

## Научно-технический журнал

Выходит 4 раза в год

### УЧРЕДИТЕЛЬ

Институт проблем управления  
им. В.А. Трапезникова РАН

Главный редактор

**И.В. Прангишвили**

Заместители главного редактора

**А.Н. Шубин, Ф.Ф. Пашенко**

Ответственный секретарь

**Л.П. Боровских**

Выпускающий редактор

**Л.В. Петракова**

Региональные редсоветы  
(руководители)

**Владивосток**—О.В. Абрамов  
(4232) 31-02-02

**Воронеж**—С.А. Баркалов  
(0732) 76-40-07

**Липецк**—Л.А. Кузнецов  
(0742) 32-80-44

Издатель ООО «СенСиДат»

Ген. директор **Н.Н. Кузнецова**

Адрес редакции  
117997, ГСП-7, Москва,  
ул. Профсоюзная, д. 65, к. 104.  
Тел./факс (095) 330-42-66,  
тел.: (095) 334-92-00,  
334-90-20

E-mail: [datchik@ipu.ru](mailto:datchik@ipu.ru)  
[www.ipu.ru/period/pu](http://www.ipu.ru/period/pu)

Оригинал-макет  
и электронная версия  
подготовлены ООО «АКИМ»

Отпечатано с готовых  
диапозитивов в типографии  
«Капитал пресс».  
111024, г. Москва, ш. Энтузиастов,  
д. 11А, корп. 1, оф. 1.

Подписано в печать  
02.11.2004 г.

Заказ № 742

Журнал зарегистрирован  
в Министерстве  
Российской Федерации  
по делам печати,  
телерадиовещания  
и средств массовых  
коммуникаций

Свидетельство о регистрации  
ПИ №77-11963  
от 06 марта 2002 г.

Подписные индексы:  
**81708** в каталоге Роспечати  
**38006** в объединенном каталоге  
«Пресса России»

© СенСиДат, 2004 г.

# ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

## 4.2004

### СОДЕРЖАНИЕ

#### Обзоры

**Прангишвили И. В., Лотоцкий В. А., Гинсберг К. С., Смолянинов В. В.** Идентификация систем и задачи управления: на пути к современным системным методологиям . . . . . 2

#### Управление в медико-биологических системах

**Механизмы управления процессами старения и продолжительностью жизни**  
(тематическая подборка)

**Вступление** . . . . . 16  
**Яшин А. И., Украинцева С. В.** Новые идеи, методы и проблемы в моделировании демографических и эпидемиологических проявлений старения . . . . . 18  
**Новосельцев В. Н., Аркин Р., Новосельцева Ж. А., Яшин А. И.** Междисциплинарное моделирование системных механизмов управления репродукцией и старением . . . . . 27  
**Кольтовер В. К.** Надежность электронного транспорта в биологических системах и роль свободных радикалов кислорода в старении . . . . . 40  
**Михальский А. И., Яшин А. И.** Управление старением и продолжительностью жизни . . . . . 46  
**Бутов А. А., Волков М. А.** Оптимальное управление параметрами разладки в задаче максимизации энергопродуктивности и результирующая гетерогенность популяции . . . . . 54  
**Халявкин А. В., Яшин А. И.** Нормальное старение как следствие реакции управляющих систем организма на внешние сигналы, не способствующие его полному самоподдержанию. I. Биологические предпосылки . . . . . 57

#### Проблемно ориентированные системы управления

**Новиков Д. А., Чхартишвили А. Г.** Модели рефлексивного принятия решений . . . 62  
**Толстых А. В.** Моделирование механизмов управления безопасностью . . . . . 71

#### Системный анализ и обработка данных

**Блюмин С. Л., Шмырин А. М.** Нечеткие системы Вольтерра . . . . . 75  
**Жевнеров В. А.** Оптимальное управление входящим потоком нагрузки в системах с повторами передач . . . . . 79

#### Управление в социально-экономических системах

**Кононов Д. А., Кульба В. В., Шубин А. Н.** Информационное управление в социально-экономических системах: информационные акции в информационных полях . . . . . 81

#### Менеджмент и маркетинг

**Эпштейн В. Л.** Как увеличить подписку и прибыльность научного журнала: информационно-поисковый сборник аннотаций . . . . . 88  
**Ищенко А. А.** Электронная площадка — эффективное средство развития межотраслевого взаимодействия хозяйствующих субъектов в России . . . . . 92

#### Хроника

**III Международная конференция “Идентификация систем и задачи управления”** . . 96

**Указатель статей, опубликованных в журнале “Проблемы управления”**  
в 2004 г. . . . . 100  
**Index of papers published in 2004** . . . . . 101  
**Contents and abstracts** . . . . . 102

# ИДЕНТИФИКАЦИЯ СИСТЕМ И ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ: НА ПУТИ К СОВРЕМЕННЫМ СИСТЕМНЫМ МЕТОДОЛОГИЯМ

И. В. Прангишвили<sup>1</sup>, В. А. Лотоцкий<sup>1</sup>, К. С. Гинсберг<sup>1</sup>, В. В. Смолянинов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова, г. Москва,

<sup>2</sup> Институт машиноведения им. А. А. Благонравова, г. Москва

Дан аналитический обзор научных исследований по идентификации и управлению, опубликованных в трудах II Международной конференции “Идентификация систем и задачи управления”. Сформулирована его основная идея: проблемы идентификации необходимо исследовать в контексте всей человеческой деятельности, направленной на поиск решений практических задач управления. Отмечено, что существует актуальная потребность создания наукоемких методологий для начальных этапов поиска решений трудных (существенно нестандартных) практических задач, содержащих трудно формализуемые условия и высокие требования к качеству управления (оценивания, прогнозирования).

## ВВЕДЕНИЕ

Науке управления изначально было свойственно стремление к разработке эффективных процедур управления для различных видов априорной информации, что нашло наиболее яркое выражение в содержании математического аппарата теории управления. Необходимость в подобной теоретической деятельности особенно ясно осознается в современных условиях, когда имеющиеся программные и технические средства позволяют реализовывать фактически любую наукоемкую методологию поиска решений практических задач. Сейчас имеются реальная возможность и практическая необходимость объединить в единое целое три функции современной теории управления:

- разработку математического аппарата теории управления;
- разработку методологий практического применения математического аппарата теории управления;
- разработку систем обучения методологиям управления.

В настоящей работе дан аналитический обзор научных исследований по проблеме “Идентификация систем и задачи управления”, опубликованных в сборнике [1], содержащем 177 статей общим объемом 2706 с. Основная идея обзора: проблемы идентификации необходимо исследовать в контексте всей человеческой деятельности, направленной на поиск решений практиче-

ских задач управления. В рамках этого понимания упомянутая проблема охватывает, как минимум, следующие темы:

- общие проблемы системных методологий;
- структурная идентификация;
- параметрическая идентификация;
- непараметрическая идентификация;
- математические проблемы теории управления;
- идентификация медико-биологических систем;
- идентификация и управление социально-экономическими системами;
- построение и исследование систем;
- промышленные и аэрокосмические приложения;
- образование в области теории управления.

Представляется, что совместное обсуждение этих тем будет полезным с точки зрения системного объединения различных разделов и функций теории управления.

## 1. ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ СИСТЕМНЫХ МЕТОДОЛОГИЙ

Идея исследования проблем реальной идентификации в контексте всей человеческой деятельности, направленной на поиск решений практических задач управления, естественно влечет за собой:

- представление на модельном уровне поиска решения в виде системы процессов, включающей в себя идентификацию;



- направленность исследовательской деятельности на изучение объектов свойств и отношений идентификационного процесса в рамках различных схем поиска.

Теоретически подобный системный подход должен привести к созданию системных (по сравнению с существующими) методологий идентификации для различных типов практических задач, к построению системных методологий практического применения математического аппарата теории управления.

В настоящее время (и это хорошо согласуется с содержанием сборника [1]) существует актуальная потребность создания наукоемких методологий для начальных этапов поиска решений трудных (существенно нестандартных) практических задач, содержащих трудно формализуемые условия и высокие требования к качеству управления (оценивания, прогнозирования). Их основное назначение — информационная поддержка деятельности субъекта идентификации по преобразованию трудно формализуемых условий в хорошо формализуемые на основе целенаправленного сбора, человеческой переработки и порождения нового знания. Ключевую роль в разработке подобных методологий, несомненно, будут играть системный подход к исследованию проблем идентификации, фундаментальные исследования математических и вычислительных проблем управления, концептуальных и когнитивных аспектов идентификации и моделирования, компьютерных проблем развития глобальной информационно-вычислительной среды. Многие работы в сборнике [1], особенно [2–7], можно рассматривать как необходимые этапы идущего пока стихийно процесса разработки системных методологий.

В работе [2] приведен обзор существующих подходов к управлению динамическими системами на основе сочетания традиционных методов и средств искусственного интеллекта. Обсуждены вопросы применения (разработанных в Институте теории и динамики систем управления СО РАН) новых логических методов представления и обработки знаний и создания на этой основе нового класса систем интеллектуального управления — логико-управляемых систем. Так называются системы интеллектуального управления, в контуре управления которых применяются средства автоматического доказательства теорем. Приведено описание новых логических средств (позитивных исчислений), их преимуществ и ограничений по сравнению с известными средствами искусственного интеллекта.

Относительно факторов, затрудняющих широкое применение логического подхода к задачам управления, утверждается следующее. Основная причина, обуславливающая высокую сложность поиска вывода для достаточно богатых логических исчислений, состоит в рекурсивности формального описания задачи в явной или скрытой форме. Источником такой рекурсивности может стать, например, необходимость развертывания поведения системы во времени и пространстве. Вторая причина — монотонность выводов, означающая, что однажды выведенный факт не может утратить своей истинности со временем. Предлагается подход, который позволяет, по крайней мере, для некоторых важных классов задач оперировать с немонотонностью и преодолеть проблемы рекурсивности, оставаясь в рамках классического подхода. Дальнейшее развитие нового направления видится в:

- создании “нечеткого” варианта разработанных позитивных исчислений;
- применении современных идей приближения дедукции к практическим рассуждениям;
- организации взаимодействия уровня рассуждений общего вида со средним уровнем обработки инструктивных знаний (типа правил “если — то”) и с нижним уровнем алгоритмического типа (искусственные нейронные сети, генетические алгоритмы, традиционные алгоритмы управления);
- автоматизации целеполагания и пересмотра критериев качества управления; эта проблема называется суперзадачей в области создания систем интеллектуального управления сложными системами.

В работе [3] в сжатой тезисной форме изложены результаты и перспективы работ по выполнению Программы создания “Единой геометрической теории управления — Теории структур управления”. Начальный этап этой Программы сформулирован в 1993 г. Он существенно опирался на опыт и результаты создания теории управления системами с распределенными параметрами, начатой в 1959 г. в Институте проблем управления АН СССР. Предлагается создавать геометрическую теорию управления по образу и подобию разрабатываемой в современной теоретической физике Единой геометрической теории поля или Единой теории всех фундаментальных взаимодействий. Утверждается, что потребность в построении новой теории возникла из желания решать широкий круг актуальных проблем: от управления когерентным лазерным излучением до распределенных нейронных сетей. Ее основное назначение — теоретическое решение проблемы управления структурами вместе с их симметриями. Традиционная теория в подавляющем большинстве своих задач этим не занималась, ограничиваясь управлением состояниями, причем в фиксированных, уже заданных, неизменных системах, т. е. в системах с фиксированными структурами и соответствующими фиксированными симметриями.

Дано определение структур и пространств как предикатов и отношений. Установлено, что для каждой системы из широкого класса систем с управлением имеются три собственные структуры: структура Калмана, структура Монжа или структура фазового портрета дифференциального включения, вторичная метрическая структура. При этом каждая последующая из этих структур вложена в предыдущую. Показано, что понятию “система с управлением” можно придать геометрическое содержание (т. е. истолковать геометрически), если отождествить его с понятием “расслоения”, где множество локальных состояний — это база расслоения; множества значений управления, зависящие от локальных состояний, — слои расслоения (возможно не идентичные); управление — это связность в этом расслоении; синтез (обратная связь) — сечение расслоения.

В рамках философского осмысления возможностей геометрической теории управления сформулирована гипотеза, которая названа “Принцип (закон) 100%-ной эффективности математики”. Суть принципа в следующем: “Для любой реальности (явления, процесса и т. д.) и любой наперед заданной (но не абсолютной) точности существует математическая структура, которая описывает эту реальность с этой точностью, и обратно, для любой математической структуры и любой точности существует реальность, которая описывается этой структурой

с этой точностью”. Интуитивно ясно, что история науки не дает нам примеров, позволяющих опровергнуть данный принцип, который поэтому кажется методологически верным. Тем не менее, в каждый конкретный исторический период у нас часто не хватает ресурсов для получения с заданной точностью необходимого (для отыскания решения практической проблемы) описания реальности. И в этом случае неизбежно возникает идея использования присущих только человеку способностей в процессе управления, которая реализуется в различных человеко-машинных системах. Более того, любая система или непосредственно в явном виде содержит человеческий фактор, или является элементом системы, которая содержит человеческий фактор.

Исследование [4] представляет собой обзор основных положений теории непараметрического оценивания сигналов, разработанной А. В. Добровидовым в последние два десятилетия. Ее эмпирический базис — стандартный набор содержательных задач фильтрации, интерполяции, прогноза и оценивания моментов изменения свойств процессов. Стандартность набора состоит в том, что его теоретическое моделирование — традиционный элемент многих фундаментальных исследований. Разными в этих исследованиях обычно являются результаты моделирования — математические постановки содержательных задач, точнее, условия придуманных теоретико-вероятностных задач. Сложность этих задач такова, что для некоторых условий не разработаны еще рационально обоснованные методы решения, или имеются несколько методов, выбор из которых необходимо осуществить на основе учета свойств решаемой практической задачи, т. е. на базе содержательного контекста вероятностных задач.

В работе [4] выбрана непараметрическая формулировка условий, содержащая следующие элементы:

- частично наблюдаемый случайный процесс с ненаблюдаемой компонентой (полезный сигнал) и наблюдаемой компонентой (наблюдения); пара (полезный сигнал, наблюдения) является марковской;
- относительно априорного распределения полезного сигнала известны только непараметрические ограничения;
- условная плотность наблюдений, определяющая функциональный вид модели наблюдения, принадлежит условно-экспоненциальному семейству плотностей — обобщению экспоненциального семейства по Э. Леману.

