (по-русски приблизительно - «отличнодушие»). Олигофрения имеет несколько степеней, тоже имеющих названия. Самая глубокая степень именуется «кретинизмом» или «идиотией».

Кретин не способен держать ложку или застегнуть пуговицу. Он нуждается в постоянной опеке. Имбецил может себя обслужить в быту, но, если и говорит, то плохо, не умеет считать и не способен учиться в обычной школе. Для имбецилов создают специальные учебные заведения, но не для того, по-видимому, чтобы скомпенсировать их недостатки (это невозможно), а лишь с целью снизить психологическую травму у больного и его родственников и сделать больных похожими на здоровых. (На эту мысль нас навело, в частности, то, что в одной из «спецшкол» в 1968 году мы видели «Доску почёта» в вестибюле с портретами имбецильных ребят и надписью «Ими гордится (У нас есть, чем гордиться!!!) школа №...» Совсем как у всех!).

Третья, — самая лёгкая степень олигофрении — дебильность, влечет за собой лишь неспособность окончить более, чем четыре-пять классов нормальной школы по нормальной программе (по специальной программе дебил может окончить, разумеется, даже аспирантуру: мы в этом не сомневаемся, — сами наблюдали!). Дебилы суть основные поставщики **Д**-ков для общества, но не единственные. **Д**-ка можно сделать из нормального, не отягощённого наследственно ребенка, и даже из взрослого. К соответствующим для того методам мы вернемся ниже. Отсюда вытекает классификация **Д**-в: врождённые и благоприобретённые. Нам представляется, что вторые более интересны как предмет для научного анализа.

2.4. (Ещё о мориаграфии). Более обильных и надёжных сведений по экспериментальной мориалогии мы не имеем в распоряжении и потому вернёмся к качественному описанию объекта нашего изучения, развивая следствия из основных посылок главы 1.

Д не верит себе, ибо знает в результате деятельности методом проб и ошибок, что сие к добру не ведет. Поэтому **Д** верит другим, а не себе и ищет себе предмет надёжной веры. Он следует традициям и потому оные чрезмерно почитает и даже старается их создать. Он верен моде, часто болезненно приверженен к ней, презирает людей «немодных» и «не следящих» за модой. Он тщательно читает прессу, почитает и обожает авторитеты, пока эти авторитеты пользуются всеобщим признанием, но легко переключается на новые, даже не замечая этого порою. **Д** скорее «человекообразен», чем человечен, ибо он тщательно заботится о собственном сходстве с «образцами» человечества.

Человек, оригинально мыслящий, а особенно оригинально поступающий и действующий, в глазах **Д** отклоняется от образца, достойного подражанию, и потому объявляется со стороны **Д**-ка «чудаком», «оригиналом» и даже «придурковатым». Это вполне естественно, ибо вытекает из природы **Д**-ка.

Неумеренно уважая авторитеты, а особенно — собственный авторитет (**Д** нередко им пользуется у себе подобных), **Д** распространяет этот авторитет незакономерно на области, весьма далекие от того предмета, по поводу которого авторитет завоеван. Авторитетный **Д** без колебаний вмешивается во всё на свете и везде считает себя равномерно авторитетным. Чаще всего это ему проходит безнаказанно, хотя не всегда понятно — почему? Быть может, все люди подвержены гипнозу авторитета? Наиболее общественно-тяжким явлением такого рода являются, несомненно, «ценные указания», даваемые «авторитетом» специалистам. Если к авторитету в таких случаях примешивается власть, результаты могут быть более чем плачевными. В легких случаях того же характера можно наблюдать, например, академика естественных наук, публично высказывающего безапелляционные суждения о произведениях живописи или о социальных преобразованиях. Такое случается нередко. И стоит посмотреть и послушать! Известны случаи, когда авторитет в области, например, языкознания распространяется на собственноручное рисование шпилей на проекте здания. И т. п. ...

Однако, однако... . В любом из подобных случаев в запасе всегда имеется готовая ссылка на более высокий авторитет. Если же (бывает и такое) авторитет так велик, что «дальше ехать некуда», то ссылка делается на авторитет, так сказать, теологический: Господь бог тако повелел или же Великая Идея того издавна требовала. Таким способом интуитивная неуверенность в себе успокаивается посредством ухода от ответственности.

2.5. (Об ответственности **Д**-ка). Ответственность — тут, как правило, любой **Д** — не дурак, ибо он её особенно боится ввиду интуитивного чувства неуверенности в себе. Ответственность для рядового примитивного **Д** — что нож козлу!

Д не верит фактам, он верит информации. Опровергать факты цитатами — любимое занятие **Д**-ка, по которому его можно безошибочно опознать и прищучить. Результат деятельности ценится **Д**-м лишь постольку, поскольку он должным образом зарегистрирован, учтён и объявлен. Неучтённая польза и незарегистрированный вред для **Д**-ка не существует, даже если они очевидны и бросаются в глаза. **Д** может ликовать по поводу огромного урожая на поле, не замечая, что до потребления доходит лишь малая его часть из-за потерь по дороге или из-за плохого качества продукции.

Д обожает учёт и контроль, особенно, над самим собою. Если учёт в порядке, то не может быть вопросов по существу дела. **Д** рад истратить рубль ради того, чтобы тщательно учесть копейку, лишь бы легко было отчитаться и не нести ответственности по существу. Примеров тому — куча. Инструкция, и притом мелочная и обильная, — евангелие **Д**-ка. Кроме того, чем больше законов, тем легче их обойти, применяя то один, то другой — почти противоположный.

Информация как таковая — тоже предмет служения и восторга **Д**. То, что «напечатано» и «объявлено» — не подлежит сомнению, обсуждению и служит последней истиной. Сам процесс изготовления и потребления информации становится для **Д**-ка самодовлеющим и главным. **Д** до обожания любит ритуалы, торжества, повторение трюизмов и того, что всем наверняка известно. Счастье **Д** составляет информация о признаниях успехов, о наградах, присвоениях знаний, получении призов (хотя последнее — уже не так пусто, приз надо завоевать, если игра была спортивной). В речи **Д** наслаждается длиннотами, стереотипами и охотно, обильно интонирует речь, особенно в тех местах, которые трудно было бы оправдать или поддержать какими-либо разумными аргументами. Цитаты, приводимые красоты ради и для удлинения речи, весьма помогают вообще не упоминать о фактах и не прибегать к логике.

2.6. (О цели). **Д** не ищет и не пытается осознать цели своей и чужой деятельности, не рассуждает и о критериях эффективности. Ему достаточно веры в то, что всё делается «правильно», т. е. так, как делают все или как делали всегда. **Д**-ку чужды сомнения и ненавистны размышления. **Д** никогда не спрашивает себя или других, — «зачем» это делать. Этот вопрос всегда действительно очень труден для ответа, а иногда действует разрушительно на ситуацию в целом и на постановку вопросов. Сомнение — мать размышления, а вопрос «зачем» есть очевидный плод сомнения. К сему один-единственный, пустяковый с виду пример. Поздней весной горожане частенько выходят на «субботники» с тем часто, чтобы на улице возле дома, где живут или где работают, разбросать по большой площади оставшиеся с зимы сугробы снега. «Чтобы скорее стаяли», — таков видимый резон этой деятельности. Зачем? В самом деле, — снег и сам растает с неизбежностью, а чем дольше он задерживается и чем дольше тает, тем больше влаги задерживается в почве и тем лучше растут трава и деревья. Кроме того, разбрасывают снег чаще всего на тротуары, отчего становится неудобно по ним ходить. Если же ударит мороз (а так почти всегда и бывает), то неудобство сохраняется в течение недель. И тем не менее сугробы ВСЕ и ВСЕГДА разбрасывают, а общественные организации тратят много сил на привлечение граждан к этой полезной деятельности. Никто никогда не задумывался — зачем?

2.7. (О кратком суммарном описании **Д**-ка и других вопросах). **Д** называет все ему непонятное — глупым, все неприятное ему — плохим и считает себя вправе иметь окончательное суждение по любому вопросу. **Д** не видит границ собственной компетенции и самому себе. Он не может себе представить ситуации, когда ему (или вообще кому-нибудь из уважаемых людей) что-либо на свете неизвестно и непонятно.

Д, как правило, не обладает юмором, хотя знает понаслышке о его существовании. **Д**-ку юмор с успехом заменяет радость по поводу беды у соседа. Шутку и оскорбление **Д** не различает и потому обижается на шутки и оскорбляет, думая, что он шутит. **Д** никогда всерьёз не смеётся над самим собой и если это делает, то только по подражанию, потому, что «так надо» или «так принято»; при этом он шутит в шутку.

Д признаёт и фиксирует не успех по существу, а только его регистрацию. Поэтому диплом ценится у него больше, чем знания и умения, а сдав экзамен, он и вовсе не помышляет никогда о том, чтобы сохранить, тем более, расширить знания по «сданному» предмету. Сдал и ничего себе не оставил, кроме отметки в документах.

Для **Д** построить дом (тем более, хорошо его построить) гораздо менее важно, чем подписать протокол о сдаче и окончании строительства.

Д не терпит критики *ад рем* (ad rem), т. е., по существу, ни в свой адрес, ни даже в адрес противника. Существо дела всегда одиозно **Д**-ку. Критику *ад рем* он тут же переводит в критику *ад хоминем* (ad hominem), т. е. в критику личности оппонента. «А сам-то ты кто?» -

любимая реплика в споре. **Д** безмятежно убежден, что «плохой» человек (т. е. человек, к которому приклеена дурная слава по тому или другому поводу) никогда не может сказать ничего хорошего, тем более, правильного, но зато горазд «наклеветать» и «извратить». Поэтому слушать, что говорит человек сомнительной репутации, тем более, обсуждать его высказывания есть нечто, подобное греху, если только не хуже. Просто надо в этом случае заткнуть уши себе и, по возможности, другим — тоже. **Д** если когда-нибудь кого-нибудь и хвалит, то только людей проверенных и, по возможности, уже умерших. Чаще всего **Д** хвалит **Д**-ка, узнавая нужного человека по классовому чутью. И редко ошибается.

2.8. (О **Д**-ке и вещах). **Д** любит иметь и накапливать не идеи, а вещи. Они ему ближе, понятнее, полезнее и приятнее.

На свете существуют люди двух категорий: первая потребляет (попросту — портит) вещи и их потом выбрасывает; вторая тоже потребляет, но, кроме того, умеет и любит вещи чинить и создавать. К первой категории принадлежит небольшое число людей, создающих идеи вещей и идеи идей. Они тоже создают. Если последних и людей второй категории исключить, останутся **Д**-ки. Потребительское отношение к вещам возводится в культ, причем лица-ремонтники негласно объявляются «низшими», «технарями», «нетворческими» работниками. **Д**-ку невдомек, что без них он скоро захлебнулся бы в собственных отходах, ибо некому было бы починить ему, бедняге, засорившийся сортир. Этот факт известен **Д**-ку, но им игнорируется, ибо важнее общепринятое мнение о почётности звания «творческого» работника.

Д обожает уничтожать ненужные ему вещи, а порой и идеи или их носителей (книги, памятники...). При этом могут погибнуть очень ценные реликвии или просто полезные вещи. Что делать! В уничтожении **Д** видит заменителя конструктивной деятельности, на которую **Д** не способен. Свойство это часто бывает врождённым: нам приходилось видеть играющих в песочке детей, некоторые из которых трудолюбиво строили домики, другие же (у них это не получалось) с наслаждением растаптывали созданное не ими. Но разве только дети? У многих из нас **Д**-ки брали игрушку или вещь и уничтожали ее, считая себя вправе это сделать. Такое же отношение у **Д** наблюдается к непонятным (а потому «ненужным») им идеям и представлениям, но это уже другая тема...

Об И. А. Полетаеве — друзья и сотрудники

Рисунок Р. Габриэляна

С. С. Кутателадзе

И. А. Полетаев и кибернетика

К 100-летию со дня его рождения

Середина XX века — эпоха перемен. Человечество стало иным. Закончилась самая варварская война в истории, уничтожившая границы и раскрепостившая мышление. Новый импульс получил универсальный гуманизм. Люди окончательно покончили с рабством колониализма и приняли Всеобщую декларацию прав человека. Родилось новое понимание взаимоотношений личности и коллектива, гражданина и человека, антропоцентризма и космизма, социализма и капитализма. Человек стал ощущать себя не только богоподобным, но и богоравным. Такой крутой поворот в мышлении — сложный и болезненный процесс. Мемы не передаются генетически — гуманизм и космополитизм середины XX века подверглись эрозии в послевоенных поколениях. Игнорируя эти процессы, невозможно понять наших предшественников.

Игорь Андреевич Полетаев был среди тех, в ком жило новое мышление середины XX века. Мы вспоминаем его вместе с первопроходцами научных революций XX века. Полетаев — человек своего времени, который остро ощущал разрывы новой парадигмы романтического гуманизма, раскрепощающего человека, и старого догмата прагматичного консерватизма, утверждающего примат общественного договора над личностью.

Кибернетика — одна из великих несбывшихся надежд XX века, служение которой Полетаев выбрал как форму личного участия в освобождении человечества. Книга «Сигнал» — его незабываемый вклад в кибернетику. Полетаев писал:

Кибернетика есть наука о процессах управления и передачи сигналов в машинах и живых организмах, использующая математические методы.

Этим пониманием кибернетики Полетаев руководствовался и при организации своей лаборатории в Институте математики Сибирского отделения АН СССР. Теперь общеизвестно, что сегодня кибернетика не подпадает под определение Полетаева. На самом деле проблема определения кибернетики — предмет малоосмысленных, на мой взгляд, философских и околонаучных спекуляций. Дело в том, что кибернетика — метатеория управления и регулирования. Равно как математика — метатеория представлений о формах и отношениях, взятых в отвлечении от их содержания. Метатеория связана с эклектикой и субъективизмом — феноменами, науке, в общем, не свойственными. Нельзя не видеть в творческом и жизненном пути Полетаева следы иллюзий, следующих из его понимания кибернетики.

Создание Академгородка возглавили люди из поколения победителей. Они организовали новые институты и лаборатории, воздвигнув форпост мировой науки в Сибири. Победители — филантропы, чуждые любым формам людоедства. Свою цель они видели в улучшении жизни всех и каждого. Коллективизм тёк в жилах тех, кто прошел горнило войны, отдавая физические и нравственные силы для общей победы на фронте или в тылу. Лозунг победителей El pueblo unido jamás serávencido.

Жертвенному коллективизму противостоит крайний индивидуализм. Самая отвратительная форма эгоизма и эгоцентризма – людоедство. Карьеристы – антропофаги эпохи просвещенного эгоизма. Девиз карьериста — Aprés moi le déluge.Характерная черта карьериста — ксенофобия. Ненависть к инородному проявляется и как зависть к чужому таланту, и как банальный национализм, и как неприкрытый шовинизм. Универсальная форма ксенофобии — антисемитизм, ставший безотказным оружием негодяев в СССР после шестидневной арабо-израильской войны 1967 г. Толерантность к антисемитизму 1970-х гг. — индикатор карьериста в СССР.

Победители фашизма, ровестники и соратники Полетаева презирали любые формы ксенофобии. Конфликт победителей и карьеристов был неизбежен. Забвение коллективизма привело к тому, что карьеристы побеждали практически повсеместно даже в академической среде. Победители оставались не у дел. Их вытесняли с руководящих позиций в науке, гробили их направления и ставили палки в колеса их ученикам. Механизмы свободы и благородства заменялись чинодральством, лизоблюдством, подхалимажем и кумовством. Разрушительные процессы не обошли стороной Академгородок, они омрачали жизнь Полетаева и привели к расформированию его лаборатории.

Полетаев был ярким, глубоким, мыслящим и привлекательным человеком, немало сделавшим для становления науки в нашей стране, но страдавшим как от глубины трагических разломов мышления XX века, так и от понимания несбыточности надежд на скорое перерождение человечества.

Таким Игорь Андреевич Полетаев останется в моей памяти до конца.

А. А. Титлянова

Разговоры с Полетаевым

1. О НАУКЕ

1.1. В науке, как в жизни, надо вкалывать.

1.2. Насмешливо, когда возвеличивают науку: «Да, наука умеет много гитик»

1.3. О математическом моделировании. Посылки должны быть адекватными природе явлений, изложения математически аккуратными, а результаты конструктивными.

1.4. Модель есть аккуратно собранная система гипотез, изложенная математически, с целью построения теории объекта.

1.5. Полетаев обожал Николая Олейникова. Он умел цитировать его необычайно к месту. Кто-нибудь задекламирует о служении наук, как Полетаев:

И мне не дороги теперь любовные свиданья,
Меня влекут к себе основы мирозданья,
Я стал задумываться над пшеном,
Зубные порошки меня волнуют.
Я увеличиваю бабочку увеличительным стеклом,
Строенье бабочки меня интересует.

1.6. Ты знаешь, что такое история? Это искусство предсказывать прошлое. Но разве поспоришь с этим парадоксом после переписывания истории России в разных вариантах?

1.7. О цветах и моделях. Полетаев поливает свои всегда отлично растущие цветы. У меня цветы растут плохо, зато я знаю очень много о физиологии растений и всегда восхищаюсь, как почти оптимально работают в растении процессы. Глядя на Полетаева, я ему доверительно сообщаю: «Знаешь, я так люблю растения.»
— Ты любишь не растения, — отвечает он.— ты любишь модель растения.

1.8. Об эволюции. Беседа по поводу моих лекций учителям о загрязнениях биосферы, о прессе на окружающую среду и об опасных последствиях этого пресса для самих людей.
Полетаев: Всё человечество спасаешь? Ты что, против эволюции?
Я: Ну, при чем здесь эволюция?
Полетаев: А если подумать? В эволюции уже были тупики. Тебе не кажется?
Я: Представь себе, не кажется!
Полетаев: Блаженны нищие духом!

2. О НАЧАЛЬСТВЕ

2.1 Всегда выполняй все просьбы директора Института, если это не противоречит твоим внутренним убеждениям.

2.2 Я страшно злюсь на начальство, уже не помню на какое — университетское или институтское.
Полетаев: Ты на дождь сердишься?
Я: Как я могу сердиться на дождь, это же явление природы.
Полетаев: А на кошку ты сердишься?
Я: Чего же я буду сердиться на кошку? Она же — животное.
Полетаев: А чего же ты сердишься на начальство? Это такое же явление природы, как дождь и кошка.

2.3 После какого-то скандала в Институте.
Полетаев: Ты боишься, что тебя уволят? А ты напиши заявление «Прошу уволить меня из Института по собственному желанию в связи с самодурством дирекции».
Я смеюсь и говорю, что если они меня «достанут», то так и напишу. Но случая такого мне так и не представилось.

3. НЕОЖИДАННЫЙ АРГУМЕНТ

Я стала плохо видеть и думала, что — очень плохо. Лишь сейчас я понимаю, что это было лишь началом потери зрения, и я видела тогда еще обоими глазами и не так уж плохо.
Пошла я в больницу к известному в городке офтальмологу Сазонову. Сазонов — единственный мужчина в моей жизни, который напугал меня до слёз. Он сказал, что природа отпустила человеку четверной запас зрения, что я израсходовала почти весь запас, что

конец известен — это слепота. Я постоянно буду к ней катиться по наклонной плоскости и единственное, что могут сделать врачи — это уменьшить угол скольжения. Он сказал, что мне нельзя ездить в экспедицию (тряска в машине приведет к отслоению сетчатки), нельзя работать в наклон, так как это прямой путь к кровоизлиянию в сетчатку, нельзя много читать и писать — может развиться острая дистрофия сетчатки.
—Но, доктор, — сказала я. — Вы мне запрещаете заниматься наукой. А я больше ничего не умею и не люблю.
— Я Вас предупредил, — ответил Сазонов.
Вечером на кухне у Полетаева я изложила ему этот разговор и залилась слезами от жалости к себе. Я рыдала, Полетаев молча ходил по кухне, курил и вдруг неожиданно ворчливо сказал: «Я вообще не понимаю, почему ты ревёшь. Ещё неизвестно, что будет раньше — умрёшь ты или ослепнешь». От такого пассажа я даже реветь перестала. Воспользовавшись короткой паузой, Полетаев спросил: «Ну, чего тебе налить — валерьянки или водки?»
—Водки, — всхлипнула я и получила полстакана отличной водки.