Условно-экспоненциальное семейство является достаточно представительным. Оно содержит такие распределения, как многомерное нормальное, рэлеевское,  $\chi^2$ -распределение, весь класс бета-распределений, часть распределений системы Пирсона и др. Поэтому разработанный непараметрический математический аппарат будет иметь широкое практическое применение, в частности в задачах обработки сигналов в системах радио- и гидролокации. Метод решения задач теории базируется, в первую очередь, на концепции и аппарате эмпирического байесовского подхода Г. Роббинса и сформулированной установки на применение непараметрического подхода к оцениванию сигналов при наличии непараметрически заданных условий вероятностной задачи. При эмпирическом байесовском подходе задачу оценивания полезного сигнала удается свести к задаче оценивания известных функционалов от неизвестного распре-

деления наблюдений. Для оценивания функционалов, зависящих от неизвестного распределения, применяется непараметрический подход, основанный на ядерных оценках Розенблатта—Парзена, обобщенных в двух направлениях: на наблюдения с зависимыми значениями и на функционалы с особенностями. Обобщение в первом направлении позволяет пользоваться динамическими моделями наблюдений и строить сходящиеся непараметрические оценки функционалов по слабозависимым наблюдениям. Обобщение во втором направлении обеспечивает возможность построения устойчивых непараметрических процедур с “хорошими” свойствами. Подчеркнем, что полученные в работе непараметрические оценки ненаблюдаемого сигнала сходятся к оптимальным байесовским оценкам в различных метриках (в зависимости от условий).

В связи с данным исследованием возникает вопрос: существуют ли какие-то чувственно-воспринимаемые, наглядные характеристики объективной реальности, измеряя которые мы могли бы достоверно утверждать, что при поиске решения практической проблемы лучше использовать непараметрические условия, чем параметрические (или наоборот); или все зависит от априорной нацеленности исследователя на применение определенного математического аппарата и от степени разработанности этого аппарата, т. е. от наличия в нем достаточных для отыскания решения практических проблем операциональных возможностей? Математическая интуиция и методология должны подсказывать нам принципиальные ответы на подобные вопросы, опережая конкретные математические и прикладные исследования. Необходима нацеленность на создание системных методологий, которая в настоящее время не ощущается и не стимулируется в финансовом и организационном отношениях.

В чем сложность практического применения математического аппарата теории управления? Общеизвестно — в абстрактности и отсутствии наглядности основных математических понятий теории. Математические понятия настолько сильно отличаются от естественных для человека базисных понятий, что возникает необходимость в особой человеческой деятельности — идентификации, создающей возможность перехода от явлений реального мира в виртуальный мир математической теории, и обратно из виртуального мира в объективную реальность. В процессе идентификации создаются все описания реальности, необходимые для практического применения таких элементов математического аппарата, которые позволяют отыскать решение конкретной практической задачи. Идентификация в разных формах продолжается в течение всего жизненного цикла любой реальной системы с управлением. Мы мало знаем о внутренних механизмах реальной идентификации, об истинных способностях субъекта идентификации, что он может, а в чем ему надо оказать информационную поддержку в такой сложной деятельности, как переход от объективной реальности к модельным представлениям математической теории и обратно. Надо многое еще понять, чтобы появились эффективные методологии идентификации. Несомненно, однако, что любая методология должна включать в себя процесс человеческого выбора. Роль этой процедуры чрезвычайно велика — ведь именно в ходе выбора вырабатывается текущее управление процессом идентификации.



В исследовании [5] дано описание как классических моделей максимизации полезности, так и моделей с пороговой полезностью, в которых порог зависит от одного варианта, от обоих сравниваемых вариантов, от обоих вариантов и множества, в котором эти варианты представлены, и др. Введены различные типы бинарных отношений, что позволило дать новую классификацию частных порядков. Суть изучаемой проблемы в следующем. Парадигма максимизации полезности лежит в основе моделей теории принятия решений, макроэкономики, психофизики и других смежных областей. Эта парадигма восходит, по меньшей мере, к XVIII в. Согласно этой парадигме человек при выборе варианта из некоторого множества приписывает элементам множества некоторую полезность, и далее выбирает те варианты, которые имеют наибольшую полезность. Вместе с тем известны примеры, когда поведение индивидуума в этих терминах описать не удастся. Например, человек может не почувствовать разницу между 1 и 2 мг сахара в чашке кофе, 2 и 3 мг и т. д. Поскольку отношение несравнимости транзитивно, то разница между 1 и 3 мг также не должна чувствоваться. Но, продолжая это рассуждение, можно прийти к выводу, что нет разницы между 1 мг и, скажем, 20 г сахара в кофе, что, конечно же, представляется сомнительным. Попытки обойти этот недостаток классической теории привели Ф. Т. Алескорова к рассмотрению моделей пороговой полезности, в которых считается, что вариант  $x$  более предпочтителен, чем вариант  $y$ , если разница между полезностью  $x$  и полезностью  $y$  превышает некоторый порог. Исследование моделей с пороговой полезностью, зависящей от множества альтернатив, начато в 1992 г. Настоящее исследование представляет собой изложение полученных результатов.

В работах [6, 7] утверждается, что в классической компьютерной модели фон Неймана произвольные структуры данных формируются последовательностями (потоками) адресов к памяти (для чтения/записи элементов данных). Значения адресов в потоке задаются алгоритмическими предписаниями. Классическая модель позволяет произвольным образом кодировать в потоках произвольные структуры данных. Следовательно, в управлении машинным счетом на уровне потоков адресов имеются две степени свободы; обе они открыты программистам. По своему усмотрению они строят структуры данных и для каждой из них задают последовательности адресов доступа к памяти. Здесь и скрыт источник воспроизводства избыточного многоязычия (в представлениях структурированной компьютерной информации), трудно преодолимого при интеграции. Устранить на уровне аксиоматики лишнюю степень свободы можно посредством математической регламентации используемых структур. Такую регламентацию предложено построить в виде компьютерного исчисления древовидных структур. Идеи, представленные в работе, потенциально (при соответствующем развитии и реализации) могут стать основой компьютерного базиса системных методологий.

## 2. СТРУКТУРНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ

В обзоре [8] указано: “В настоящее время отсутствует общепризнанная методология структурной идентификации. Причина, по-видимому, заключается в том, что

в среде специалистов существует два разных дисциплинарных образа структурной идентификации. На концептуальном (объяснительном) уровне все специалисты, например, согласны, что интуиция и жизненный опыт лица, принимающего решение (ЛПР), играют существенную роль в процессе структурной идентификации. На уровне же конкретного теоретического исследования основные интеллектуальные усилия направлены на структуризацию и абсолютную формализацию данного процесса. В рамках математического дисциплинарного образа наиболее важными считаются теоретические исследования по разработке алгоритмов генерации и перебора структур (структура — заданное семейство математических уравнений), выбору и оценке качества “наилучшей” структуры. Постоянный внутренний конфликт между разными образами структурной идентификации является важным фактором постановки и решения новых теоретических задач, предметом обсуждений и дискуссий”. За прошедшее время мало что изменилось. Проблемную ситуацию в теме “структурная идентификация” можно описать примерно теми же словами.

В качестве варианта объяснения изложим некоторые предположения. Начнем с определения, которое наиболее полно отражает традиционные интуитивные представления о структурной идентификации: структурная идентификация — это поиск адекватного семейства математических моделей (альтернатив) для параметрической или непараметрической идентификации или, иными словами, это поиск адекватного типа математической модели физической системы для параметрической или непараметрической идентификации. Медленно прочитаем данное определение, вдумываясь в каждое слово, чтобы осознать наглядный образ (значение слова), которые при этом возникает. В рамках приведенного определения наиболее трудно понимаемы слова “поиск”, “адекватность”. В настоящее время отсутствует не только общепризнанное толкование смысла и значения этих слов, но и детально разработанные трактовки. В отношении слова поиск существуют, по-видимому, два уровня понимания. На предметно-содержательном, наглядном уровне, обусловленном в основном практическими работами в области идентификации, поиск осознается как сложная интеллектуальная деятельность, в которой доминирующую роль играют технологические и теоретические знания, интуиция, здравый смысл и жизненный опыт субъекта идентификации, его профессиональная подготовка в области процесса решения практических проблем идентификации. Для возникновения научного понятия поиск, необходимо целостный наглядный образ реальных процессов, которые могут быть обозначены словом поиск, выразить на языке теории идентификации. В настоящее время подобное адекватное отображение невозможно осуществить из-за фактического отсутствия в словаре теории языковых средств психологии, общей логики, методологии и философии науки, системного анализа, принятия решений, необходимых для описания творческой деятельности. Более того, доминирование в теории идентификации уровня строгости классической, чистой математики значительно затрудняет применение аппарата перечисленных дисциплин в научных работах по идентификации. Поэтому отображению на дисциплинарный уровень подвергается не весь наглядный образ, а его отдельные

фрагменты. Аналогичная, если не более сложная, ситуация со словом “адекватность”. Математическое моделирование и исследование актуальных проблем локальных фрагментов, но без учета реального контекста этих фрагментов — вот что представляет сейчас математическая теория структурной идентификации. Ее дальнейшее развитие — учет реального контекста, но это можно будет сделать, когда появится возможность не только отобразить весь наглядный образ на дисциплинарный уровень, но и отыскать математические основы структурной идентификации.

Предположим теперь, что без ограничения допускается применение новых языковых средств. Решит ли это все проблемы структурной идентификации? На описательном уровне — да, так как появится возможность зафиксировать в словесной форме различные реализованные варианты структурной идентификации. Однако скоро обнаружится, что зафиксированные варианты существенно зависят от индивидуальных способностей субъекта идентификации и от уникальных характеристик проблемных ситуаций, в которых субъект принимал решение. Ввиду этого собранный архив практически бесполезен как средство непосредственного обучения методологиям структурной идентификации. Для выхода на новый уровень исследований, позволяющий широко применять математический аппарат, необходимо отыскать математические основы структурной идентификации. Это требует таких успехов в моделировании реальной структурной идентификации, такого скачка в понимании, который может не наступить в обозримый период времени.

Уточним используемую терминологию. В теории идентификации широко распространено словосочетание “структура (математической) модели объекта”. Его применение не вызывает особых трудностей у специалистов; смысл этого выражения интуитивно ясен. Сложность вызывает проблема обоснования употребления слова “структура”. В современной математике это слово давно уже превратилось в термин, имеющий точно определенный смысл, который существенно отличается от традиционно принятого в теории идентификации. Поэтому далее всегда употребляется выражение “тип модели объекта”, которое трактуется как семейство уравнений, которому принадлежит модель объекта. В остальных случаях (когда из контекста ясно, что речь идет не о математической модели) употребление слова “структура” не вызывает внутренних возражений; например, в составе выражения “структура содержательной модели объекта”.

Исследования по структурной идентификации, представленные в сборнике [1], охватывают следующие темы: математический выбор типа ковариационной матрицы выхода многомерной системы [9]; математический выбор порядков дискретных динамических моделей на основе ранговых критериев [10]; математический выбор типа модели нелинейного динамического объекта [11]; оценивание достоверности методов решения задач практической идентификации [12]; структурная идентификация как процесс перехода от идеи к адекватной математической задаче [13]; локальная и глобальная идентифицируемость типа модели в пространстве состояний [14, 15]; автоматизация процесса структурной и параметрической идентификации [16]; математический выбор типа модели нелинейной системы из нескольких се-

мейств нелинейных дифференциальных уравнений при различных входных воздействиях и процессах [17, 18]; условная идентификация объектов управления [19]; многометодная технология построения математических моделей технических систем в условиях структурно-параметрической неопределенности [20]; многомерный статистический контроль технологического процесса по регрессионным остаткам [21].

Остановимся подробнее на работах [9, 13]. В первой из них рассмотрена многомерная система, у которой связь между выходами и входами описывается общей линейной регрессионной моделью. Имеется конечный набор статистически независимых одинаково распределенных векторов наблюдаемых выходов объекта. Относительно ковариационной матрицы каждого вектора известно только, что она принадлежит коммутативной матричной алгебре. Одновременно решаются три задачи:

- разрабатывается алгоритм выбора “наилучшего” типа ковариационной матрицы векторов наблюдаемых выходов; тип ковариационной матрицы — семейство положительно определенных матриц, параметризованное векторным параметром;
- разрабатывается алгоритм оценивания неизвестного значения векторного параметра выбранного типа ковариационной матрицы;
- разрабатывается алгоритм оценивания неизвестного значения вектора параметров неслучайной компоненты общей линейной регрессионной модели.

“Наилучший” тип ковариационной матрицы выбирается на основе последовательной проверки гипотез, нацеленной на поиск наиболее простого типа, согласующегося с наблюдениями. Оценка неизвестного значения векторного параметра выбранного типа конструируется так, что она равномерно оптимальна в классе несмещенных и в классе инвариантных оценок, если истинная ковариационная матрица принадлежит выбранному типу. Исследование [9] выполнено с максимальным применением наиболее математически обоснованных статистических алгоритмов в лучших традициях математической теории структурной идентификации; и в этом смысле оно может рассматриваться как эталон математического исследования в области структурной идентификации.

В настоящее время существуют две точки зрения на возможность практического применения результатов подобных работ. В рамках подхода, который условно назовем первым, считается — если на основе априорной информации можно обосновать условия и требования математической задачи, то ее решение можно использовать в процессе поиска решения практической задачи без проверки практической эффективности применяемых математических средств. В рамках второго подхода математическая задача и ее решение рассматриваются как элементы математического аппарата, который требуется настроить на конкретные свойства условий и требований практической задачи. Для этого необходимо в применяемом математическом аппарате выделить или ввести параметры, которые можно настраивать по априорной информации и апостериорным измерениям, причем в контур настройки обязательно должен быть включен субъект структурной идентификации. Например, в работе [9] таким настраиваемым параметром может быть уровень значимости. Анализ полезности каждого подхода представляется важным.



В работе [13] сделана попытка создать концепцию структурной идентификации, учитывающую наличие человеческого фактора и выделяющую в явном виде некоторые базовые элементы математических основ структурной идентификации. Концепция включает в себя:

- признание интуиции, жизненного опыта и здравого смысла в качестве основных инструментов субъекта структурной идентификации; установку на описание в явном виде роли и значения присущих только человеку способностей в механизмах структурной идентификации; представление, что в рамках структурной идентификации в целом имеет место доминирование ценности творческих способностей человека над ценностью современного теоретического знания, и так будет всегда;
- представление о наличии различных типов структурной идентификации; понимание структурной идентификации в узком смысле как особой человеческой деятельности, направленной на построение адекватной математической постановки практической задачи;
- нормативную схему структурной идентификации в узком смысле содержащую стадии “разработка содержательной постановки практической задачи”, “выбор математической задачи с заданными параметрами”, “поиск адекватных значений заданных параметров математической задачи”, а также этапы “коррекция содержательной постановки практической задачи”, “предварительный выбор адекватной постановки”, “поиск решения пробной постановки практической задачи”, “синтез математического описания автоматической системы”, “разработка прототипа автоматической системы”, “тестирование прототипа автоматической системы на соответствие желательным для субъекта идентификации требованиям”;
- идею алгоритмизации этапа “предварительный выбор адекватной постановки” на основе формулировки, выбора и решения математических постановок предварительного выбора.

Традиционно наука идентификации рассматривается как часть прикладной математики, понимаемой в том первоначальном смысле, который приписывался термину “прикладная математика” в период его возникновения и введения в язык науки. Предметом ее изучения и осмысления является особый тип человеческой деятельности, направленный на создание адекватных описаний реальности, необходимых, в первую очередь, для практического применения современного математического аппарата. Идентификация — процесс, основное содержание которого заключается в порождении знания, необходимого для “запуска” в дело (практику) методов и алгоритмов математики. Разнообразны типы идентификации. Например, все фундаментальные исследования в области физики по своему изначальному смыслу являются процессами идентификации. Особые трудности вызывает проведение идентификации разнообразных систем с управлением, особенно — организационных и социально-экономических. Изучение и осмысление процессов идентификации на уровне теории требует наличия специалистов, обладающих междисциплинарным мышлением и фундаментальными знаниями, прежде всего в областях классической и вычислительной математики, логики, математической теории управления, физики, психологии, социологии, экономической тео-

рии, философии науки, истории математики и естествознания, герменевтики, системного анализа, имеющих значительный практический опыт реализации идентификационных проектов. Для подготовки подобных специалистов необходимы соответствующие условия, которые легче всего реализовать в рамках уже существующих в Российской академии наук научных школ идентификации.

### 3. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ

Математические проблемы теории управления обсуждаются в большинстве представленных исследований. Однако полностью этой теме посвящено 38 статей, охватывающих в основном задачи управления, проектирования, наблюдения, фильтрации и оптимизации. В работе [22] рассмотрена задача синтеза наблюдателя для нелинейной системы, подверженной внешним возмущениям; предложен блочный подход к ее решению; для восстановления неизмеряемых компонент вектора состояния и внешних возмущений применен метод эквивалентного управления. В работе [23] представлен робастный алгоритм для получения оптимального фильтра, основанного на создании скользящего режима регулирования для компенсации возмущений.

В работе [24] исследована проблема синтеза системы управления многосвязным объектом на основе технологии вложения, построен алгоритм синтеза линейного закона управления с регулятором и предкомпенсатором. В качестве примера выбран объект в виде модели пространственного движения вертолета. Обсуждены вопросы практической реализации предлагаемого алгоритма. В работе [25] доказаны две теоремы, одна из них говорит о том, что “решение линейного обыкновенного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами, продолженное четным образом на отрицательную полуось времени, как независимого аргумента, есть положительно определенная функция”. Другая определяет интервал независимого аргумента, на котором эта положительно определенная функция не есть тождественный нуль. Показано, как эти теоремы могут быть применены в теории устойчивости движения, теоретической физике и теории обыкновенных дифференциальных уравнений.

Характерная особенность исследований, прежде всего, по теме “стохастические системы” — подробное описание постановки и результатов вычислительных экспериментов. Разработан метод синтеза оптимального фильтра для нелинейной системы с полиномиальной нелинейностью и линейным каналом наблюдения и приведены результаты сравнения предложенного алгоритма фильтрации с фильтром Калмана-Бьюси [26]. Условно-марковские системы со случайной сменой структуры рассматриваются в работе [27] с подробным описанием результатов вычислительных экспериментов. Сформулирована задача управления наблюдениями [28] для нового класса нелинейных систем с непрерывным временем. Управление переключением каналов наблюдений, в одном из которых шумы зависят от состояний и оценок, позволяет получить существенный выигрыш в точности оценивания по сравнению с наблюдениями, использующими лишь один канал, что проиллюстрировано модельным примером.

Исследована проблема линейного оценивания гильбертова случайного элемента с корреляционным опера-

тором Гильберта — Шмидта [29]; для параметрической идентификации системы, описываемой стохастическим дифференциальным уравнением, применен метод моментов, результаты проиллюстрированы модельным примером системы второго порядка [30].

Задача непараметрического оценивания плотностей распределений с “тяжелыми хвостами” рассмотрена в работе [31]. Суть предложенного метода состоит в преобразовании исходных данных к конечному интервалу и использовании трансформированной ядерной оценки типа Розенблатта—Парзена. Возможные практические применения метода — оценки рисков, характеризующихся сочетанием малой вероятности и больших потерь.

В работе [32] исследована проблема разделимости аддитивных компонент двумерных степенных рядов, связанная с задачей фильтрации двумерных изображений; в докладе [33] рассмотрена задача вычисления моментов распределения фазового вектора стохастической нелинейной системы. Исследование [34] посвящено нахождению точных (явных) решений для одномерных и переходных распределений процессов в конечномерных непрерывных линейных и нелинейных стохастических дифференциальных системах.

В работе [35] предложен общий подход к формированию двойственных оценок для широкого класса задач дискретной оптимизации; в докладе [36] исследована минимаксная модель квадратичного программирования с неопределенными параметрами, доказано существование минимаксной стратегии, предложен сходящийся алгоритм ее вычисления. В работах [37, 38] рассмотрены математические методы и алгоритмы определения мест бурения нефтедобывающих скважин на допустимом множестве координат; рассмотрена задача выбора режимов работы скважин, которые минимизируют долю попутной воды в добываемой продукции при условии выполнения плана добычи нефти.

#### 4. ИДЕНТИФИКАЦИЯ МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Проблемы идентификации медико-биологических систем обсуждаются в исследованиях, которые совокупно охватывают разные уровни организации этих систем — кроветворные системы, миокардиальная ткань, сердечно-сосудистая система, физиологические системы старения организмов, мониторинговые системы здравоохранения.

Вводная часть исследования [39] интересна общим обзором тенденций современного идентификационного моделирования медико-биологических систем, суть которых усматривается в “анализе пространства задачи”, в учете общих целей математического моделирования, предопределяющих выбор критериев адекватности модели. Массовое внедрение в технологию моделирования компьютерных средств и большого ассортимента вычислительных алгоритмов открывает новые перспективы “задачно ориентированного” применения моделей в научных исследованиях и в сервисных рутинных приложениях — в биомедицинских лабораториях и в клиниках. В качестве конкретного примера анализируются тенденции моделирования геронтологических задач, обсуждается следующий вопрос: почему прямые исследования механизмов старения на человеческих популяциях не дают убедительных результатов? Ответ, конечно, прост — с человеческими популяциями невозможно (и не должно) экспериментировать, но чтобы, все-таки, иметь возмож-

ности решать геронтологические проблемы человечества, необходимо искать подходящие экспериментальные модели — от мух до лабораторных крыс. Привлечение геронтологической информации, относящейся к разным животным, позволяет выдвигать вполне содержательные гипотезы, пригодные как для математического моделирования, так для натуральных популяционных экспериментов с животными. В заключение исследователи возвращаются к общей теме классификации целей математического моделирования и выделяют следующие четыре: технологические, научные, квалификационные, прочие. Приветствуя первые две, они не советуют увлекаться прочими, тем более что этому способствуют широкие возможности компьютерных презентаций.

На примере конкретной задачи структурной идентификации миокардиальной ткани, решаемой на основе функциональных данных — результатов электрофизиологических измерений, в работе [40] обсуждается общая проблема адекватности традиционных физико-математических моделей и методов тем новым задачам, которые возникают в теоретической биофизике. Сформулирована конкретная обратная задача системной реконструкции биологической ткани, дан обзор известных методов математической физики и предложенных математических моделей. Главный результат работы — новый метод вычисления структурных (топологических) характеристик многомерной сетевой модели ткани по функциональным данным, описывающих распределение в ткани электрического потенциала.

Одна из наиболее трудных проблем современной гематологии — регуляция кроветворения, потребность в которой возникает при пересадках костного мозга. Обычно такая регуляция осуществляется с помощью цитостатических препаратов, эффективность которых зависит от доз и моментов времени введения, а передозировки чреваты тяжелыми токсическими поражениями кроветворной системы. В работе [41] представлена математическая модель кроветворения (в виде кинетических уравнений гранулоцитарного роста и дифференцировки клеток), которая позволяет оценивать токсическое действие цитостатических препаратов на разных уровнях кроветворения. Приведены результаты модельно-компьютерных экспериментов, в которых имитировались разные режимы введения препаратов с целью идентификации динамики восстановления системы кроветворения.

Работы [42, 43] посвящены задаче идентификации формы пульсовой волны в артерии с помощью нелинейного дифференциального уравнения второго порядка, в котором совмещены два типа нелинейных функций (при первой производной) из уравнений Ван-дер-Поля и Рэлея. Для практической реализации процедуры выбора значений параметров нелинейной функции по входным данным, которые, кроме амплитуды регистрируемой волны, содержат еще первую и вторую производные по времени, применен метод нейросетевой аппроксимации. Выбор метода идентификации исследователи обосновывают следующим категоричным образом: “Все физическое многообразие может быть представлено в форме достаточно простых модельных уравнений. Например, широко распространенное колебательное движение различных систем может быть описано уравнением Ван-дер-Поля”. Однако далее они же сами показывают, что для описания пульсовой волны одного уравнения





Ван-дер-Поля недостаточно и предлагают “скрестить” его с уравнением Рэлея.

Методологии и программному обеспечению построения математических моделей влияния внешних факторов на здоровье населения посвящена работа [44]. Исследователи считают свою задачу неформальной и ответственной. Поэтому предлагают системный подход, учитывающий многофакторные превратности нашей социальной жизни. Приведены результаты корреляционного анализа влияния разных вредных производственных факторов на здоровье работников железнодорожного транспорта Нижнего Новгорода. Кроме корреляционного анализа (начального этапа мониторинга здоровья населения не только Нижнего Новгорода, но и всей России), предложены программные средства подбора прогностических моделей регрессионного анализа, которые могут, как считают авторы, “приоткрыть дверь в будущее и проанализировать, что же будет происходить в прогнозируемом периоде времени при действии существующего сочетания факторов”.

## 5. ИДЕНТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Существенное внимание в исследованиях, посвященных проблемам идентификации и управления организационными и социально-экономическими системами, уделено учету человеческого фактора и теоретико-игровым методам в условиях переходного периода к рыночной экономике, в частности теории активных систем. Так, в работе [45] с позиций этой теории исследуются такие свойства информационного управления, как согласованность и стабильность, и их влияние на эффективность управления; доклад [46] посвящен применению теории активных систем для идентификации индивидуального предложения труда; в работе [47] рассматривается активное проектирование как технология создания эффективных социально-экономических объектов в нестабильной экономике.

Исследование [48] посвящено вопросам выбора критериев и построения математической модели функционирования и эффективности городского жилищно-коммунального хозяйства в зависимости от структуры собственности на жилые дома. В работе [49] обсуждаются проблемы разработки моделей и методов финансово-экономического анализа проектов развития естественной монополии и предлагается соответствующий комплекс имитационных моделей. Имитационная динамическая модель для разработки стратегии развития предприятий минерально-сырьевой направленности, включающая в себя блоки производства, маркетинга, финансирования, экологии и др., предлагается в работе [50]. Концепция стратегического управления предприятием в условиях перехода к рыночной экономике рассматривается в докладе [51].

Проблема идентификации процессов взаимодействия субъектов и объектов интеллектуальной собственности в Интернете в классе графоаналитических моделей изучается в работе [52]. Разработанные модели позволяют упростить исходную проблему идентификации сложных динамических процессов правового регулирования субъект-объектного взаимодействия с помощью синтеза в интерактивном режиме персонализирован-

ных графических примитивов для рассматриваемой предметной области.

Работа [53] посвящена вопросам оценки интегральной гибкости управления для предприятий различных отраслей по статистике объема реализаций за 1996—2000 гг. В работе [54] проанализировано влияние слияния коалиций на их мощность; построение психологического портрета покупателя на основе методов когнитивной психологии и психодиагностики личности осуществлено в работе [55]. Вопросы идентификации системы обработки информации на промышленном предприятии с целью определения экономической эффективности использования вычислительной техники изучаются в докладе [56]; проблемы построения моделей “адекватного управления” в процессе становления и развития крупного предприятия исследуются в работе [57].

## 6. ПОСТРОЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ

В исследованиях, посвященных проблемам построения и исследования систем, нашли отражение темы “Нейронные сети и нечеткие системы”, “Интеллектуальные системы”, “Принятие решений”, “Сложные системы” и “Адаптивные и робастные системы”.

*Нейронные сети и нечеткие системы.* В исследовании [58] предложен метод синтеза адаптивного управления с нечетким регулятором, который обладает способностью, как утверждается, аппроксимировать нелинейные функции любой сложности с любой точностью. Благодаря этой способности проблема адаптации сводится к задаче поиска решения системы линейных дифференциальных уравнений. Основные этапы синтеза проиллюстрированы соответствующими формулами для случая, когда закон настройки значений параметров нечеткого регулятора определяется из условия устойчивости адаптивной системы по Ляпунову.

В работе [59] обсуждаются возможности реализации системы идентификации в нечетких системах управления с применением адаптивных фильтровых полей. Главная идея — интерпретация понятия “информация” с позиций механики сплошных сред. Дается развернутый анализ отображений информации в виде частотных спектров, нечетких данных и дискретной логики. Возможности построения управляющих систем нового поколения с помощью старой модели формального нейрона исследуются в работе [60]. Оказывается, старую модель следует обновить с учетом физиологических свойств реального нейрона и создать модель “технического нейрона”, например, в виде дискретного узла решающего поля, помещаемого в интегральное решающее поле нейросети.