4. ОБ ИСКУССТВЕ

О музыке. Мы слушаем старинную музыку возрождения — такую ясную и прозрачную.
Я спрашиваю: «Что, они так жили?» — Они так думали, — отвечает Полетаев.

На художественных выставках. Мы никогда не смотрели картины вместе: я по левую сторону галереи, он по правую, а потом наоборот. После окончания просмотра Полетаев мне: «Ну, а теперь пройди еще один раз, посмотри внимательно и скажи, какие картины ты хотела бы украсть?»
Прохожу, смотрю, называю — почти всегда мы хотели украсть одни и те же две-три картины, а чаще всего одну.

5. НОРМА ОДИНОЧЕСТВА

У всех людей разная норма одиночества. У Полетаева она была очень высокой. Думаю, что лучше всего ему было одному. Отсюда и шутка. Подходим вечером к его дому. Полетаев смотрит на тёмные окна своей квартиры и с удовольствием говорит: «Как хорошо, что дома никого нет, даже Полетаева».

6. О ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

В прениях по поводу доклада одного из экологов:
«Если Вы рассыпали горох по полу, то и говорите, что это горох, рассыпанный по полу, а не негативно-позитивная комплементация».

7. В НАУЧНОМ СПОРЕ

«Мое мнение перпендикулярно Вашему».

Р. Е. Кричевский

Игорь Андреевич Полетаев (1915–1983)

Игорь Андреевич Полетаев родился в Москве в 1915 году. В 1938 окончил с отличием Московский энергетический институт; в соответствии с выданным ему дипломом он и подписывал многие свои публикации: «инженер Полетаев».

Его первые научные работы посвящены плазме газового разряда. Они выполнены на очень высоком уровне и опубликованы в Докладах и физических журналах Академии наук.

И. А. Полетаев принимал участие в Великой Отечественной войне в должностях командира взвода, командира батареи, инженера дивизии. Был ранен. Награжден орденом Отечественной войны.

Холодная война сменила горячую. Работая в военном НИИ, И. А. Полетаев занимался тем же, что и его американские коллеги: подводил научные итоги прошедшей войны. Анализ опыта этой войны привел Н. Винера к созданию новой науки об управлении — кибернетики. Ко многим идеям этой науки И. А. Полетаев пришёл самостоятельно. Поэтому вполне понятно, что после снятия идеологического проклятия с самого термина он стал энтузиастом и красноречивым пропагандистом кибернетики.

Как русская литература вышла из гоголевской «Шинели», так и советская кибернетика вышла из семинара Алексея Андреевича Ляпунова в МГУ. Во времена хрущевской оттепели там встречались математики, физики, биологи, военные, экономисты. Активными участниками семинара были А. П. Ершов и И. А. Полетаев. Отточенные, блестящие, остроумные выступления И. А. на этом семинаре легли в основу его вышедшей в 1958 году книги «Сигнал». Она сыграла выдающуюся роль в распространении кибернетических идей в СССР и вызвала большой интерес за границей, была переведена на немецкий, чешский, польский, болгарский и японский языки.

С 1961 года И. А. Полетаев работал в Новосибирске. Здесь он заведовал лабораторией. Когда во времена брежневских заморозков эту лабораторию закрыли по идеологическим причинам, его защитил академик А. Д. Александров, взяв в свой отдел. Сам И. А. поддержал очень многих людей.

Талант И. А. ярко проявлялся в его научном творчестве сибирского периода. Он находил важные задачи, связанные с управлением в природе и обществе, и после тщательного, кропотливого изучения давал им исчерпывающее, блестящее, надолго запоминающееся решение. Так, на моделях леонтьевского типа он пришел к выводу, что для победы в вооруженном конфликте необходимо вначале ресурсы вкладывать в воспроизводство. Лишь на заключительной стадии достаточную часть накопленных ресурсов следует отдать на собственно военные цели. Многие работы И. А. посвящены развитию сформулированного им принципа лимитирующих факторов, который он называл принципом Либиха. С помощью этого принципа он дал простые объяснения ряду биологических феноменов, как например, формуле роста Шмальгаузена, некоторым особенностям поведения системы «хищник — жертва», которые не учитывались моделью Вольтерра. Одна из моделей разъясняла, почему деревья не растут до неба.

И. А. умело разоблачал экстрасенсов, передатчиков мыслей на расстояние, создателей чудес. В наше время расцвета магов и исцелителей вакансия такого разоблачителя пустует.

И. А. был эрудитом. Он прекрасно владел тремя основными европейскими языками, читал по-польски и итальянски, сделал большие успехи в изучении японского. Был тонким ценителем литературы, музыки, живописи. Он написал вызвавшую бурную полемику статью, доказывавшую приоритет «физиков» над «лириками». Когда его оппоненты начинали доказывать важность лирики такому её знатоку, как И. А. Полетаев, то они доставляли ему истинную радость, попадаясь в расставленную им ловушку.

Велик вклад И. А. в разработку самой технологии математического моделирования, которой сейчас повсеместно пользуются. Учителями теперешних информатиков, программистов, биологов являются восторженные читатели «Сигнала».

На камне, стоящем на могиле И. А. Полетаева в Академгородке, надпись: «Инженер И. А. Полетаев. 1915–1983».

Текст был написан для публикации в Трудах Второго Сибирского конгресса по прикладной и индустриальной математике, посвящённого памяти А. А. Ляпунова, А. П. Ершова и И. А. Полетаева (Новосибирск, 25–30 июня 1996 г.)

Стихи Юрия Гильдермана

И. А. Полетаеву

Двадцать пять годов назад
Он фашистам дал под зад.
А теперь он знаменит
Как учёный эрудит.
Он философ, инженер,
Кибернетик-пионер.
Он играет на гитаре,
Он поёт, когда в ударе.
Он — гонитель дураков,
Он — любитель хомяков.
И, вообще, он очень мил,
Тот, кто немцев разгромил.

09.05.1970

И. А. Полетаеву

Кто, едва лишь рассветает,
Моделирует, считает,
Книги умные читет,
Лепит, шьёт, изобретает?
Кто с улыбкой наблюдает,
Как коллег шумливых стая
Постепенно подрастает?
Кто им в этом помогает?
Кто с докладом выступает?
Кто в Совете заседает,
Интеллектом там блистая?
Отвечаем: Полетаев!
Слава, слава имениннику!

02.02.1971

И. А. Полетаеву, отбывшему первый 10-летний срок в Сибири

Пролог

Для бесконечности вселенной
Десяток лет — ничтожный срок.
Для нас в календаре настенном
Имеет вес любой листок!

Часть I

Какие перемены в мире!
То тут, то там переворот.
А наш герой прожил в Сибири
Все десять лет за годом год!
А перед тем, как сделать это,
Сказал он моде вопреки,
Что физики нужней поэтов
И что поэты — дураки!
Как зашумели все газеты:
«Мол, не возьмём Вас на Луну!»
Он не обиделся на это.
Он в кассе покупал билеты,
Чтоб поднимать за Обью где-то
Наук сибирских целину.
Ведь от радаров до генетик
Ему знаком любой закон,
А что такое cybernetics,
Быть может, знал лишь только он.

Часть II

В Сибири — жуть! Тайга, медведи ...
За поясами топоры!
Но море нефти, горы меди
Уж заждались своей поры.
Не зная страха и упрека,
День до краёв заполнив свой,
Переселенец издалёка
Ушел в работу с головой.

Часть III

Сибирь разута и раздета
(Ещё не сдан «Универсам»),
Не уезжая в отпуск летом,
Он вяжет свитер, шьёт кисеты,
От стеллажа до табурета
Он всё решает сделать сам.
Он в понедельник на Совете,
Во вторник делает доклад,
В четверг к студентам едет в НЭТИ,
В субботу пишет реферат.
Звонок тревожный из столицы:
«Когда пришлёте нам статьи?»
А тут ответственные лица:
«Мы ждём Вас ровно без пяти!»
Там семинар, здесь рецензенты,
Все хором что-то говорят,
Вопрос — ответ — апплодисменты ...
И так все десять лет подряд.

Эпилог

Промчались годы лучшей пробы,
Но помыслам открыта даль.
Сегодня в этот день особый
Вручить позвольте Вам медаль.

1971

Надпись на шести чайных блюдцах, подаренных И. А. Полетаеву

Под звуки джаза или пенья.
И в будний день, и в день рожденья.
В ночную пору, пору бденья.
Неважно, есть иль нет варенья.
В часы забав и вдохновенья.
Вам чай доставит наслажденье.
Читатель! Переставив строчки
и не добавив даже точки,

Прочтёшь, быть может, с удивленьем
Ещё одно стихотворенье.
И в будний день, и в день рожденья.
Неважно, есть иль нет варенья.
В часы забав и вдохновенья.
Под звуки джаза или пенья.
Вам чай доставит наслажденье.
В ночную пору, пору бденья.
И снова, переставив строчки
В другом порядке, на листочке
Прочтёшь — теперь уж с нетерпеньем —
Ещё одно стихотворенье.
В ночную пору, пору бденья.
Под звуки джаза или пенья.
Неважно, есть иль нет варенья.
Вам чай доставит наслажденье.
И в будний день, и в день рожденья.
В часы забав и вдохновенья.
Во власть отдавшись алгоритма,
Не изменив ни рифм, ни ритма,
Стихов на тот же материал
Получишь 6!

02.02.1973

P. S. 6! (*мат.*) — число, равное 720. Читается «шесть факториал».

«Авроры» грозные раскаты
Для нас открыли новый век,
И Полетаев на «накаты»
Зовёт семнадцать человек.