В работе [61] предложены обобщенные описания множеств, которые, по мнению исследователя, более подходят для представлений структур и функций сложных систем. Желание взглянуть “с единых позиций на нечеткость, вероятность, интервальные и другие модели неопределенности” вполне понятны, но не понятно, зачем новые обобщенные описания втискивать в старое “прокрустово множество”. Пусть множества остаются множествами со всеми их достоинствами и недостатками. Новорожденным математическим объектам следует давать и новые имена.

Методы распределения элементов в модули при разных условиях неопределенности изложены в работах

[62, 63]. Основная находка исследователя: неопределенности можно преодолевать нечеткостью. В работах [64, 65] продемонстрированы результаты компьютерного моделирования нейроподобных структур мозаичного типа, ячейки которых наделяются бинарными свойствами случайных переключений, зависящими от предыстории; в кинетике роста монофазных областей обнаружены степенные законы, моделирующие самоорганизацию диссипативных структур; фрактальность показателя степенного закона используется для оценки персистентности и антиперсистентности процесса переключательной эволюции.

*Интеллектуальные системы.* Исследования по этой теме охватили различные этапы разработки интеллектуальных систем, включая построение формальной модели предметной области, спецификацию процессов вывода и обработки информации в терминах этой формальной модели, конструирование пользовательского интерфейса, сборку, тестирование и отладку прикладной интеллектуальной системы. Реализация изложенных предложений ведет к построению высоконадежных интеллектуальных систем. Исследования можно разделить на несколько групп. Первая группа включает в себя работы [66–68], посвященные проблемам создания и функционирования баз данных и баз знаний; вторая — [69–72], в которых изучаются проблемы качества программного обеспечения, предназначенного для интеллектуальных систем. В третью группу входят работы [73–78] по моделированию систем. Особое положение занимают исследования [77, 78], посвященные принципам компьютерного моделирования грамматики и семантики ритмического текста на основе модели порождения и восприятия ритмической структуры стиха.

В отдельную группу можно выделить работы [79, 80] по графическому отображению информации. Работа [80] посвящена актуальной проблеме развития графического интерфейса, качественно улучшающего взаимодействие человека с компьютером; рассматриваются различные возможные проблемные области применения систем интерфейсов с когнитивной компьютерной графикой, а также затрагиваются вопросы практической реализации интеллектуального инструментария для проектирования систем, использующих когнитивную компьютерную графику.

*Принятие решений.* В работе [81] рассматриваются методы компьютерной поддержки принятия групповых решений. Показана взаимосвязь методов поддержки согласования с характером процесса переговоров и проблем, подлежащих согласованию. Рассмотрена структура компьютерной системы поддержки принятия групповых управленческих решений, обсуждены некоторые методы поддержки проведения переговоров с ее применением.

Одна из основных и самых трудных задач в системах поддержки принятия решений состоит в автоматической генерации альтернативных вариантов решений. Инструментом для её решения может стать нейронная сеть, которая в теории искусственного интеллекта рассматривается как средство моделирования интуиции и правдоподобных рассуждений человека. На основе результатов исследования информационных технологий в работе [82] предложены новые алгоритмы обучения нейронной сети, позволяющие уменьшить ошибку распознавания и время обучения. В работе [83] обсуждаются

нейро-нечеткие методы построения системы ситуационного управления поведением сложной технической системы на основе текущей информации. В качестве машины логического вывода экспертной системы для решения проблемы идентификации и прогнозирования предлагается применять нейросетевую модель, позволяющую принимать решение по управлению сложной технической системой в условиях принципиальной неполноты и неточности исходной информации.

В поиске решений задач управления сложными объектами, к которым, в частности, относится горное производство, наибольший груз ответственности лежит на процедуре принятия решений главным специалистом производства — ЛПР. Такие объекты плохо формализуемы, например, в смысле управления качеством выходного продукта. К ним сложно применить аппарат математического программирования, построить математические модели объектов и т. д. Да и сама процедура принятия решения “вязнет” в сложной иерархии задач. В работе [84] рассматриваются компьютерные методы принятия решений в задачах оперативного (текущего) управления, необходимость и форма которых обоснованы эксплуатацией на нескольких предприятиях компьютерной технологии информационной поддержки “АНКАР”, разработанной в Институте проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. Задачи оперативного управления могут быть фрагментами как упомянутой выше глобальной задачи управления качеством продукции, так и локальных задач, и должны отслеживать их критерии. В работе [85] рассмотрен подход к построению программного комплекса для решения задачи поддержки принятия решений в управлении производством. Основные проблемы, возникающие при построении таких систем, заключаются в технической стороне хранения информации и алгоритмической организации вычислений. После предварительной обработки исходных данных программой производится машинная или человеко-машинная оценка полученных в результате вычислений “полуфабрикатов” решений, на основе которой ЛПР выбирает рациональное решение — “эффективный” путь направленного графа.

В работе [86] предложен новый класс моделей со свойством ассоциативной памяти для изучения явлений в больших социальных системах. Модели имеют структуру, сходную со структурой нейросетевых моделей хопфилдовского класса. Учет в предложенной концепции интеллектуальных свойств, присущих субъектам общественных процессов, позволил в последнее время значительно расширить круг явлений, моделирование которых становится возможным. В частности, учет возможностей субъектов строить прогнозы ситуаций и принимать решения, основанные на этих прогнозах, приводит к совершенно новым свойствам решений, основное из которых состоит в возможности появления многозначных решений. На уровне большой общественной системы это приводит к появлению множества способов поведения такой системы, т. е. сценариев развития событий. Обсуждаются следствия такого поведения для моделирования процесса принятия решений, а также некоторые аналогии с поведением квантово-механических систем.

*Сложные системы.* В работе [87] рассмотрена модель партнерства двух участников. Сначала партнеры сотрудничают для достижения общей цели; когда же один из



партнеров отказывается сотрудничать, возникают уже две цели: по одной для каждого партнера. В работе [88] исследуется вопрос, как можно стабилизировать колебания бизнес-активности путем управления хаотическим режимом в модели производства и инвестирования в фирме, имеющей финансовые ограничения. Предложен новый метод управления хаотическими движениями систем, применен аппарат нелинейных разностных уравнений. Решение проблемы синхронизации трехмерной хаотической системы дано в докладе [89]. Процесс синхронизации базируется на наблюдателе специального типа, приведены примеры синхронизации нескольких известных систем. В работе [90] излагается метод для определения размерности вложения для одно- и многовыходных временных рядов, представлены результаты моделирования известных хаотических систем.

В работе [91] обсуждается следующая проблема. В последнее время в Интернете возникла потребность в услугах повышенного качества. Как избежать дорогостоящих ожиданий? Предлагается использовать архитектуру дифференцированных услуг, метод решения задачи интернет-маршрутизации основан на теоретико-игровой модели. В работе [92] предложен последовательный алгоритм выбора как структуры, так и значений параметров системы; результаты проиллюстрированы двумя примерами. Прямой цифровой алгоритм, приводящий к замкнутой системе второго порядка с фиксированным коэффициентом затухания, приведен в работе [93]; представлены результаты компьютерного моделирования.

*Адаптивные и робастные системы.* В работе [94] для настройки регуляторов и идентификации нелинейного многосвязного объекта используются полигармонические тестовые воздействия; предложенные критерии локальной и глобальной адаптируемости обобщают ранее полученные аналогичные критерии для класса линейных объектов. Алгоритмы активной идентификации на основе корреляционных методов изучаются в докладе [95]. В работе [96] рассматривается вопрос о влиянии параметрической неопределенности объекта на устойчивость и качество переходных процессов в системах управления. В [97] исследуется задача синтеза линейного цифрового регулятора методами модального управления, приводится сравнение предложенных и цифровых ПИД-регуляторов. Работы [98–100] посвящены различным вопросам разработки программного обеспечения конечно-частотных методов идентификации; описаны возможности моделирования адаптивных систем в пакете программ АДАПЛАБ и приведены примеры работы с этим пакетом; рассмотрены также МАТЛАБ-приложения конечно-частотного метода для многомерных систем.

## 7. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Более трети всех промышленных приложений, рассмотренных в представленных исследованиях, относятся к химической промышленности, еще четверть — к машиностроению, остальные — к металлургии, энергетике, транспорту, агропромышленному комплексу и др., наиболее употребительными остаются “классические” методы, прежде всего различные модификации метода наименьших квадратов и фильтра Калмана. В работе [101] на примере задач управления дистилляционной колонной дано сравнение подходов, основанных на дедуктивном моделировании процесса (с учетом общих

физико-химических закономерностей),  $H_2$ - и  $H_\infty$ -теорией. Работы [102, 103] посвящены, соответственно, стабилизирующему ПД-управлению нелинейными химическими реакторами и ПИ-управлению температурным режимом полиэтиленового реактора с акцентом на обеспечение робастной устойчивости. Задача одновременного выбора значений параметров и оценивания состояния процессов ацетон-бутаноловой и этаноловой ферментации решается в работе [104] с помощью расширенного фильтра Калмана; дано сравнение с винеровской и линеаризованной калмановской фильтрацией, с результатами моделирования и экспериментов. В работе [105] применяются нелинейные прогнозирующие модели для управления полимеризацией метилметакрилата. Теория нечетких систем в сочетании с нейросетевым подходом применяется в исследовании [106] для идентификации процесса рН-нейтрализации, а в работе [107] — в сочетании с иерархическим вариантом метода группового учета аргументов для динамического моделирования нефтеперерабатывающего предприятия. В работе [108] рассматриваются проблемы выбора структуры (порядка) и значений параметров субоптимального регулятора температуры парогенератора.

Нейросетевой подход и нечеткая логика в рамках экспертной системы применяются в работе [109] для диагностики электроприводов подвижных объектов. Численные методы типа Рунге–Кутты применяются в исследовании [110] для оптимизации нелинейной модели системы зажигания двигателя внутреннего сгорания. В работе [111] предложен обобщенный метод построения нелинейных оценок наименьших квадратов для параметрической идентификации синхронного генератора; в работе [112] описан опыт применения средств мехатроники для электродинамического моделирования и проектирования силовых электроприводов нефтеперерабатывающего предприятия; работа [113] посвящена применению робастной версии фильтра Калмана для диагностики, локализации неисправностей и проектирования отказоустойчивых систем “датчики — исполнительные механизмы” в авиастроении; для управления температурным режимом стекольного производства в работе [114] применены численные методы и компьютерное моделирование.

Как традиционное направление работ в области промышленных приложений для металлургического комплекса можно отметить исследования [115, 116]. В работе [117], посвященной вопросам повышения качества продукции в винодельческой отрасли, рассмотрена многоконтурная система управления с идентификатором в контуре обратной связи и группой ЛПР во внешнем контуре. Попытки строить полностью автоматические системы управления в указанной отрасли обречены на неудачу, поскольку только ЛПР (в данном случае дегустатор) имеют безусловный приоритет в оценке качества готовой продукции перед физическими и химическими результатами экспресс-анализа. Поэтому разработка адаптивной автоматизированной системы с применением алгоритмов параметрической идентификации представляется весьма актуальной. Работы [118–120] по исследованию систем управления движением мобильных роботов, кроме прикладного аспекта, обращают на себя внимание тем, что системы рассматриваются в условиях нестабильности характеристик роботов.

Изначально возникнув как прикладная дисциплина, теория идентификации продолжает оставаться таковой и в настоящее время. Это обеспечило ей выживание в новых рыночных условиях, привлекает внимание специалистов, работающих в промышленной сфере и сталкивающихся с практическими проблемами управления, которые являются неиссякаемой питающей средой для науки. Поэтому нельзя в сколь угодно обозримом будущем говорить о решении всех вопросов теории идентификации, или о ее близком закате. По сравнению с предыдущим сборником [121] существенно расширилась география представленных исследований. Это свидетельствует не только о возрастании общественного интереса к проблемам идентификации, но и о том, что научные исследования в области проектирования систем управления не утасли в регионах, несмотря на нерешенные проблемы финансирования науки. Содержание исследований составляют не примеры тиражирования эталонных прикладных разработок теории идентификации в различные отрасли промышленности, а скорее примеры инноваций: создание и внедрение прототипов новых систем идентификации.

## 8. КАДРОВОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАУЧНОГО НАПРАВЛЕНИЯ

Организация конференций по проблемам идентификации и управления позволяет лишь частично скомпенсировать влияние факторов, обусловленных постоянным ухудшением кадрового обеспечения научного направления, принципиально не устраняет основную причину кризиса — крайне низкую оплату фундаментальных исследований, которая не стимулирует приток молодых специалистов в российскую науку, более того, способствует оттоку продуктивных ученых из данной сферы деятельности. Можно ли изменить ситуацию? Конечно, если признать, что базовое бюджетное финансирование и средства федерального бюджета, полученные от сдачи помещений в аренду, выделяются институтам РАН для финансирования фундаментальных исследований и условий, обеспечивающих их нормальное проведение. К числу этих условий относятся, по нашему мнению, не только традиционные компоненты (помещения, научное оборудование, административно-управленческий персонал), но и научно-практическая и чисто практическая инновационная деятельность сотрудников института РАН в рамках заключенных хозяйственных договоров. Данную деятельность предлагается поддерживать за счет средств федерального бюджета только путем предоставления помещений и научного оборудования. Выделение институтам РАН средств на предлагаемые ими фундаментальные темы должно, по-видимому, соответствовать (в определенном смысле) практике выделения средств под проекты, которой придерживается РФФИ. Последнее означает, что каждое отделение РАН должно включать в себя подразделение, в определенном смысле напоминающее РФФИ. Естественно, для институтов РАН должна быть выбрана более «мягкая» конкурсная система, чем у РФФИ. Необходимо также разрешить институтам РАН в плане официально утвержденных работ иметь не только фундаментальные, но и прикладные инновационные темы. Отличие прикладной темы от фундаментальной, на наш взгляд, состоит в том, что фундаментальная тема финансируется РАН, а прикладная — из источников, которые обязан изы-

скать руководитель данной темы. В результате сотрудник института РАН может быть исполнителем фундаментальной или прикладной инновационной темы, исполнителем обеих тем, или даже исполнителем нескольких фундаментальных тем (научных проектов). Если сотрудник является участником нескольких фундаментальных тем, оплата его научной деятельности определяется поступлениями по каждому выполняемому проекту и может быть значительно больше, чем должностной оклад, который, по-видимому, следует рассматривать как минимальный размер оплаты за деятельность в рамках одной фундаментальной темы. Возможность сотрудника академического института не быть занятым в выполнении работ по фундаментальной теме может быть обоснована необходимостью его участия в создании эталонных положений фундаментальной науки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Идентификация является обязательным элементом и наиболее сложной стадией поиска решений актуальных практических задач. Именно в процессе реальной идентификации создаются все описания реальности, необходимые в качестве исходных данных для эффективного практического применения математических методов и сложных наукоемких технологий. Ввиду этого разработка методов и в алгоритмов идентификации приобретает сейчас исключительно важное значение для фундаментальной науки. Развитие теории идентификации в классическом направлении сейчас так же актуально и практически значимо, как и в 1950-е гг., когда она зародилась под влиянием насущных проблем практики. Постоянная необходимость в оптимизации процесса решения практических проблем путем рациональной идентификации стимулирует прогресс теории в классическом направлении. Поэтому по-прежнему актуальны для фундаментальной науки такие области исследования, как математические методы параметрической или непараметрической идентификации, математическая теория структурной идентификации, математическое моделирование систем, математические проблемы управления с оперативным идентификатором.

Развитие теории идентификации в неклассическом направлении, основанное на признании решающей роли человеческого фактора в процессе структурной идентификации, имеет исключительно важное значение для поиска решений трудных (существенно нестандартных) практических задач. Поэтому в рамках фундаментальной науки актуальны такие области исследования, как разработка концептуальных основ теории управления, особенно тематики системных и общесистемных закономерностей функционирования глобальных систем, создание методов построения нормативных схем структурной идентификации, разработка методов идентификации организационных и социально-экономических систем.

Несомненно, что наиболее полное теоретическое исследование проблем реальной идентификации возможно только в контексте всей человеческой деятельности по поиску решений практических задач. Реализация этой идеи естественно влечет за собой:

- представление на модельном уровне поиска решения в виде системы процессов, включающей идентификацию;



- направленность исследовательской деятельности на изучение объектов, свойств и отношений идентификационного процесса в рамках различных схем поиска.

Теоретически подобный системный подход должен привести к созданию системных (по сравнению с существующими) методологий идентификации для различных типов практических задач, к построению системных методологий практического применения математического аппарата теории управления.

Теория идентификации как научная дисциплина, в которой порождается и концентрируется рациональное знание о механизмах идентификации, прежде всего, технологических процессов, может в силу своей уникальной проблематики всегда рассматриваться в качестве базисного направления современной науки. Однако постоянный общественный интерес к любому направлению человеческой мысли определяется не только прошлыми заслугами и объявленными целями, но и содержанием текущих научных исследований: насколько хорошо в этих исследованиях отражаются актуальные проблемы и задачи текущего периода развития науки и практики. И в этом отношении теория идентификации сталкивается с существенными трудностями. В первую очередь, они обусловлены разрушением кадрового обеспечения научного направления в связи с недостаточным финансированием фундаментальных исследований. Вторая проблема, органично связанная с первой, вызвана быстрым развитием некоторых дисциплин, которые входят в фундаментальный базис теории идентификации, в частности, математической теории систем, теории принятия решений, когнитивной психологии и методологии науки. Это развитие находит слабое выражение на теоретическом уровне ввиду крайне недостаточной для нормального развития научного направления численности молодых ученых, которым обычно свойственна особая чувствительность к осознанию и применению нового знания.

Аналогичные трудности возникли, на наш взгляд, во многих научных направлениях Российской академии наук. Эти проблемы не могут быть разрешены разрозненными усилиями отдельных ученых, необходимы скоординированные коллективные действия всего научного сообщества по оптимизации своей структуры и деятельности. Историческая роль действующего сейчас поколения пятидесяти-шестидесятилетних ученых (элиты научных направлений), по-видимому, состоит в том, чтобы подготовить и осуществить адаптацию Российской академии наук к условиям существующей и будущей рыночной среды, сохранить традиционные российские научные центры фундаментальных исследований.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Труды* Международной конференции "Идентификация систем и задачи управления" SICPRO'03. Москва, 29 - 31 января 2003 г. [Электронный ресурс]. — М.: ИПУ РАН, 2003. — 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). — ISBN 5-201-14948-0.
2. *Васильев С. Н.* Теория и применение логико-управляемых систем // Тр. междунар. конф. "Идентификация систем и задачи управления" SICPRO'03. Москва, 29—31 янв. 2003 г. — М., ИПУ РАН, 2003. — С. 23—52.
3. *Бутковский А. Г.* К философии и методологии проблем управления // Там же. — С. 53—60.
4. *Добровидов А. В.* Основы теории нелинейного оценивания сигналов // Там же. — С. 82—122.
5. *Алескеров Ф. Т.* Полезность, выбор и бинарные отношения // Там же. — С. 61—81.
6. *Затуливетер Ю. С.* Компьютерная информация в модели исчисления древовидных структур // Там же. — С. 790—858.
7. *Затуливетер Ю. С.* Метакомпьютинг в математически однородном поле компьютерной информации // Там же. — С. 1935—1949.
8. *Прангшвили И. В., Лотоцкий В. А., Гинсберг К. С.* Международная конференция «Идентификация систем и задачи управления SICPRO'2000 // Вестник РФФИ. — 2001. — № 1. — С. 44—57.
9. *Сысоев Л. П., Шайкин М. Е.* Идентификация структур ковариаций и построение оптимальных моделей для многомерных систем с неизвестными ковариациями наблюдений // Тр. междунар. конф. "Идентификация систем и задачи управления" SICPRO'03. Москва, 29—31 янв. 2003 г. — М., ИПУ РАН, 2003. — С. 215—226.
10. *Анисимов А. С., Кононов В. Т.* Структурная идентификация линейных дискретных динамических моделей на основе ранговых критериев // Там же. — С. 227—255.
11. *Бушtruk Т. Н., Бушtruk А. Д.* Структурная идентификация нелинейных динамических объектов на основе использования сумм гармонических тестовых сигналов // Там же. — С. 593—613.
12. *Абрамова Н. А.* Логический подход к анализу достоверности идентификации // Там же. — С. 651—655.
13. *Гинсберг К. С.* Структурная идентификация как процесс перехода от идеи к адекватной математической постановке прикладной задачи // Там же. — С. 147—178.
14. *Авдеенко Т. В., Каргин С. А.* О глобальной идентифицируемости линейных динамических моделей // Там же. — С. 182—194.
15. *Авдеенко Т. В.* Анализ априорной идентифицируемости динамических моделей с использованием условий ранга и порядка // Там же. — С. 195—214.
16. *Анисимов Д. Н., Колосов О. С., Никишин А.Ф., Спиридонов Д. К.* Структурная и параметрическая идентификация динамических объектов с несколькими нелинейностями // Там же. — С. 256—277.
17. *Салуквадзе М. Е., Шанишавили В. Г.* Структурная и параметрическая идентификация определенного класса нелинейных систем с обратной связью // Там же. — С. 572—582.
18. *Руруа А. А., Шанишавили В. Г.* Структурная идентификация нелинейных непрерывных стационарных систем // Там же. — С. 583—592.
19. *Фетисов В. Н.* Некоторые задачи теории условной идентификации // Там же. — С. 614—630.
20. *Бернацкий Ф. И., Дуго Г. Б., Дуго Н. Б.* Многометодная технология в задачах идентификации // Тр. междунар. конф. "Идентификация систем и задачи управления" SICPRO'03. Москва, 29—31 янв. 2003 г. — М., ИПУ РАН, 2003. — С. 631—636.
21. *Клячкин В. Н.* Диагностика технологического процесса по регрессионным остаткам // Там же. — С. 637—650.
22. *Краснова С. А.* Блочный подход к синтезу задачи наблюдения для нелинейных систем при наличии внешних возмущений // Там же. — С. 1047—1075.
23. *Basin M.V., Fridman L.M.* Optimal and robust integral sliding mode filter for systems with delayed observations // Там же. — С. 1076—1084.
24. *Букнов В. Н., Косьянчук В. В., Зыбин Е. Ю.* Алгоритм синтеза системы управления многосвязного объекта на основе технологии вложения // Тр. междунар. конф. "Идентификация систем и задачи управления" SICPRO'03. Москва, 29—31 янв. 2003 г. — М., ИПУ РАН, 2003. — С. 1136—1145.
25. *Овсеян Ф. А.* Положительно определенные функции и их приложения // Там же. — С. 2206—2232.
26. *Basin M.V., Alcorta Garcia M.A.* Optimal polynomial filter and regulator for third degree polynomial systems // Там же. — С. 2090—2105.

27. *Аверина Т. А.* Метод Монте-Карло для анализа динамики нелинейных систем со случайной структурой // Там же. — С. 2106—2121.
28. *Миллер Б. М., Степанян К. В.* Задача управления наблюдениями в системах с шумами, зависящими от состояния и оценки // Там же. — С. 1238—1251.
29. *Pankov A.R., Siemenikhin K.V.* Minimax estimation of random elements with application to infinite-dimensional statistical linearization // Там же. — С. 1277—1291.
30. *Приходько С. Б.* Выбор моментных условий для параметрической идентификации стохастических дифференциальных систем обобщенным методом моментов // Там же. — С. 1292—1301.
31. *Маркович Н. М.* Принципы оценивания плотностей распределения вероятностей с тяжелыми хвостами // Тр. междунар. конф. “Идентификация систем и задачи управления” SICPRO’03. Москва, 29—31 янв. 2003 г. — М., ИПУ РАН, 2003. — С. 2122—2124.
32. *Голяндина Н. Э., Некруткин В. В., Степанов Д. В.* Варианты метода “Гусеница”-SSA для анализа многомерных временных рядов // Тр. междунар. конф. “Идентификация систем и задачи управления” SICPRO’03. Москва, 29—31 янв. 2003 г. — М., ИПУ РАН, 2003. — С. 2139—2168.
33. *Синицын И. Н., Шайкин М. Е.* Построение приближенной модели для статистического анализа и параметрической идентификации многомерных билинейных систем // Там же. — С. 1252—1262.
34. *Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р., Белоусов В. В.* О некоторых точных решениях уравнений статистической динамики систем управления // Там же. — С. 1263—1276.
35. *Сергеев С. Н.* Общий подход для формирования двойственных оценок в задаче дискретной оптимизации // Там же. — С. 657—676.
36. *Панков А. Р., Платонов Е. Н.* Оптимальный портфель ценных бумаг в условиях априорной неопределенности // Там же. — С. 677—692.
37. *Ахметзянов А. В., Кулибанов В. Н.* Выбор управляющих воздействий при оптимизации разработки нефтяных месторождений // Там же. — С. 728—737.
38. *Ахметзянов А. В., Кулибанов В. Н.* Проблемы оперативного управления процессами разработки нефтяных месторождений // Там же. — С. 738—747.
39. *Новосельцев В. Н., Новосельцева Ж. А., Яшин А. И.* Математическое моделирование и биологическая наука (тенденции и перспективы) // Там же. — С. 279—292.
40. *Смолянинов В. В.* Задачи структурно-функциональной идентификации биологических тканей // Там же. — С. 293—322.
41. *Бабушкина Н. А.* Использование математической модели гранулоцитарного роста кроветворения для исследования токсического действия цитостатических препаратов при различных двукратных режимах введения // Там же. — С. 323—335.
42. *Суятинов С. И., Буддакова Т. И., Коблов А. В.* Принципы разработки модельных уравнений для идентификации сложных систем // Там же. — С. 336—343.
43. *Суятинов С. И., Буддакова Т. И.* Метод идентификации связанных систем естественного происхождения // Тр. междунар. конф. “Идентификация систем и задачи управления” SICPRO’03. Москва, 29—31 янв. 2003 г. — М., ИПУ РАН, 2003. — С. 344—350.
44. *Квасов А. С., Фатыхов Р. Р.* Методология и программное обеспечение построения математических моделей влияния внешних факторов на здоровье населения // Там же. — С. 351—358.
45. *Новиков Д. А., Чхартишвили А. Г.* Стабилизация информационного управления активными системами // Там же. — С. 1180—1183.
46. *Заложнев А. Ю., Новиков Д. А.* Идентификация индивидуальных стратегий предложения труда // Там же. — С. 1184—1186.
47. *Павлов С. Г.* Активное проектирование — технология создания эффективных социально-экономических объектов в нестабильной экономике // Там же. — С. 1187—1193.
48. *Глазунов С. Н.* О математической модели функционирования жилищно-коммунального хозяйства // Там же. — С. 1194—1199.
49. *Ивашкина О. О.* Модели и методы финансово-экономического анализа при управлении развитием естественной монополии // Там же. — С. 1200—1209.
50. *Жаров В. С., Цукерман В. А.* Моделирование имитационных систем для разработки стратегии развития предприятий минерально-сырьевой направленности // Там же. — С. 1210—1225.
51. *Исмаилов С. Ф.* Концепция стратегического управления предприятиями в условиях перехода к рыночной экономике // Там же. — С. 1226—1236.
52. *Ботуз С. П., Новиков Д. А.* Идентификация объектов и субъектов интеллектуальной собственности в сети Internet // Там же. — С. 2033—2041.
53. *Клепарская Е. В.* Идентификация гибкости управления для отдельных отраслей промышленности // Там же. — С. 2042—2046.
54. *Горвиц Г. Г.* Некоторые проблемы формирования коалиций // Тр. междунар. конф. “Идентификация систем и задачи управления” SICPRO’03. Москва, 29—31 янв. 2003 г. — М., ИПУ РАН, 2003. — С. 2047—2057.
55. *Аббасов А. М., Микаилова Р. Н., Караев Р. А., Алиев Б. Г.* Идентификация психологического профиля покупателя // Там же. — С. 2058—2068.
56. *Жариков И. А., Юрьев В. М.* Идентификация системы обработки информации с использованием ЭВТ на современном промышленном предприятии // Там же. — С. 2069—2081.
57. *Такадзе Т. Ш.* О построении моделей “адекватного” управления в процессе становления/развития управления большими системами // Там же. — С. 2082—2088.
58. *Коломейцева М. Б.* Синтез адаптивных систем управления на базе нечетких регуляторов // Там же. — С. 1402—1410.
59. *Дмитренко Л. Г.* О возможности реализации системы идентификации в нечетких системах управления с применением адаптивных фильтровых полей // Там же. — С. 1411—1422.
60. *Воробьев Г. Г.* О возможности построения управляющих систем нового поколения // Там же. — С. 1423—1431.
61. *Айдемиров И. А.* Обобщенные описания множеств — математический аппарат для представления структуры и поведения сложных систем // Там же. — С. 1432—1480.
62. *Хранилов В. П.* Обоснование выбора аппарата нечетких множеств в задаче распределения элементов в модули // Там же. — С. 1481—1483.
63. *Хранилов В. П.* Нечеткая модель в задаче автоматизированного размещения элементов по критерию устойчивости к множеству дестабилизирующих факторов // Там же. — С. 1484—1487.
64. *Мельников О. Н., Мельников С. П.* Винеровский процесс как эволюция диссипативной структуры // Там же. — С. 1494—1499.
65. *Клепарский В. Г., Мельников О. Н.* Символическая динамика нейроподобной структуры с учетом персистентности // Тр. междунар. конф. “Идентификация систем и задачи управления” SICPRO’03. Москва, 29—31 янв. 2003 г. — М., ИПУ РАН, 2003. — С. 1500—1506.
66. *Ивашкин Ю. А.* Структурно-параметрическое моделирование информационного пространства и агентные технологии накопления знаний // Там же. — С. 763—768.
67. *Полетыкин А. Г., Байбулатов А. А.* Основы языка ABIS // Там же. — С. 872—886.
68. *Артамонов Е. И.* Особенности синтеза архитектуры и классификация интерактивных систем // Там же. — С. 1664—1686.
69. *Масолкин С. И., Промыслов В. Г., Менгазетдинов Н. Э.* Диагностика программно-технических средств с использованием интеллектуальных агентов // Там же. — С. 769—773.
70. *Байбулатов А. А., Семенов К. В., Масолкин С. И., Промылова О. А.* Разведочный анализ качества сложного программного обеспечения // Там же. — С. 774—789.
71. *Жарко Е. Ф.* Проблемы управления качеством программного обеспечения // Там же. — С. 887—923.
72. *Антонов А. В., Степанянц А. С.* Методы анализа надежности (безошибочности) программного обеспечения программно-технических средств // Там же. — С. 924—942.
73. *Золоторевич Л. А.* Разработка логико-динамических моделей МОП БИС // Там же. — С. 1704—1715.
74. *Финько О. А.* Параллельные логические вычисления, использующие избыточные представления чисел // Там же. — С. 1716—1728.
75. *Степанченко И. В.* Моделирование дискретных процессов управления динамическими объектами с учетом техниче-