1973

Tempus and Homo
Время и человек
Поэма с прологом и эпилогом

На 60-летие И.А.Полетаева

Пролог

Время... Математик в уравненьи
Буквой t его обозначает.
Каждый квант его — волшебное мгновенье —
Дарит радость или огорчает.
Времени мерцающий момент —
Наш универсальный аргумент.
Бег секунд по кругу неустанный
Преподносит каждому в свой срок:
Общежитие или квартиру с ванной,
Панегирик или некролог,
Звание, суму или тюрьму,
Свадеб и разводов кутерьму,
Премию, приказ, командировку,
В гости из провинции золовку,
Грипп гонконгский, атеросклероз,
Бабье лето, оттепель, мороз,
Для поездки заграничной визу,
У соседей слева телевизор,
Хорошо прожаренный филей
Или, как сегодня, *ЮБИЛЕЙ*.

* * *

Канун великого момента —
Февраль пятнадцатого года.
В семье студента-диссидента
Родился продолжатель рода.
Не в мантию из горностаев
Одет был Игорь Полетаев.
Под грохот пулемётной трели
Ему штанишки мама шила,
Ему тачанка колыбелью
В гражданскую войну служила.

Двадцатые лихие годы …
Ещё не все дымят заводы,
В стране силён ещё разор.
И вот, чтобы помочь Отчизне,
Наш юбиляр на старте жизни
Идёт учиться в ФЗО.
С передовым рабочим классом
Срастаясь всем своим нутром,
Он среди тех, кто строит трассы
Великолепного метро.
Ровесник, тихо подрастая,
Жуирует, не дуя в ус.
Но не таков наш Полетаев —
Он, книги умные читая,
Дорогу выбирает в ВУЗ.
Не упускает он момента
Войти в среду интеллигентов.
Учиться плохо — неприлично
Для человека с головой,
МЭИ окончив на «отлично»,
В аспирантуре наш герой.
Он весь в науке каждым нервом,
Но враг грозит его стране.
На фронт ушёл он в сорок первом,
А на войне, как на войне.
И вот уж Гитлер впал в истерику,
Нам нужен миг, чтоб победить,
А наш герой плывёт в Америку,
Чтоб кое-что там закупить.
И молодого офицерика
Не привела в испуг Америка.
Уже тогда капитализму
Сумел он ловко вставить клизму.
Приходит и войне конец.
В науке снова молодец.
Не догоняя, обогнал
Америку, издав «Сигнал».
Живёт духовной жизнью бурно,
Вступает в диспут с Эренбургом.

(Подробно о моменте этом
Тогда писали все газеты.)
Чего-то пишет, вычисляет,
Генштаб собою заменяет,
По вечерам стреляет в тире,
Ещё момент и. . . он в Сибири.
Он там, куда идут немногие,
Где горше хлеб, темнее мрак.
За кибернетикой — матбиология,
За экономикой — физиология,
Фразеология, мориалогия,
Et cetera, et cetera.
Что больше у него? Что меньше?
Успехи в творчестве? Успех у женщин?
Ему давно доступны стали
Секреты выработки стали
И тайны злаковых полей,
И вот сегодня — *ЮБИЛЕЙ*.
Эпилог
Что пожелать нам юбиляру?
Не растеряв и дальше жару,
От юбилея к юбилею,
Не спотыкаясь, не болея,
Шагать, душою не старея.

02.02.1975

И. А. Полетаеву

Приятно, как водилось встарь,
Устроившись в уютном кресле,
Толковый полистать словарь.
Особенно приятно, если
Словарь как дружбы верный плод
Преподнесён под Новый год.

30.12.1975

В день рождения И. А. Полетаева

Что подарить нам эрудиту?
Пластинку, где поёт Эдита?
«Какая, — спросит он сердито, —
Здесь надрывается Эдита?
Пиаф? Ах, нет, Эдита Пьеха!
Ох, мой живот болит от смеха ...»
  Что подарить нам меломану?
  Орган? Он нам не по карману.
  Рояль, быть может? Но рояли
  Давно в продаже не бывали.
Что подарить интеллигенту?
Беседу умную с Аргентой?
Но и без нас ежемоментно
Аргента у интеллигента.
  Но мы уважим полиглота,
  Условности презрев и моды,
  Собраньем сочинений Гёте,
  Неискажённых переводом.

02.02.1976

На 65-летие И. А. Полетаева

Как много могут опыт и культура!
Каких высот достиг интеллигент!
И кисть, и молот, и клавиатура —
Ему доступен всякий инструмент!

Он, словно шейх арабский, ценит кофе.
Цветы и книги — вот его уют.
И для него подобно катастрофе,
Когда при нём в стаканы водку льют.

И в самом деле, только недоумок
Использует стаканы вместо рюмок.

Иные вылезут из грязи в князи,
Не зная, где фураж, а где фужер.
А у него буквально в каждой фразе
Ума и воспитания пример.

Весь городок судачит втихомолку:
«Ах, как изящно поджигал он ёлку!»

Расписан день, как полосы в тетрадке:
Когда идти на выставку в музей,
Когда в обком писать про беспорядки,
Когда встречать на празднике друзей.

Не просто угодить его манерам,
Здесь нужен небольшой универсам:
Кофейник, рюмки, дюжина фужеров,
Будильник, чтоб вставал он по часам —
Всё ерунда! Но нет сокровищ мира,
Чтоб подошли ему для сувенира.

02.02.1980

К столетию И. А. Полетаева

Прошло сто лет тяжёлых, бурных,
Век поражений и побед.
Сто лет боёв литературных
И нелитературных бед.
Сто лет теорий завиральных,
Сто лет открытий гениальных,
Сто лет тиранов маниакальных,
Где должен был молчать поэт.
Где непохожих травят свистом,
Где орды пламенных статистов
Дают бесплодия обет.
Непросто в этой жизни пёстрой
Найти тебе присущий путь.
Порой по краю бритвы острой
Приходится искать, в чём суть.

Есть биография, есть личность.
Всех добродетелей не счесть.
Неординарность, нетипичность,
Во всём достоинство и честь.
Источник всевозможных знаний,
Учёный – энциклопедист,
Идеями полны карманы,
Упрямый перфектционист.
Увидев важность новой темы,
Он мог прослыть еретиком.
Но не было такой проблемы,
Где он бы ни был знатоком.

Его любимое творение —
Лаборатория моделей.
Там ищут способы сравнения
Явлений разных и изделий.
Там подвергают обсуждению
Любой предмет, любое мнение.
Что лучше – март или апрель.
Вредна ли детям карамель.
Или полезней вермишель.
Что хуже – айсберг или мель.
Кто Гоголю пошил шинель,
И чем закусывать шанель.
И кто полезней - тот, кто «в теле»,
Или кому все надоели.

А все друзья лаборатории,
Кто заходил на файф-о-клок,
Естественно вошли в историю,
Минуя временной порог.

09.12.2014

О. З. Каганова

Памяти И. А.Полетаева, тридцать лет спустя

Считаю нужным сказать несколько слов о том замечательном уроке, который наше научное поколение получило от Игоря Андреевича и ценность которого не снижается ни от давности, ни, как оказалось, от расстояния. Я бы назвала это уроком вкуса к культуре и внутренней свободы.

Социально-культурные критерии и ориентации, циркулирующие в обществе в каждый момент времени, обладают различными характерными временами жизни и популярности. Социальная обязанность, возложенная на интеллигенцию, в том числе, и научную, включает в себя как одну из главных задач воспроизводить, сохранять и ценить духовную культуру во всём существующем объеме. Тогдашнее наше образование (70–80 гг.), даже университетское, было очень слабо, как мне кажется, склонно внедрить нам в головы мысль о том, что именно в этом состоит наш долг перед обществом. Поэтому усвоить смысл этой роли мы могли только на примерах. И Игорь Андреевич своим образом мышления и образом жизни — научной, социальной и частной — показал нам такой пример, и блестящий. Пример умения наслаждаться плодами культуры, умения и смелости отстаивать её ценности. Эти умения были следствием удивительной и какой-то очень естественной внутренней свободы и независимости Игоря Андреевича и его поразительной подвижности в пространстве мировой культуры. И в этом смысле он принадлежал миру, а не только «здесь и сейчас». Его отношения с культурой четко ассоциируются со словами А. Блока, сказавшего о достоянии интеллигенции: «Уменье, знанье, методы, и таланты — имущество кочевое и крылатое».

Что касается самой сложной составляющей нашей социальной роли, составляющей, связанной с воспроизводством культуры, то для нас она означала производство научных знаний. И в этой сфере позиция Игоря Андреевича тоже была выдающейся. Его реальный научный авторитет намного превышал формальный ВАК'овский ранг, и насколько я знаю, он не считал нужным прилагать усилия для уменьшения этого разрыва. Выбор же задач диктовался интересом к фундаментальной проблеме: чем живое отличается от неживого. Это вопрос оснований науки, поэтому им надо и интересно заниматься, независимо от того, велики ли сегодня шансы на него ответить. Такая социально-научная позиция довольно четко — хоть и без деклараций — противостояла иерархической озабоченности, так как последняя диктовала выбор специфических задач: с гарантией решаемых в обозримый срок и «диссертабельных». Но реализация кем бы то ни было названной позиции вовсе не означает, что она должна быть идеалом для всеобщего подражания. Это невозможно и ненужно. Тем не менее, когда мы не просто занимались наукой, но стремились к достижению своих прагматических и престижных целей, то было очень важно иметь перед глазами человека авторитетного и сравнительно свободного от этих стремлений, человека, чей образ бытия напоминал нам об относительности и условности наших движений и успеха.

Высокая незаурядность Игоря Андреевича не делала, однако, уникальной его роль носителя пусть не популярных, но долгоживущих ценностей. Потому что существование не только книжного, но и живого человеческого канала трансляции от поколения к поколению основных духовных ценностей — явление устойчивое в истории культуры. И уход Игоря Андреевича означал, что в том научном и человеческом кругу, в котором он жил, нашему или чуть более раннему поколению предстояло выполнять эту функцию. Сейчас, более чем 30 лет спустя, ещё рано — да и невозможно издалека — судить, удалось ли кому-то исполнение этой роли с таким же блеском, как Игорю Андреевичу.