- ских характеристик вычислительной системы // Там же. — С. 1729—1755.
76. *Матросова А. Ю., Андреева В. В., Останин С. А., Седов Ю. В.* Автоматизированный синтез самопроверяемых синхронных последовательностных схем (синхронных автоматов) // Тр. междунар. конф. "Идентификация систем и задачи управления" SICPRO'03. Москва, 29—31 янв. 2003 г. — М., ИПУ РАН, 2003. — С. 1756—1767.
  77. *Красноперова М. А.* О принципах компьютерного моделирования семантики ритмического текста // Там же. — С. 1768—1780.
  78. *Красноперова М. А., Казарцев Е. В.* О принципах хранения языковой информации и математических моделях ритмики текста // Там же. — С. 1781—1783.
  79. *Агаронян О. С.* Моделирование и сегментация иерархических изображений на основе нерегулярных случайных замощений // Там же. — С. 1696—1703.
  80. *Лебедев В. С.* О применении когнитивной компьютерной графики в интеллектуальных системах // Там же. — С. 1687—1695.
  81. *Трахтенгерц Э. А.* Компьютерная поддержка согласования управленческих решений // Там же. — С. 360—422.
  82. *Комарцова Л. Г.* Нейросетевое моделирование в системах поддержки принятия решений // Там же. — С. 423—434.
  83. *Яценко Н. Ю., Будкина Е. М.* Нейросетевая система поддержки принятия решений по управлению сложной технической системой // Там же. — С. 435—446.
  84. *Кандалов М. С., Трахтенгерц Э. А., Юрченко В. Е.* Компьютерная поддержка принятия решений на примере оперативного управления горным производством // Там же. — С. 447—460.
  85. *Кандалов М. С.* Организация данных и алгоритмическое обеспечение поддержки принятия решений на примере управления горным производством // Там же. — С. 461—467.
  86. *Макаренко А. С.* Модели общественных явлений с учетом прогнозирования и сценарные подходы в принятии решений // Там же. — С. 468—497.
  87. *Starkermann R.* Be my brother, share the bread; and if not, i crack your head! // Тр. междунар. конф. "Идентификация систем и задачи управления" SICPRO'03. Москва, 29—31 янв. 2003 г. — М., ИПУ РАН, 2003. — С. 944—961.
  88. *Lenci S., Delli Gatti D., Gallegat M.* A new method for controlling chaos with an application to a model of financially driven business fluctuations // Там же. — С. 962—979.
  89. *Srarkov K., Benitez S.* Synchronization of coupled nonlinear systems with complex dynamics based on the nonlinear observer // Там же. — С. 990—1003.
  90. *Ataei M., Khaki-Sedigh A., Lohmann B., Lucas C.* Determining embedding dimension from output time series of dynamical systems — scalar and multiple output cases // Там же. — С. 1004—1013.
  91. *Conforto P., Delli Priscoli F.* A game theoretic model for Internet QoS routing in differentiated-services architectures // Там же. — С. 1014—1027.
  92. *Ferreira A., Lamas R.C.P.* An RBF neural network NARX model to identify nonlinear systems in closed loop // Там же. — С. 1028—1036.
  93. *McQuade E., Rurua A.* Process control algorithm design // Там же. — С. 1037—1045.
  94. *Ядыкин И. Б.* Анализ адаптируемости нелинейных систем управления при использовании многочастотных пробных сигналов // Там же. — С. 2462—2469.
  95. *Солдатов В. В., Шаховской А. В., Жиров М. В., Маклаков В. В., Чадеев В. М.* Адаптивное управление в замкнутом контуре с использованием активной идентификации // Там же. — С. 2485—2498.
  96. *Анисимова Н. Г., Круг Е. К.* Модели оценки робастности алгоритма управления по отношению к неопределенности параметров объекта // Там же. — С. 2525—2530.
  97. *Солдатов В. В., Шаховской А. В., Жиров М. В., Макаров В. В.* Синтез робастных цифровых систем с использованием многопараметрических алгоритмов управления // Там же. — С. 2499—2511.
  98. *Александров А. Г., Орлов Ю. Ф., Михайлова Л. С.* Программное обеспечение конечно-частотной идентификации и адаптивного управления многомерными объектами // Тр. междунар. конф. "Идентификация систем и задачи управления" SICPRO'03. Москва, 29—31 янв. 2003 г. — М., ИПУ РАН, 2003. — С. 2531—2555.
  99. *Александров А. Г., Орлов Ю. Ф.* Пакет программ АДАПЛАБ: Новые возможности для моделирования процессов адаптации // Там же. — С. 2556—2569.
  100. *Михайлова Л. С., Баукова Н. Г.* Директивы частотной идентификации в системе ГАММА-2РС // Там же. — С. 2570—2576.
  101. *Tollet I., Lahti S., Gavrilov A.* A case study of the distillation column with emphasis upon modelling and H2/Hinf control // Там же. — С. 512—514.
  102. *Mucoz A., Loccufier M., Noldus E.* Stabilizing PD-control of a nonlinear system in process engineering // Там же. — С. 499—511.
  103. *Zahedi G. R.* Error trajectory and PI control of gas-phase polyethylene reactor // Там же. — С. 515—520.
  104. *Jahannmiri A., Rasooli H.* On-line state estimation and parameter of the acetone-butanol and ethanol fermentation with cell retention // Там же. — С. 521—528.
  105. *Rafiqzadeh M., Abbaszadeh M.* A nonlinear model based predictive control of solution polymerization of methyl methacrylate in a batch reactor // Там же. — С. 529—538.
  106. *Garcia C., Costa H.R.N.* Neuro-fuzzy identification of a pH neutralization process // Там же. — С. 539—546.
  107. *Chaudhuri R.* Dynamic simulation of performance of an indian petroleum company // Тр. Междунар. конф. «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO'03. Москва, 29—31 января 2003. — М.: ИПУ РАН, 2003. — С. 547—570.
  108. *Bogdanovic S.S.* Computer aided design of output regulator // Там же. — С. 1321—1330.
  109. *Yastrebov A.I., Gad S., Slon G., Laskawski M.* Computer analysis of electrical vehicle equipment diagnosing with artificial neural networks // Тр. междунар. конф. "Идентификация систем и задачи управления" SICPRO'03. Москва, 29—31 янв. 2003 г. — М., ИПУ РАН, 2003. — С. 1331—1348.
  110. *Гжизвачевский М.С., Филатова Д. В.* Оптимизация модели зажигания, описанной нелинейными жесткими уравнениями // Там же. — С. 1349—1360.
  111. *Zhang F. Y., Zhu S. Z., Zheng J. H.* Identification parameters of synchronous generator // Там же. — С. 1361—1369.
  112. *Imal E., Ali-Zada P., Mamedov H., Ozgur G., Ali-Zada C.* The experience of a mechatronic electrodynamic modeling system application for oil industry main electric drives design // Там же. — С. 1370—1376.
  113. *Hajiyev Ch. M., Caliskan F.* RKF based sensor/actuator fault diagnosis // Там же. — С. 1377—1387.
  114. *Hyre M.R.* Process simulations for control of glass container forming // Там же. — С. 1388—1400.
  115. *Киселева Т. В., Квятош М. Э.* Многовариантная идентификация на примере построения зависимостей служебных свойств проката от химического состава стали // Там же. — С. 2389—2398.
  116. *Генкин А. Л., Куделин А. Р., Масальский Я. С.* Моделирование энергосберегающего управления листопркатным комплексом // Там же. — С. 2399—2408.
  117. *Жиров М. В., Макаров В. В.* Адаптивная система управления нестационарными технологическими процессами с идентификатором и ЛПР во внешнем контуре // Там же. — С. 1850—1879.
  118. *Пишихов В. Х., Корнеев И. Г.* Система с переменной структурой для управления движением манипуляционных роботов // Там же. — С. 1785—1796.
  119. *Пишихов В. Х.* Оптимальное по быстродействию, траекторное управление лагранжевыми системами // Там же. — С. 1797—1808.
  120. *Чернухин Ю. В., Писаренко С. Н.* Экстраполирующие структуры нейросетевого типа в системах управления интеллектуальных мобильных роботов // Там же. — С. 1809—1820.
  121. *Труды Международной конференции "Идентификация систем и задачи управления" SICPRO'2000.* Москва, 26 - 28 сент. 2000 г. [Электронный ресурс]. — М.: ИПУ РАН, 2000. — 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). — ISBN 5-201-09605-0. □

# МЕХАНИЗМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ СТАРЕНИЯ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬЮ ЖИЗНИ

(тематическая подборка)

## ВСТУПЛЕНИЕ

В настоящее время во всех развитых странах мира происходят одни и те же демографические процессы — продолжительность жизни увеличивается, число пожилых людей возрастает, а число рождающихся детей падает. Эти тенденции вызывают обоснованное беспокойство, поскольку в связи с увеличением доли пожилых лиц в различных странах возникает опасность чрезмерного увеличения социальной нагрузки на молодую и работоспособную часть населения. Кроме того, из-за старения населения возрастает заболеваемость и инвалидизация.

Прежде чем знакомиться с содержанием статей в настоящей подборке, посмотрим на проблему целиком. Действительно, начиная с 1840-х гг. продолжительность жизни в развитых странах мира увеличивалась по линейному закону со средней скоростью 2,5 года за десятилетие (рис. 1). В настоящее время нет видимых причин, по

которым этот рост мог бы прекратиться [1]. То, что страны, ранее не входившие в число лидеров, со временем вырываются вперед, означает, что продолжительность жизни в них во время “рывка” увеличивается значительно быстрее, чем у лидера [2].

В последние годы все чаще разгораются дискуссии о том, ограничены ли вообще пределы жизни. В связи с тем, что данные по старению человека довольно ограничены, в этих дискуссиях большую роль играют результаты, полученные на животных [2]. Так, американский энтомолог и биодемограф Дж. Кэри, проведя опыты с популяцией средиземноморских плодовых мушек *Medfly* объемом в миллион особей, обнаружил удивительный факт. Оказалось, что при средней продолжительности жизни мушек около 50 дней естественная гетерогенность популяции приводит к тому, что самая долгоживущая мушка прожила более 200 дней [3]. Мало того, было обнаружено, что смертность (т. е. вероятность умереть в течение ближайшего отрезка времени) у всех живых существ с увеличением возраста выше некоторого предела сначала начинает замедляться, а затем даже падать [4]. Хотя эти данные пока плохо распространяются на человека по причине недостаточного объема имеющейся выборки, имеются веские основания для того, чтобы в этом не сомневаться. Как эти, так и другие подобные результаты привели Дж. Кэри к мысли об отсутствии естественного предела продолжительности жизни в природе [5].

С другой стороны, американский биодемограф С. Ольшански активно защищает противоположную точку зрения. По его мнению, в настоящее время продолжительность жизни у человека практически достигла своего предела [6]. В 2004 г. журнал “*Journal of Gerontology*” провел дискуссию, посвященную вопросам старения и продолжительности жизни, в которой приняли участие ведущие специалисты из разных стран мира. В этой дискуссии известный американский биолог Леонард Хейфлик утверждает, что никакие вмешательства не могут замедлить, остановить или обратить процесс старения у человека [7]. Что касается увеличения продолжительности жизни, говорит он, то она происходит исключительно из-за сокращения смертности от различных болезней — как детских, так и старческих. Механизм старения — общий для всех живущих на Земле существ — остается пока незатронутым и вообще не ясно, можно ли на него каким-либо образом воздействовать.