Эти заметки — переработанный вариант написанного вскоре после смерти Игоря Андреевича. Последние 20 лет автор живет в США и работает по всему миру, более чем в 30 странах. В настоящее время, О. З. Каганова является Principal Research Scientist at NORC at the University of Chicago (office in Bethesda, Maryland). Контактная информация: `olga.kaganova@gmail.com`

Семинар, посвящённый 100-летию со дня рождения И. А. Полетаева

2 февраля 2015 г. Новосибирск, ИМ СО РАН

Программа семинара

Открытие

В. Л. Гавриков, Р. Г. Хлебопрос. Подход «микро-макро» в моделировании роста дерева и проблема бессмертия

В. П. Голубятников, В. А. Лихошвай. Осциллирующие и хаотические траектории в моделях генных сетей

А. Г. Дегерменджи. Развитие теории Л–систем

А. С. Комаров. От модели роста дерева И. А. Полетаева до модели лесных экосистем

Г. Ю. Ризниченко. Игорь Андреевич Полетаев, кибернетика и синергетика

Заключительная часть

В. Л. Гавриков[1], Р. Г. Хлебопрос[2]

Подход «микро-макро» в моделировании роста дерева и проблема бессмертия

[1] *Сибирский федеральный университет*
[2] *МНЦИЭСО КНЦ СО РАН*

Один из подходов к математическому моделированию в биологии состоит в том, что объект (например, организм) представляется механистической системой его частей — структурных единиц. Общий размер организма (макрокартина) в некоторых случаях может быть выведен из роста и взаимодействия этих элементарных единиц (микропроцессы). Большую роль в развитии данного направления в моделировании сыграли работы И.А. Полетаева (1980).

С позиций такого подхода дерево может быть представлено популяцией побегов, чему имеются достаточные биологические основания, так как очень часто эти организмы имеют хорошо выраженную сегментированную структуру строения как ствола, так и кроны. Многие из хвойных, в особенности сосновые, демонстрируют строение в виде хорошо различимых мутовок, а их зимующие почки, дающие долгоживущие ветви, концентрируются на конце побега. В различных вариациях такой модульный характер роста присущ всем видам рода Pinus, т. е. для таких деревьев применима схема, согласно которой терминальный рост может быть представлен как последовательность «почка $\to$ побег $\to$ почка $\to \ldots$».

На основе данной идеализации может быть рассмотрена простая динамическая модель роста дерева в высоту (Gavrikov, Karlin, 1993). Пусть l – длина побега, а x – длина терминальной почки. Естественно ожидать, что может наблюдаться связь типа $x_{n+1}(l_n)$, которая отражает длину терминальной почки, сформированной побегом текущего сезона роста длины l, где n обозначает число лет роста.

Ожидается, что существует также и связь $l_n(x_n)$, которая дает длину терминального побега, который вырос из почки длиной x в год n. Таким образом, функции $x(l)$ и $l(x)$ предоставляют возможность рассмотреть искомую последовательность роста в терминах размеров почек и побегов. Можно показать, что если функции $x(l)$ и $l(x)$ имеют вид

$$l(x) = k_1 x,\ x(l) = k_2 l,$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты связей, общая длина оси L растет согласно геометрической прогрессии (1), см. рис. 1.

$$L(n) = l_0 \frac{(k_1 k_2)^n - 1}{(k_1 k_2) - 1}. \tag{1}$$

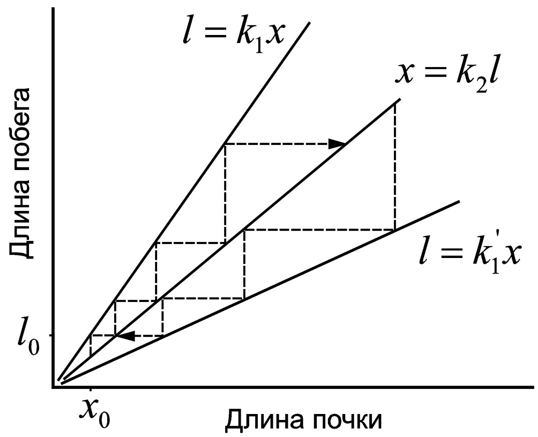


Рис. 1. Модельные зависимости длины побега l от длины почки x. k_1 и k_1' – коэффициенты зависимости $l(x)$, k_2 - коэффициент зависимости $x(l)$. Пунктирные ломаные линии отражают временной ход динамики. Предполагается, что $k_1 k_2 > 1$, а $k_1' k_2 < 1$.

Свойства функции (1) определяются значением произведения коэффициентов $k_1 k_2$. При $k_1 k_2 > 1$ имеет место экспоненциальный рост (см. рис. 1, восходящая пунктирная линия), при $k_1 k_2 = 1$ выражение (1) вырождается в $L(n) = l_0 n$, что означает линейный рост; наконец, при $k_1 k_2 < 1$ имеет место экспоненциальное затухание роста, когда $L(n)$ стремится к конечной асимптоте (см. рис. 1, нисходящая пунктирная линия). Таким образом, выражение (1) содержит в себе все специфические особенности динамики роста, наблюдаемые у индивидуального дерева до стадии поздней репродуктивной зрелости (т. е. до начала старения организма). Другими словами, если в последовательности длин годичных приростов $k_1 k_2$ будет скачкообразно или непрерывно меняться от $k_1 k_2 > 1$ до $k_1 k_2 < 1$, это будет иметь результатом характерную S–образную кривую роста в высоту (рис. 2).

Модель роста в виде последовательности «почка $\to$ побег $\to$ почка $\to \ldots$» хорошо соответствует эмпирическим данным. Она предполагает параметры, которые могут быть прямо оценены на деревьях, а форма модели достаточно проста для аналитического рассмотрения. Вместе с тем, необходимо отметить, что данная версия модели в значительной степени зависит от предположения постоянства произведения коэффициентов k_1k_2. Только в этом случае может быть получено аналитическое выражение в виде суммы геометрической прогрессии. Однако для этого случая также возможно представить область применения. Например, когда становится очевидным, что $k_1k_2 < 1$ и уже не превысит этого значения, можно поставить задачу оценить конечные размеры (длину оси роста), исходя из этого соотношения. При этом не требуется каких-либо априорных предположений об асимптотическом пределе роста, которые, как правило, являются составными частями классических уравнений роста.

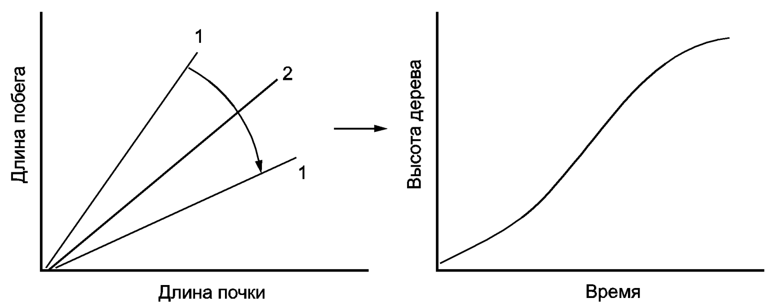


Рис. 2. Изменения параметров связей $l(x)$ (линия 1) и $x(l)$ (линия 2) в процессе роста приводят к результирующей S–образной кривой роста.

Предположение постоянства k_1k_2 приводит к тому, что уравнение (1) может генерировать характерные стадии роста дерева только поотдельности. Тем не менее, расширение модели возможно (Гавриков, 2013), и оно связано с «проблемой бессмертия» в биологическом моделировании. Асимптотический характер классических моделей роста организмов не соответствует биологической реальности, так как предполагает бессмертие организма (рис. 3). Концептуальный выход из этого противоречия видится обычно в ограничении диапазона действия модели определенными рамками, например, возрастом поздней генеративной зрелости дерева, когда оно еще растет.

Расширение модели требует нескольких несложных предположений. Во-первых, необходимо разделять потенциальные возможности растущего из почки побега и реализуемый в конкретных условиях размер. Свойства почки как зародыша будущего побега таковы, что, развиваясь, она способна превратиться в побег, по размеру больший, чем обычно наблюдается в реальности. Причина этому – конкуренция растущих побегов за имеющиеся ресурсы. Темп прироста побегов ниже, чем потенциальный темп увеличения их числа. Такой подход можно обозначить как «популяционную» модель роста дерева.

Дерево представляет собой развитую архитектурную систему, и влияние ближайших побегов–конкурентов всегда будет больше, чем отдаленных. Однако для упрощения анализа в модели предполагается, что в той или иной мере все побеги оказывают влияние на рассматриваемый.

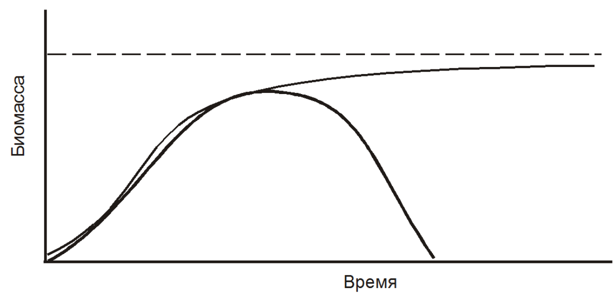


Рис. 3. Различие между асимптотическим поведением классических моделей роста (тонкая линия) и реалистичным ростом организма (жирная линия). Пунктир — асимптотический предел для модели роста.

Зависимость роста побега от всей популяции может иметь и другую интерпретацию. Поскольку рост дерева происходит аллометрически, с увеличением размера изменяются исходные пропорции дерева, что может означать накопление структурных проблем и противоречий в растущем организме. Другими словами, сам факт увеличения размера дерева может оказывать влияние на рост конкретного побега.

Во-вторых, предполагается, что в течение одного цикла роста (вегетационного сезона) итоговую массу побегов можно представить как линейный баланс между потенциальной их массой и «изъятием», возникающим в результате конкурентных ограничений.

Пусть теперь $l(n)$ — прирост биомассы побегов дерева в год n, а K соответствует $k_1 k_2$, при этом $K > 1$ (что отражает потенциальные возможности роста) и постоянно. Потенциал роста в год n в случае экспоненциального ускорения, равен $l_0 K^n$. Изъятие из потенциала можно представить пропорциональным всей ранее выросшей популяции побегов, причем $\delta < 1$ – постоянный коэффициент этой пропорциональности.

На основе этих предпосылок можно осуществить последовательное вычисление результатов роста как

$$
\begin{aligned}
&l_0 = l_0\\
&l_1 = l_0 K - \delta l_0\\
&l_2 = l_0 K^2 - \delta(l_0 + l_1) = l_0 K^2 - \delta l_0 - \delta l_0 K + \delta^2 l_0 \qquad (2)\\
&l_3 = l_0 K^2 - \delta(l_0 + l_1 + l_2) = l_0 K^3 - \delta l_0 - \delta l_0 K^2 + \delta^2 l_0 + \delta^2 l_0 K - \delta^3 l_0\\
&\quad \dots
\end{aligned}
$$

Пренебрегая в уравнениях (2) членами, содержащими δ в степени 2 и выше, получаем последовательность, в которой n обозначает год, L — потенциал прироста (положительная составляющая баланса), M – изъятие из потенциала роста (отрицательная составляющая баланса):

$$
\begin{array}{ccr}
n & L & M\\
0 & l_0 & 0\\
1 & l_0 K & \delta l_0\\
2 & l_0 K^2 & \delta l_0(1+K)\\
3 & l_0 K^3 & \delta l_0(1+K+K^2)\\
 & \dots & \\
n & l_0 K^n & \delta l_0(1+K+K^2+\dots+K^{n-1}).
\end{array} \qquad (3)
$$

В столбце L системы (3) представлена геометрическая прогрессия с известной суммой ряда

$$\sum_n L_n = l_0 \frac{K^{n+1} - 1}{K - 1}. \qquad (4)$$

Если просуммировать содержимое скобок в столбце M в (3), то получится ряд, именуемый арифметико-геометрической прогрессией:

$$\sum_n M_n = \delta l_0[n + (n-1)K + (n-2)K^2 + (n-3)K^3 + \dots + K^{n-1}],$$

которая может быть представлена в свернутом вида как

$$\delta l_0 \sum_{i=0}^{n} [n + (i-1)] K^i.$$

Данная сумма, согласно Градштейн и Рыжик (1963), равна

$$\delta l_0 \left(\frac{n - [n + (n+1-1)\cdot(-1)]K^{n+1}}{1-K} + \frac{(-1)K(1-K^n)}{(1-K)^2} \right)$$

или, приводя к общему знаменателю с учетом того, что $K > 1$,

$$\sum_n M_n = \delta l_0 \left(\frac{K^{n+1}}{(K-1)^2} - \frac{n(K-1)+K}{(K-1)^2} \right). \tag{5}$$

Сравнивая выражения (4) и (5), легко видеть, что при больших n они ведут себя как K^{n+1}, а множители определяют, какая из функций оказывается быстрее. Параметр δ, который отражает степень конкурентного влияния на рост побега со стороны всей популяции побегов, определяет соотношение между кривой потенциала роста и кривой конкурентного давления (изъятия прироста). Разница между значениями L_i и M_i в любой момент времени i представляет собой результирующий прирост $G_i = L_i - M_i$. Динамика этих приростов G_i и определяет кривую роста.

Нетрудно показать, что если $\delta = K - 1$, то функции (4) и (5) растут с одинаковой скоростью, сохраняя постоянную разницу между собой в любой момент n. Положим, например, что разница между приростами в соседние моменты времени в (3) равна нулю (прирост не меняется), т. е., например,

$$G_3 - G_2 = (L_3 - M_3) - (L_2 - M_2) = 0 \Rightarrow$$

$$l_0K^3 - \delta l_0 - \delta l_0 K - \delta l_0 K^2 - l_0 K^2 + \delta l_0 + \delta l_0 K = 0 \Rightarrow$$

$$K - 1 = \delta.$$

Таким образом, при $\delta = K - 1$ реализуется линейный рост. Соответственно, при $\delta < K - 1$ имеет место экспоненциальный рост, так как L_i всегда остается больше M_i, и разница между ними нарастает. При $\delta > K - 1$ происходит затухание роста (последовательные приросты уменьшаются), однако эта динамика не является асимптотической (рис. 4), и в этом существенное отличие модели (3) от модели (1).

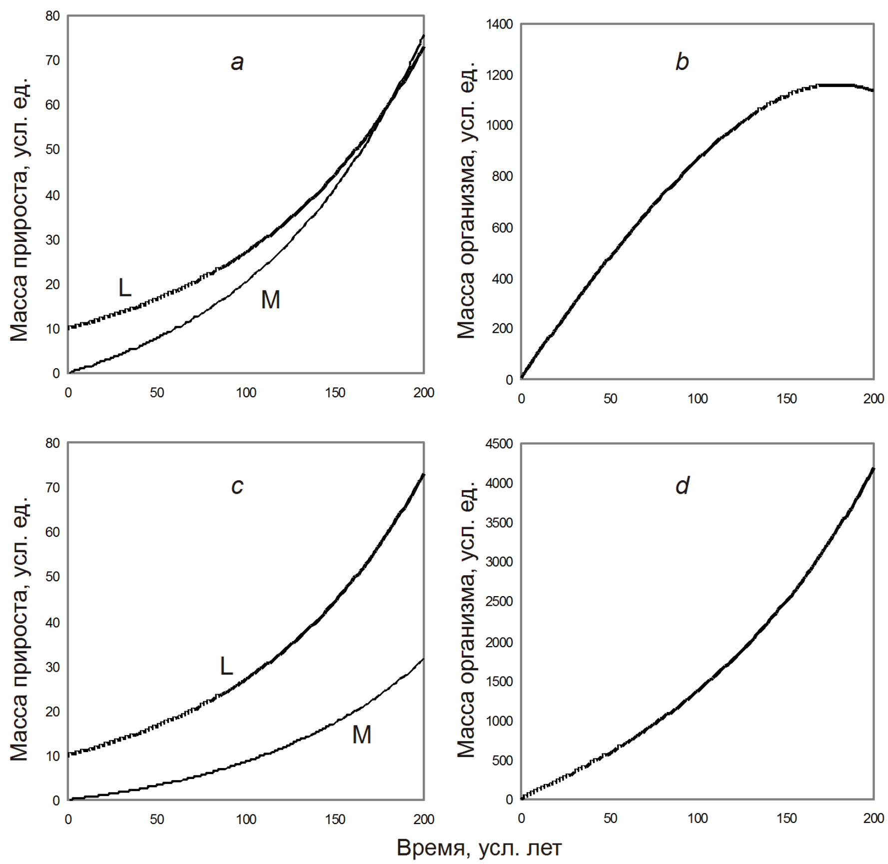


Рис. 4. Имитационные эксперименты, демонстрирующие свойства модели (3): a) ход линий потенциального прироста L и изъятия из прироста M при $K = 1,01$ и $\delta = 0,012$; b) ход роста для a); c) ход линий потенциального прироста L и изъятия из прироста M при $K = 1,01$ и $\delta = 0,005$; d) ход роста для c).

Как уже упоминалось, асимптотический характер моделей роста организмов не соответствует биологической реальности. Модель (3) в некоторой степени раздвигает границы применимости модели за пределы возраста зрелости, так как допускает, что приросты могут не только снизиться до нуля, но даже стать отрицательными, что означает начало распада организма.

Отрицательный прирост дерева в рамках традиционного лесоведческого, и тем более лесохозяйственного, взгляда не рассматривается. Наиболее вероятная причина этого — отсутствие практического смысла, но также и укоренившийся взгляд на то, что есть дерево. С точки зрения лесного хозяйства дерево — это прежде всего древесина. С биологической же точки зрения древесный организм — это совокупность живых тканей, т. е. меристемы первичного и вторичного роста, которые генерируют листовой аппарат, тонкие корни, а также ксилему ствола. Ксилема ствола, хотя и играет важную роль в создании структуры организма, для осуществления метаболизма живым тканям по большей части «не нужна». Для проведения нужного количества воды к растущим тканям достаточно нескольких внешних древесных колец.

Если смотреть на дерево как на совокупность живых клеток и тканей, то становится ясно, что на древесный организм распространяются общие закономерности функционирования таких совокупностей. В частности, изменение живой массы всегда есть баланс между появившимися и выросшими клетками и тканями, с одной стороны, и отмершими клетками и тканями, с другой. В этой ситуации неизбежно возникновение трех основных видов динамики: рост биомассы при положительном балансе, отсутствие роста при нулевом балансе и уменьшение биомассы при отрицательном балансе.

Негативная часть баланса в модели (3) представлена выражением $l_0(1 + K + K^2 + \cdots + K^{n-1})$, которое пропорционально общим размерам дерева. Размеры дерева, в свою очередь, могут выражаться как общей массой выросших побегов, так и общими линейными размерами оси роста (длиной ствола). В модели (3) первое ассоциируется с конкурентным торможением роста побега со стороны других побегов. Второе связывает ограничение роста побегов не столько с конкуренцией, которая в стареющем организме дерева реально уменьшается, а со структурными и биологическими проблемами, возникающими у организма в результате роста.

Существуют очевидные и известные причины, которые приводят к тому, что деревья не могут расти бесконечно. Эти причины можно условно разделить на биологические и физические. К биологическим причинам можно отнести, например, гипотетическое представление о том, что вегетативная клетка имеет в своем распоряжении фиксированное количество делений, после достижения которого наступает ее деградация. Биологические причины, как правило, кладутся в основу выделения стадий развития растительного организма (Николаева, Савчук, 2009).

К физическим причинам можно отнести такие, которые определяют функционирование дерева как гидравлической системы. В известном смысле дерево живет на разности потенциалов между влажной почвой и сухим воздухом. В этих условиях проводимость растительных тканей накладывает ограничения на продуктивность древесного организма (Tyree, 2003). Для успешного осуществления побегами ростовых и фотосинтетических функций должен быть обеспечен водный транспорт от тонких корней к побегам. Поскольку рост приводит к удлинению путей транспорта от тонких корней к побегам, рано или поздно сосущей силы побегов будет недостаточно, чтобы обеспечить максимально возможный (для сформированной почки) прирост в длину. Иными словами, сам по себе рост приводит к увеличению линейных размеров дерева, которые так или иначе порождают структурные ограничения роста.