Мы придерживаемся той же точки зрения — если человек на протяжении всей своей жизни не болеет и не

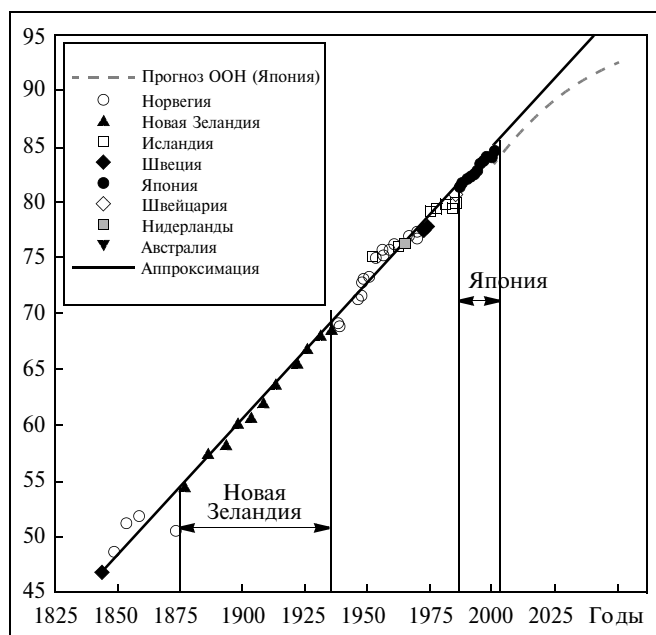


Рис. 1. Изменение средней продолжительности жизни женщин в странах-лидерах ([1], с изменениями):

за 160 лет продолжительность жизни увеличилась на 40 лет, причем постоянно происходила смена страны-лидера; с 1875 и до Второй мировой войны лидировала Новая Зеландия, а в последнее время вперед вырвалась Япония





попадает ни в какую ситуацию, связанную с риском преждевременной смерти, то максимальная продолжительность жизни может составить около 140 лет [8]. Эта оценка, похоже, сохранится на данном этапе развития человечества.

Другой демографической проблемой (по своим последствиям тесно связанной с увеличением продолжительности жизни) является сокращение деторождения. Как в Европе, так и в США, Японии и Канаде число детей, рождаемых в среднем каждой женщиной на протяжении ее жизни, в настоящее время составляет примерно 1,4. В то же время известно, что для сохранения постоянства уровня населения (без учета миграции) необходимо, чтобы каждая женщина рожала чуть больше двух детей. Поэтому в ближайшие десятилетия ожидается резкое изменение структуры населения крупнейших регионов (и прежде всего, Европы). Континенты Африка и Азия уйдут далеко вперед, обогнав нынешние ведущие центры цивилизации, не говоря уже о России. Иммиграция в любых мыслимых пределах не в силах предотвратить эту тенденцию. Сегодня демографы боятся последствий этого переворота и рискуют прогнозировать последствия лишь при условии, что деторождение в Европе в ближайшее время (практически немедленно) возрастет до 1,5—1,8 [9]. Даже при таких оптимистических предположениях население пятнадцати ведущих стран Европы к 2050 г. уменьшится с нынешних 375 до 300 млн. чел. Через 30 лет доля пожилых людей возрастет с 25 до 42%, да и то в лучшем случае [10]. Однако существующие в Европе представления об идеальном размере семьи никак не учитывают этих угроз [11].

Разумеется, все представленные выше данные носят в основном описательный характер. Более глубокие процессы, связанные с причинами этих явлений и с возможными способами воздействия на них, до сих пор находятся в зачаточном состоянии. Хотя в последнее время общественный интерес к проблемам демографии и к наукам, посвященным анализу процессов старения (геронтологии и биогеронтологии) и медицине для пожилых людей (гериатрии) резко возрос, механизмы управления этими процессами (как естественные, так и искусственные, “техногенные”) до сих пор остаются непознанными. В настоящее время специалисты различных дисциплин во всем мире стараются понять, как связаны причины этих изменений с физиологическими и генетическими факторами. Расшифровка генома человека и дрозофилы показала удивительную их близость — около 80% генов оказались общими. Это обстоятельство подтверждает важность экспериментов на животных и возможность использования получаемых данных для человека [12]. По крайней мере, число публикаций, в которых анализируются проблемы человеческих болезней на материале мушиных популяций, с начала XXI в. резко увеличилось (рис. 2).

Проблемы старения и долгожительства перестают быть достоянием только демографов, биогеронтологов и гериатров. Они становятся предметом анализа все более широкого круга наук, и в частности, теории управления.

Существует ли связь между процессами увеличения продолжительности жизни и сокращения деторождения? В биодемографической литературе эта проблема анализируется с точки зрения распределения ресурсов организма между двумя процессами: поддержания организма и производства потомства, которые рассматрива-

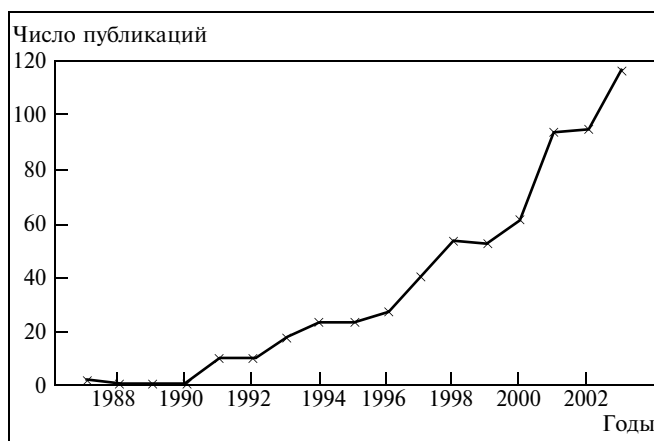


Рис. 2. Рост числа ежегодных публикаций в ведущих журналах мира, посвященных исследованию старения и развития заболеваний у человека на основе популяций плодовой мушки

ются в качестве конкурентов. Каковы естественные механизмы, управляющие процессом “переброса” и использования энергии, освобождающейся у организмов, которые не рожают потомков? Приводит ли само по себе сокращение рождаемости к увеличению продолжительности жизни? Для животных этот факт многократно доказан экспериментально, но для человека пока имеются лишь отдельные публикации, подтверждающие его [13]. До сих пор не ясен вопрос о том, одинаковы ли механизмы, приводящие к увеличению продолжительности жизни у человека и у экспериментальных животных, которые находятся в “идеальных” условиях жизни.

В настоящей подборке в основном представлены работы, выполненные российскими учеными в сотрудничестве с Институтом демографических исследований Общества Макса Планка (г. Росток, Германия), где много лет лабораторией современных статистических методов руководил А.И. Яшин. В настоящей подборке проблемы, связанные со старением и продолжительностью жизни у организмов, принадлежащих к различным биологическим видам, анализируются методами математического моделирования. Математическое моделирование представляет собой все более широко распространяющийся способ анализа сложных систем различной природы [8]. Такой анализ позволяет взглянуть на проблемы современной демографии и геронтологии глазами специалиста по теории управления.

Одной из причин публикации является желание привлечь к обсуждаемым проблемам внимание более широкого круга российских ученых и специалистов. Обсуждение этих проблем мы планируем продолжить в одном из выпусков журнала в 2005 г.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Oeppen J., Vaupel J.W.* Demography. Broken limits to life expectancy // *Science*. 2002. — Vol. 296: — P. 1029—1031.
2. *Arking R., Novoseltsev V., Novoseltseva J.* The human life span is not that limited: the effect of multiple longevity phenotypes // *Journ. Geront. Biol.* — 2004. — Ser. 59a: — P. 697—704.

3. *Carey J. R.* How mediterranean fruit flies resist aging, live long and remain fertile. In: *Paradoxes of longevity* / Robine J.-M., Forette B., Franceschi C. and Allard M., Eds. — N.-Y., 1999. — P. 23–34.
4. *Vaupel J. W., Carey J. R., Christensen K.*, et. al. *Biodemographic Trajectories of Longevity* // *Science*. — 1998. — Vol. 280. — P. 855–860.
5. *Carey J. R.* *Insect biodemography* // *Ann. Rev. Entomol.* — 2001. — Vol. 46. — P. 79–110.
6. *Carnes B.A., Olshansky S.J., Grahn D.* Biological evidence for limits to the duration of life // *Biogerontology*. — 2003. — Vol. 4. — P. 31–45.
7. *Hayflick L.* “Anti-aging” is an oxymoron // *Journ. Geront. Biol.* — 2004. — Ser. 59a. — P. 573–578.
8. *Новосельцев В. Н.* Математическое моделирование организма // *Наука в России*. — 2003. — № 1. С. 52–58.
9. *Lutz W., O'Neill B.C., Scherbov S.* Europe's population at a turning point // *Science*. — 2003. — Vol. 299. — P. 1991–1992.
10. *Goldstein J., Lutz W., Testa M.R.* The emergence of sub-replacement family size ideals in Europe // *Pop. Res. Policy Review*. — 2003. — Vol. 22. — P. 479–496.
11. *Goldstein J., Lutz W., Scherbov S.* Long-term population decline in Europe: the relative importance of tempo effects and generation length // *Pop. Dev. Review*. — 2003. — Vol. 29. — P. 699–707.
12. *O'Kane C. J.* Modelling human diseases in *Drosophila* and *Caenorhabditis* // *Seminars in Cell & Dev. Biol.* — 2003. — Vol. 14. — P. 3–10.
13. *Gavrilova N. S., Gavrilov L. A., Semyonova V. G., Evdokushkina G. N.* Does exceptional human longevity come with a high cost of infertility? // *Ann. N. Y. Acad. Sci.* — 2004. — Vol. 1019. — P. 513–517.

*В. Н. Новосельцев*

☎ (095) 334-88-91

E-mail: [Novoselc@ipu.rssi.ru](mailto:Novoselc@ipu.rssi.ru)



УДК 577.71:519.95

## НОВЫЕ ИДЕИ, МЕТОДЫ И ПРОБЛЕМЫ В МОДЕЛИРОВАНИИ ДЕМОГРАФИЧЕСКИХ И ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЯВЛЕНИЙ СТАРЕНИЯ

А.И. Яшин, С.В. Украинцева

Университет Дьюка, г. Дюрам, США

Отмечено, что традиционные демографические методы анализа заболеваемости, смертности и других характеристик человеческих и других популяций в целях упрощения расчетов не принимают во внимание два важных свойства, определяющих связь любой популяции с внешней средой. Первое связано с различиями в шансах заболеть и умереть среди индивидуумов, составляющих популяцию, второе — с наличием зависимости между жизненно важными биологическими характеристиками (такими, как продолжительность жизни, возраст начала заболевания и т. п.) у генетических родственников и индивидуумов, имеющих общие культурные и другие жизненные стандарты. Рассмотрены подходы к моделированию старения и выживания с учетом указанных свойств в динамике популяций; а также сформулирован ряд нерешенных проблем в области моделирования и управления при наличии неполной информации. Обсуждены перспективные биологические гипотезы, которые могут быть исследованы с помощью новых моделей.

### ВВЕДЕНИЕ

Каждая реальная популяция обладает определенной структурой и особенностями, которые часто имеют латентный характер и описываются скрытыми переменными и параметрами. Изучение таких структур и особенностей улучшает возможности предвидения реакций наблюдаемых популяционных характеристик (таких, как заболеваемость, инвалидность и смертность) на изменения внешних факторов. Одной из ненаблюдаемых

характеристик является индивидуальная предрасположенность к заболеваниям и гибели (уязвимость). Индивидуальные различия в уязвимости характеризуют неоднородность популяции и подчиняются определенным закономерностям, которые могут быть описаны вероятностными функциями распределения с неизвестными параметрами. Еще один необходимый элемент описания касается функции риска: она должна зависеть от уровня уязвимости (ненаблюдаемой) и наблюдаемых переменных. Возраст индивидуума может быть одной из



таких переменных. Индивидуальные риски могут быть зависимыми. Так, родственные связи могут определять наследственную предрасположенность к заболеваниям у близких родственников. Общие традиции, культурные и другие особенности, разделяемые членами этнических, социальных или профессиональных групп, также порождают зависимость между соответствующими рисками у индивидуумов, принадлежащих группе. В настоящей работе мы рассмотрим способы учета скрытой неоднородности и зависимости между соответствующими рисками в моделях популяционных характеристик, а также обсудим ряд эффектов, к которым приводит этот учет.

## 1. УЧЕТ СКРЫТОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ

Для учета скрытых различий в шансах гибели применяются модели неоднородности уязвимости. Различают модели с постоянной [1, 2] и переменной [3] уязвимостью. Интересные примеры применения моделей дискретной неоднородности для анализа генетических данных об индивидуумах, чей возраст перевалил за сто лет, рассмотрены в работах [4, 5].

### 1.1. Модели постоянной уязвимости

Суть моделей с постоянной уязвимостью сводится к введению случайной неотрицательной величины  $Z$ , называемой уязвимостью, подчиняющейся определенному закону распределения (например, гамма- или логнормальному), и выбору параметрического представления для “базового” риска  $\mu_0(x)$  как функции возраста  $x$ . Риск  $\mu(x, Z)$  для отдельного индивидуума, характеризующегося уязвимостью  $Z$ , представляется произведением:

$$\mu(x, Z) = Z\mu_0(x). \quad (1)$$

Фундаментальным для проведения статистических расчетов является соотношение между маргинальным  $\bar{\mu}(x)$  и условным  $\mu(x, Z)$  рисками

$$\bar{\mu}(x) = E(\mu(x, Z)|T > x) = \mu_0(x)T(Z|T > x). \quad (2)$$

Наличие скрытой неоднородности приводит к смещению регрессионных оценок Кокса от их истинных значений [6]. Отметим также, что модели постоянной уязвимости являются неидентифицируемыми: для любой (наблюдаемой) функции смертности  $\bar{\mu}(x)$  всегда найдется бесчисленное множество функций  $\mu_0(x)$  и функций распределения уязвимости, удовлетворяющих соотношению (2). Трудности этого подхода связаны с обоснованием представления (1) выбором параметрического описания  $\mu_0(x)$  и распределения уязвимости, а также фактом, что многие факторы уязвимости не являются постоянными, а меняются с возрастом и поколениями индивидуумов. Замечательный результат теории зависимых рисков заключается в возможности избежать параметрического описания  $\mu_0(x)$  при анализе мультивариантных данных о смертности среди зависимых индивидуумов. Изменение характеристик неоднородности с возрастом удастся учесть в моделях переменной уязвимости, играющих важную роль при анализе данных продольных исследований процессов старения и развития хронических заболеваний.