Таким образом, математически, выражение $l_0(1 + K + K^2 + \cdots + K^{n-1})$ в модели (3) выражает изъятие из максимального прироста, пропорциональное общим размерам дерева. Интерпретации же природы этого изъятия могут быть разного характера — от конкурентной до структурно–физической.

Рассмотренная модель опирается на элементарные процессы (на определенном уровне обобщения) роста хвойного дерева в направлении удлинения оси роста и массы. Эти элементарные процессы наблюдаемы непосредственно на объектах изучения, и из них может быть выведена долговременная ростовая динамика. Такой подход помогает более глубокому пониманию механизмов этой динамики, но, кроме того, в отдельных случаях могут быть предложены варианты практических приложений модели. Например, с того момента, как $K < 1$, может быть применена формула геометрической прогрессии для прогноза максимально возможной длины оси роста.

Литература

Гавриков В. Л. Рост леса: уровни описания и моделирования. Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2013. 176 с.

Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. 1100 с.

Николаева С., Савчук Д. Рост и развитие деревьев и древостоев сосны на юге Томской области // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2009. 4(8). С. 68–78.

Полетаев И. А. О «формуле роста» Шмальгаузена // Известия СО АН СССР, сер. биология. 1980. Т. 5, 1. С. 3–9.

Gavrikov V. L., Karlin I. V. A dynamic model of tree terminal growth // Canadian Journal of Forest Research. 1993. Vol. 23. P. 326–329.

Tyree M. T. Hydraulic limits on tree performance: transpiration, carbon gain and growth of trees // Trees. 2003. Vol. 17. P. 95–100.

В. П. Голубятников[1], В. А. Лихошвай[2]

Осциллирующие и хаотические траектории в моделях генных сетей

[1] *Институт математики им. С.Л.Соболева СО РАН*
[2] *Институт цитологии и генетики СО РАН*

1. Генной сетью в современной литературе принято называть группы координированно функционирующих генов, управляющих молекулярно-биологическими реакциями, обеспечивающими формирование и функционирование организма [1]. В качестве моделей генных сетей мы будем рассматривать здесь нелинейные динамические системы биохимической кинетики, описывающие синтез и деградацию (положительные и, соответственно, отрицательные слагаемые в уравнениях) компонент изучаемых генных сетей.

Один из простейших классов таких моделей, не учитывающих, в частности, явление запаздывания, представим в виде

$$\frac{dx_1}{dt} = f_1(x_n) - m_1 x_1; \ \frac{dx_i}{dt} = f_i(x_{i-1}) - m_i x_i; \quad i = 2, \dots n. \tag{1}$$

Здесь x_i — концентрации компонент генной сети, неотрицательная функция f_i описывает скорость синтеза компоненты номер i, а неположительное слагаемое — скорость деградации этой компоненты. В дальнейшем для упрощения изложения будем всегда считать, что $m_1 = m_i = 1$ при всех i. Самые простые обратные связи в генных сетях, положительные и отрицательные, моделируются монотонными функциями — возрастающими и, соответственно, убывающими.

В природных и искусственных генных сетях обратные связи зачастую имеют более сложную природу и описываются унимодальными функциями вида $f(x) = \alpha x \cdot (\beta + x^h)^{-1}$ (функции Гласса-Маки), $f(x) = \alpha x \cdot \exp(-kx)$ (функция Рикера) и др., см., в частности, [3,7], где стационарные точки системы (1) находились из уравнения $x_1 = f_1(f_n(f_{n-1} \dots f_2(x_1))) \equiv \Phi(x_1)$, и для унимодальных функций f_i с помощью уравнения $x_1 = \Phi(\Phi(x_1))$ строились инвариантные окрестности некоторых таких точек. Хорошо известно, что даже в малых размерностях композиции унимодальных и других неоднолистных функций порождают фрактальные множества и хаотическую динамику, см., например, [9].

2. Рассмотрим фазовые портреты динамических систем вида (1) с «пороговыми» правыми частями: $f_1(x) = L_1(x)$, $f_i(x) = \Gamma_i(x)$, $i = 2, \dots, n$,

$$\frac{dx_1}{dt} = L_1(x_n) - x_1; \ \frac{dx_i}{dt} = \Gamma_i(x_{i-1}) - x_i; \quad i = 2, \dots n, \qquad (2)$$

где ступенчатые функции L_1 и Γ_i определяются следующим образом:

$$L_1(x) = A_1 > 2 \quad \text{при} \quad 0 \leq x < 1; \quad L_1(x) = 0 \quad \text{при} \quad 1 \leq x; \quad A_i = \text{const};$$

$$\Gamma_i(x) = A_i > 2 \quad \text{при} \quad 1 \leq x; \quad \Gamma_i(x) = 0 \quad \text{при} \quad 0 \leq x < 1.$$

Возрастающие функции Γ_i описывают положительные обратные связи в моделируемых процессах, а убывающая функция $L_1(x)$ соответствует отрицательным обратным связям. В работе [5] были установлены условия, при которых фазовый портрет такой системы содержит устойчивый цикл. Нами показано, что в этих фазовых портретах, а также в их аналогах с гладкими функциями f_i, существует бесконечно много траекторий T_*, которые никогда не попадают в области притяжения указанного устойчивого цикла.

В фазовых портретах таких кусочно-линейных динамических систем в точках $E_n = \{x_i = 1 \text{ при всех } i\}$ правые части всех уравнений имеют разрывы, однако нас интересуют лишь те их траектории, которые не попадают в эти точки за конечное время. Проходящие через эти точки гиперплоскости $\{x_i = 1\}$ разбивают положительный ортант $\mathbb{R}^n_+$ на 2^n блоков, В каждом из этих блоков система (2) линейна, ее траектории прямолинейны, и их продолжения пересекаются в одной точке, лежащей за пределами этого блока.

Каждый цикл в этих фазовых портретах надстраивается до кусочно-линейной инвариантной поверхности с вершиной в точке E_n. При $n = 4$ установлено, что все траектории T_* содержатся в подобной инвариантной поверхности, которая имеет нетривиальное зацепление с устойчивым циклом Гласса-Пастернака.

Фазовые портреты таких четномерных и нечетномерных систем имеют совершенно различную структуру (см. [6]): если n четно, то любая конечная часть любой траектории не содержит точку E_n. Значит все эти траектории содержатся в области $\mathbb{R}^n_+ \setminus E_n$. Если же n нечетно, то две прямолинейные траектории T_1 и T_2, начинающиеся на границе $\mathbb{R}^n_+$, заканчиваются в точке E_n, и в таком случае нетривиальные траектории содержатся в области $\mathbb{R}^n_+ \setminus (T_1 \cup T_2)$.

3. Изучен также случай, когда все функции f_i соответствуют отрицательным обратным связям, т. е. имеют вид функции L_1. При $n = 3$ и при $A_i \geq 2$ такая система имеет единственный цикл, см. [2]. При всех значениях n у таких систем нетривиальные траектории содержатся в области $\mathbb{R}^n_+ \setminus (T_1 \cup T_2)$, при четных n у таких систем имеется по две устойчивых стационарных точки.

В случае, когда $n = 4$ и все параметры A_i совпадают и достаточно велики, нами построена кусочно-линейная гиперповерхность, разделяющая области притяжения этих двух точек и содержащая неустойчивый цикл. Для $n = 5$ доказано существование двух циклов.

4. Рассмотрим также динамические системы, в которых наблюдается хаотическая динамика. Наиболее просто «хаотические» системы конструируются на основе унимодальных управляющих функций, например указанных выше функций Гласса-Маки, Рикера, логистической и треугольной. Необходимо также обеспечить выполнение ряда дополнительных требований. Одним из них является наличие хотя бы одного замкнутого маршрута в ориентированном графе регуляторных связей генной сети, который строится следующим образом: в качестве вершин выступают переменные динамической системы, а в качестве дуг — регуляторные связи. Под регуляторной связью понимается вхождение соответствующей переменной в управляющую функцию другой переменной. Минимальным ориентированным графом, имеющим замкнутый маршрут, является циклический граф. На его основе строятся динамические системы (1), (2).

Если в качестве управляющих функций f_i использовать только одну функцию, например функцию Гласса-Маки, то они оказываются симметричными относительно циклической перестановки переменных. Численный анализ показывает, что размерности $n = 5$ достаточно, чтобы соответствующие циклически симметричные системы (1) имели хаотическую динамику, что наблюдается, например, для функции Гласса-Маки $f^{GM}_{2,1,10}$ с параметрами $\alpha = 2$, $\beta = 1$, $h = 10$. Однако для систем минимальной размерности $n = 3$, в которой возможно хаотическое поведение траекторий, системы (1) не демонстрировали хаотической динамики ни с одной из указанных унимодальных функций. Тем не менее, оказалось, что такие динамические системы с полимодальными функциями f_i допускают хаотическую динамику. В качестве полимодальных функций можно рассматривать, например, суперпозиции одной унимодальной функции.

Результаты численных экспериментов (см. [7]) показывают, что если

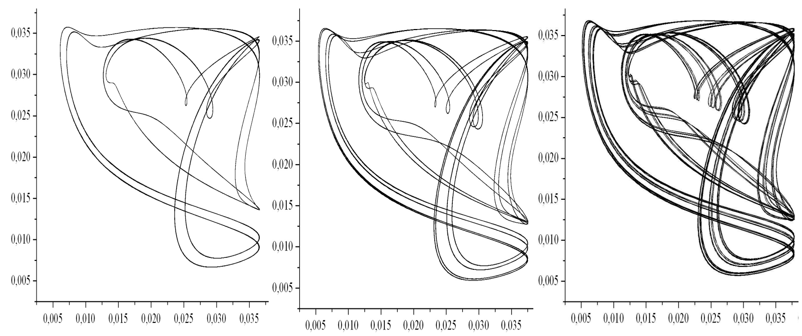


Рис. 1. Бифуркация удвоения цикла.

взять в качестве управляющей пятикратную суперпозицию функции Гласса-Маки $f^{GM}_{2,1,10}$, то в трехмерной циклической системе (1) также наблюдается хаотическая динамика, см. рис. 1, где показана бифуркация удвоения цикла этой системы при $\alpha = 1,9$, $\alpha = 1,95$, $\alpha = 1,969$, соответственно. По сценарию Фейгенбаума эта бифуркация при $\alpha = 2$ формирует «хаотический аттрактор».

Однако циклическая симметрия не является максимально допустимой. Нетрудно построить динамические системы, допускающие полную группу перестановок переменных:

$$\frac{dx_i}{dt} = f(\sum_{j=1;\, j\neq i}^{n} \frac{x_j}{n-1}) - x_i, \quad i = 1, 2, \ldots, n. \tag{3}$$

Так как симметрия и хаос являются антиподами, то возникает закономерный вопрос, достаточно ли полной симметрии для того, чтобы в фазовом портрете системы (3) не наблюдалась хаотическая динамика. Численные эксперименты показывают, что для $n = 3$ и управляющей восьмикратной суперпозиции функции Гласса-Маки $f^{GM}_{2,1,10}$ траектории системы (3) демонстрируют хаотическую динамику, см. рис. 2. Эта система имеет 6 подобных аттракторов ввиду ее симметричности. Итак, в общем случае ответ отрицательный.

5. Заключение. Изучение законов кодирования/декодирования генетической информации является фундаментальной проблемой наук о жизни. Механизмами, осуществляющими все этапы дешифровки и переноса информации на все вышележащие уровни организации орга-

Рис. 2. «Странный аттрактор» в системе (3) с функцией f, являющейся восьмикратной суперпозицией функции $f^{GM}_{2,1,10}$.

низмов, в процессе их развития, функционирования и эволюции, являются генные сети. Метод математического моделирования заслуженно признан эффективным инструментом изучения динамических систем и активно применяется для изучения свойств генных сетей уже более сорока лет, см. например [4,5], а также [10]. Открытие детерминированного хаоса в нелинейных динамических системах объяснило многие феномены, наблюдаемые на разных уровнях организации живой природы.

Хаотическая динамика прогнозируется для целого ряда клеточных процессов, как метаболических, так и молекулярно-генетических, в основе которых лежат механизмы контроля концентраций веществ, например, в простейшей модели ферментативной системы, состоящей всего из трех последовательно протекающих реакций. Также и появление в генной сети изоформ белка, обладающих противоположными регуляторными свойствами (положительными и отрицательными), может стать причиной формирования хаотической динамики в системе, см. [7,8].

В настоящей работе мы продемонстрировали динамические свойства ряда конкретных моделей генных сетей и доказали существование циклов в моделирующих их динамических системах. Полученные результаты не только расширяют наши знания о причинно-следственных связях между структурно-функциональной организацией генных сетей и их динамическими свойствами, но также закладывают теоретический фундамент для решения многих практических задач, требующих конструирования генных сетей с заранее заданными свойствами, см., в частности, [1].

Работа поддержана РФФИ, гранты 15-01-00745 и 13-01-00344.

Литература

[1] Системная компьютерная биология. — Под ред. Н.А.Колчанова, С.С.Гончарова, В.А.Лихошвая и В.А.Иванисенко. Новосибирск: СО РАН, 2008. 768 с.

[2] *Аюпова Н.Б., Голубятников В.П.* О единственности цикла в несимметричной трехмерной модели молекулярного репрессилятора. Сибирский Журнал Индустриальной Математики. 2014, т. 17, N 1, с. 3—7.

[3] *Gaidov Yu.A., Golubyatnikov V.P.* On the Existence and Stability of Cycles in Gene Networks with Variable Feedbacks. Contemporary Mathematics. 2011, v. 553, p. 61—74.

[4] *Gedeon T.* Cyclic feedback systems. Memoirs AMS. 1998, v. 134, N 637, 72 p.

[5] *Glass L., Pasternack J.S.* table oscillations in mathematical models of biological control systems. Journ. of Math. Biology. 1978. v. 6. p. 207—223.

[6] *Голубятников В.П., Голубятников И.В.* Геометрия и топология фазовых портретов динамических систем Гласса-Пастернака малых размерностей. Математические структуры и моделирование. 2014, N 3(31), с. 40—47.

[7] *Likhoshvai V.A., Fadeev S.I., Kogai V.V., Khlebodarova T.M.* On the Chaos in Gene Networks. Journal of Bioinformatics and Computational Biology. 2013, v. 11, N 1, p. 1340009-1—1340009-25.

[8] *Likhoshvai V.A., Fadeev S.I., Kogai V.V., Khlebodarova T.M.* Alternative splicing can lead to chaos. Journal of Bioinformatics and Computational Biology. 2015, v.13, N 1, p. 1540003-1 – 1540003-25.

[9] *Milnor J.* Dynamics in one complex variable. 1999, Vieweg, 257 p.

[10] *Полетаев И. А.* Сигнал. М.: советское радио, 1958. 400 с.

Г. Ю. Ризниченко

Игорь Андреевич Полетаев, кибернетика и синергетика

Биологический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова
Тел. 8-495-9390289; E-mail: riznich@biophys.msu.ru

Имя Игоря Андреевича Полетаева связано в первую очередь с книгой «Сигнал» — первой в нашей стране книгой о кибернетике, и с дискуссией «Физики и лирики». Для людей, работающих в области математического моделирования в биологии, И.А. Полетаев — автор теории Л-систем (систем с лимитирующими факторами).

И.А. Полетаев — один из основоположников математической биологии в России, который первым сформулировал основные понятия и задачи моделирования живых систем. Его статья «О математических моделях элементарных процессов в биогеоценозах» («Проблемы кибернетики», 1966, вып 16) наряду со статьей А. А. Ляпунова «О кибернетических вопросах биологии» («Проблемы кибернетики», 1972, вып. 25) является классической работой, заложившей основы математической биологии. Стиль изложения И. А. Полетаева — ясный и четкий, он дает корректные определения, не перегружая их формальными и математическими терминами. Недаром, отвечая на вопрос о своей профессии, И. А. Полетаев с гордостью отвечал: «Я — инженер». Все положения статьи сформулированы конкретно и конструктивно, в том смысле, что их можно (и нужно) применять к моделям любых явлений, которые Вы (читатель-модельер) собираетесь описывать в своей модели.

Рассуждая о математических моделях живых систем, И. А. Полетаев пользуется понятиями кибернетики: «метатеория, кодирование, оптимизация, устойчивость, обратная связь», которые были непривычными применительно к биологическим системам в 60-е годы 20 века. Сейчас без этих понятий невозможен разговор о моделях. Кибернетика, которая во времена Полетаева воспринималась как особая область знания, быстро и естественно вошла в «бытовой язык» математического моделирования во всех областях науки и техники.

Прошло 30 лет после смерти Игоря Андреевича. За это время еще одна «наука» — Синергетика — расцвела и уже почти канула в лету.

Эта наука объединила знания о нелинейных процессах и теории самоорганизации, нелинейную динамику, теорию хаоса, теорию катастроф, теорию фракталов. Конечно, её расцвет был бы невозможен без многократно возросших возможностей вычислительной техники и информационных технологий. Понятия синергетики прочно вошли в обиход физики плазмы, лазерной физики, гидродинамики, химической кинетики и, конечно, математической биологии.

Игорь Андреевич предлагал разбиение фазового пространства на конуса с тем, чтобы в каждом из конусов рассматривать линейную систему, управляемую одним лимитирующим фактором. Синергетика рассматривает нелинейность пространственно-временной динамики как естественное свойство сложных систем. Модели синергетики редко поддаются полному аналитическому исследованию и требуют объемных компьютерных расчетов. Игорь Андреевич наверняка был бы увлечен идеями синергетики, ее модели ближе к реальной жизни и искусству, красоту и сложность которых так любил и ценил И. А. Полетаев.

Сейчас понятие «синергетика» так же уходит в историю, как и понятие «кибернетика». При изучении сложных систем применение законов кибернетики и законов синергетики стали необходимыми составляющими исследования. Системы понятий этих наук приняты человеческой цивилизацией как естественные. Мы не сомневаемся в том, что Земля крутится вокруг Солнца, а местоположение и импульс частицы невозможно одновременно определить с абсолютной точностью. Так и молодые поколения изначально уверены, что контуры обратных связей регулируют поведение систем, флуктуации приводят к образованиям пространственно-временных структур, облака — фрактальны, а движение воздушных масс — хаотично.

Игорь Андреевич Полетаев из тех людей, благодаря которым человечество становится умнее.

Заключение

Игорь Андреевич любил поэзию — и с особенным чувством относился к старинной японской поэзии. Вот четыре его любимых хокку и танка.

Осенний дождь во мгле!
Нет, не ко мне, к соседу
Зонт прошелестел.

Ранран

И всего-то событий за день —
Еловая шишка с ветки упала.

Басё

Какая грусть в безжизненном песке!
Шуршит, шуршит.
И всё течёт сквозь пальцы, когда сожмёшь в руке.

Такубоку

О, сколько их на полях!
Но каждый цветок цветёт по-своему —
В этом высший подвиг цветка!

Басё

Послесловие

Всё сказано — и всё сокрыто.
Совсем прозрачно — и темно.
Чем больше имя знаменито,
Тем неразгаданней оно.

Б. Ахмадулина

Игорь Андреевич Полетаев
1915 – 1983

Редакторы
Кононенко Л. И., Волокитин Е. П., Тресков С. А.

Подписано в печать .2015. Формат 60 × 84 1/16. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 9.5. Уч.-изд. л. 9.5. Тираж 120 экз. Заказ № .

Лицензия ЛР № 065614 от 8 января 1998 г.
Издательство Института математики,
пр. Академика Коптюга, 4, 630090 Новосибирск, Россия.

Отпечатано в ООО «Омега Принт»,
пр. Академика М. А. Лаврентьева, 6, 630090, Новосибирск, Россия.