### 1.2. Стохастические модели переменной уязвимости

В таких моделях предполагается, что факторы неоднородности (например, показатели, характеризующие физиологическое состояние организма)  $Y_x$ , влияющие на риск  $\mu(x, Y_x)$  гибели индивидуума, случайно меняются с возрастом. Аналог соотношения (2) имеет вид [3]:

$$\bar{\mu}(x) = E(\mu(x, Y_x)|T > x). \quad (3)$$

Соотношение (3) означает, что наблюдаемый риск (т. е. риск, подсчитанный по эмпирическим данным) является результатом условного усреднения индивидуальных рисков. Усреднение происходит среди тех, кто дожил до возраста  $x$ . Отметим, что средние значения и ковариационные матрицы значений физиологических или других показателей, измеренных у индивидуумов в когорте, также являются результатом условного усреднения. Это наблюдение оказывается важным для интерпретации результатов анализа. Оно свидетельствует о том, что средние возрастные траектории по когорте не являются “средними биологическими” траекториями. В них присутствует смещение, вызванное выбытием наиболее уязвимых индивидуумов из состава популяции, участвующей в усреднении. Для выделения “биологической” компоненты требуется более подробная математическая модель переменной уязвимости.

Предположим, что ненаблюдаемые (или частично наблюдаемые) значения физиологического индекса  $Y_t$  меняются с возрастом, подчиняясь стохастическому дифференциальному уравнению:

$$dY_t = a_1(f_1(t) - Y_t)dt + b(t)dW_t, Y_0,$$

где  $f_1(t)$  — функция, характеризующая динамику гомеостатических механизмов, связанных с физиологическими процессами  $Y_t$ ;  $W_t$  — винеровский процесс;  $a_1$  — коэффициент обратной связи;  $b(t)$  — коэффициент диффузии;  $Y_0$  — нормально распределенная случайная величина, а условный риск имеет вид:

$$\mu(t, Y_t) = \mu_0(t) + (Y_t - f(t))\mu_1(t),$$

здесь  $f(t)$  — детерминированная функция, описывающая “идеальное” изменение физиологического показателя  $Y_t$ . Эта функция является эталоном возрастных изменений в организме для процесса  $Y_t$ , при котором смертность достигает минимума. Для простоты мы рассмотрим одномерный случай. Обобщение на многомерную ситуацию не представляет труда. Заметим, что, вообще говоря, функции  $f_1(t)$  и  $f(t)$  необязательно близки. Хотя нормальное функционирование по определению ассоциируется с минимальным риском, возможностей гомеостатических механизмов может не хватать для достижения этого минимума. В этом случае полезным может оказаться соотношение, описывающее динамику адаптации функции  $f_1(t)$  к функции  $f(t)$ :

$$\frac{df_1(t)}{dt} = a_2(t)(f_1(t) - f(t)), \quad f_1(t) = f_{10}, \quad (4)$$

где  $a_2(t)$  — коэффициент, характеризующий скорость адаптации. Заметим, что он убывает с возрастом. Для функции дожития в этом случае имеем:

$$P(T > t) = \exp \left\{ - \int_0^t \mu_0(u) du - \int_0^t (m_u - f(u))^2 \mu_1(u) du - \int_0^t \mu_1(u) \gamma_u du \right\}.$$

Соответствующая функция смертности имеет вид:

$$\bar{\mu}(t) = \mu_0(t) + (m(t) - f(t))^2 \mu_1(t) + \mu_1(t) \gamma(t),$$

где

$$\frac{dm(t)}{dt} = a_1(f_1(t) - m(t)) - 2\gamma(t)\mu_1(t)(m(t) - f(t)), \quad (5)$$

$$\frac{d\gamma(t)}{dt} = -2a_1(t)\gamma(t) + b^2(t) - 2\gamma^2(t)\mu_1(t). \quad (6)$$

Два последних уравнения описывают динамику условного среднего и условной дисперсии процесса  $Y_t$ . Заметим, что уравнение гомеостатической адаптации (4) может быть записано в более общем виде, включающем диффузионную (шумовую) компоненту в правую часть. В этом случае уравнения (5) и (6) должны быть дополнены соотношениями для оценок функции  $f_1(t)$  и соответствующих элементов ковариационных матриц. В случае, когда значения процесса  $Y_t$ , скажем  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ , наблюдаются в моменты  $t_1, t_2, \dots, t_n$ , эти уравнения должны решаться на возрастных интервалах  $[t_0, t_1], \dots, [t_{n-1}, t_n], [t_n, t)$  с начальными условиями  $Y_0, Y_1, \dots, Y_n$ , соответственно [3]. Описанная модель оказывается чрезвычайно полезной при анализе данных продольных исследований.

## 2. УЧЕТ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ИНДИВИДУАМИ

Для изучения эффектов зависимости между продолжительностями жизни или другими интервалами (например, возрастами начала заболевания) у родственников необходимо сконструировать совместное распределение этих интервалов (например, двумерное, в случае близнецов), отражающее суть механизмов, порождающих соответствующие зависимости. Так, например, если зависимость между индивидуумами осуществляется через генетические и средовые факторы, определяющие предрасположенность к заболеваниям, то адекватными могут оказаться модели коррелированной уязвимости [7–10]. Существенными в этих моделях являются предположения о линейной зависимости функций риска зависимых индивидуумов от значения уязвимости (пропорциональный риск) и о совместном распределении этих величин (двух в случае близнецов) среди индивидуумов в популяции.

### 2.1. Модели коррелированной уязвимости

В этих моделях предполагается, что индивидуальные условные риски имеют вид:  $\mu_i(x, Z_i) = Z_i \mu_{0i}(x)$ , где, в случае двух индивидуумов,  $i = 1, 2$ , а уязвимости  $Z_1, Z_2$  являются зависимыми случайными величинами с коэф-

фициентом корреляции  $\rho$ . Заметим, что в случае положительной корреляции

$$S(x_1, x_2) = P(T_1 > x_1, T_2 > x_2) > P(T_1 > x_1)P(T_2 > x_2) = S(x_1)S(x_2),$$

а следовательно, и

$$P(T_1 > x_1 | T_2 > x_2) > P(T_1 > x_1).$$

Здесь  $S(x_1, x_2) = P(T_1 > x_1, T_2 > x_2)$  — бивариантная функция дожития для двух зависимых индивидуумов с продолжительностями жизни  $T_1$  и  $T_2$ ,  $S(x_i) = P(T_i > x_i)$ ,  $i = 1, 2$  — маргинальные функции дожития. Одно из достаточных общих представлений двумерной функции дожития в моделях коррелированной уязвимости получено в работе [11]:

$$S(x_1, x_2) = S(x_1)^{1-\rho} S(x_2)^{1-\rho} \times \exp \left\{ \frac{\rho(1-\alpha)}{\alpha\sigma^2} \left[ 1 - \left( \left( 1 - \frac{\alpha\sigma^2}{1-\alpha} \ln S(x_1) \right)^{\frac{1}{\alpha}} + \left( 1 - \frac{\alpha\sigma^2}{1-\alpha} \ln S(x_2) \right)^{\frac{1}{\alpha}} - 1 \right)^\alpha \right] \right\}, \quad (7)$$

где  $\sigma^2$  — дисперсия уязвимости, параметр  $\alpha$  характеризует дополнительные свойства распределения. Остальные обозначения введены ранее. Ряд известных распределений являются частными случаями представления (7). Так, широко применяемая модель гамма-распределенной коррелированной уязвимости соответствует случаю  $\alpha = 0$  [7]. Обратное гауссовское распределение получается при  $\alpha = 0,5$ . Версии этой модели были использованы при изучении генетического влияния на продолжительность жизни, продолжительность активного периода жизни или момент начала хронического заболевания [12]. Зависимость между продолжительностями жизни у индивидуумов может также оказаться существенной при расчете стратегий страхования жизни или здоровья. Поясним сказанное на примере.

### 2.2. Стратегии страховой компании

Предположим, что некая страховая компания продает пожизненную ренту индивидуумам из некоторой популяции. Пожизненная рента — это контракт, по которому покупающий (клиент) (обычно человек предпенсионного возраста  $x$ ) одномоментно выплачивает компании сумму денег  $P(x)$ , а компания за это обязуется в течение всей оставшейся жизни клиента ежегодно выплачивать ему сумму денег  $c$ . Ясно, что сделка будет выгодна для компании при условии

$$P(x) > cE(T - x | T > x), \quad (8)$$

т. е. если цена ренты в момент сделки превышает среднюю выплату клиенту возраста  $x$  в течение его оставшейся жизни. (Правильная запись соотношения (8) должна содержать дисконтирование, т. е. учитывать обесценивание денег со временем. Мы не вводим этой зависимости, чтобы не усложнять пример, поскольку для пояснения сути эффекта зависимости между рисками на стратегию страховой компании это несущественно.) Для расчета математического ожидания в правой части неравенства (8) обычно достаточно воспользоваться таблицами дожития, которые изначально и были придуманы для этих целей. Такая стратегия полностью оправдана, если популяция клиентов является репрезентативной вы-



боркой из всей популяции, по которой строились таблицы дожития.

Часто решение клиента застраховать свою жизнь и здоровье в конкретной компании определяется семейными традициями, например, он или она выбирают компанию, услугами которой пользовались их долго живущие родители или другие родственники. Клиенты, родители которых жили недолго, могли не успеть получить соответствующий совет от родителей или родители вообще не успели воспользоваться услугами компании. Предположим для простоты, что клиенты компании представляют собой группы таких родственников, и информация о родственных связях известна компании. Поскольку продолжительности жизни родственников зависимы, расчет ожидаемой продолжительности оставшейся жизни для вновь прибывшего клиента может быть сделан с учетом информации о продолжительности жизни его родственников. Так, если известно, что один из родителей (с продолжительностью жизни  $T_2$ ) пережил возраст  $y$ , то соотношение (8) приобретает вид:

$$P(x, y) > cE(T_1 - x | T_1 > x, T_2 > y) > cE(T_1 - x | T_1 > x).$$

Здесь  $T_1$  — продолжительность жизни клиента, а  $P(x, y)$  — предполагаемая цена ренты. Даже в случае  $y = x$ , т. е. если клиент прибегает к услугам компании в том же возрасте, что и его родитель,

$$P(x, x) > cE(T_1 - x | T_1 > x, T_2 > x) > cE(T_1 - x | T_1 > x).$$

Следовательно, при таком наборе клиентов компания может разориться, если она не увеличит значения цен на ренту или не уменьшит размер последующих выплат. Заметим, что процедуры расчета цен и выплат — внутреннее дело каждой компании. Клиент принимает решение о покупке ренты на основании выставленных цен. Важный вывод из этого примера для страховых компаний заключается в необходимости изучения популяции своих клиентов, не полагаясь на официальные демографические данные. Для клиента, как показывает этот пример, важно понимание, что слишком низкая цена контракта при наличии родственных связей у клиентов грозит компании банкротством, а, следовательно, и потерей последующих выплат клиентам.

### 3. НЕРЕШЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ГИПОТЕЗЫ В ОБЛАСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТАРЕНИЯ, ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ И СМЕРТНОСТИ

Изложенные подходы к математическому моделированию популяционных характеристик являются лишь примерами направлений исследования, в которых моделирование может сыграть существенную роль. Ясно, что возможности моделирования процессов старения и развития заболеваний не ограничиваются указанными случаями. Наиболее перспективным представляется применение математических моделей для исследования механизмов старения и развития заболеваний, изучения факторов и связей, определяющих общественное здоровье и тенденции его изменения.

Опыт работы в области моделирования процессов в биологии, медицине, демографии, здравоохранении и других областях показывает, что один из наиболее трудных этапов в построении моделей заключается в формулировке проблем, имеющих биологическую, медицин-

скую, эпидемиологическую или иную прикладную значимость, допускающих описание и исследование средствами моделирования. Для преодоления этого этапа стимулируются междисциплинарные исследования и проекты, проводятся научные совещания и тематические конференции с участием представителей разных областей исследований. Указанные меры вносят существенный вклад в создание математической и вычислительной платформы для объединения биологических, медицинских и других знаний. Однако в области, занимающейся изучением закономерностей старения организма возможности междисциплинарных исследований оказываются ещё далеко не исчерпанными. Наиболее продуктивным остается подход, обеспечивающий доступ к данным и результатам исследований процессов старения, полученным в исследовательских группах, изучающих разные биологические объекты, возможность регулярных контактов с экспертами в соответствующих областях и желание разобраться в ситуации. Даже при наличии встречных интересов для реализации перечисленных возможностей требуется значительное время совместной работы представителей разных научных дисциплин. Поскольку опыт такой работы у нас имеется, мы решили не ограничиться обсуждением двух подходов к обработке данных в области старения и выживания, но и привести описание ряда ситуаций и проблем в демографии и биологии старения, а также результатов экспериментальных исследований, в которых создание и развитие новых математических и компьютерных моделей может существенно продвинуть понимание существа вопроса.

#### 3.1. Механизмы старения интересны, но не совсем понятны

Принципиальная особенность рассматриваемых систем и процессов заключается в том, что их исследование требует междисциплинарных усилий. Ограниченная возможность систематизировать и адекватно использовать накопленные данные и знания о механизмах старения и развития заболеваний, полученные в разных областях исследований, является одним из наиболее серьезных препятствий на пути осмысления и систематизации результатов и выработки понимания соответствующих механизмов. Неожиданные демографические тренды, необъяснимые эпидемиологические явления, загадочные, парадоксальные результаты экспериментальных исследований неизбежны в таких ситуациях. Приведенные далее примеры иллюстрируют сложившуюся ситуацию.

**Популяционные тренды продолжают удивлять демографов.** Несмотря на тот факт, что тренды состояния здоровья и долголетия человеческой популяции были объектами многочисленных исследований в течение прошлого столетия, многие современные демографические тенденции продолжают удивлять демографов. Ожидаемая продолжительность жизни продолжает увеличиваться [13], несмотря на пессимистические прогнозы ряда специалистов [14]. Процесс “ректангуляризации” функции дожития (тренд, в снижении смертности типичный для первой половины прошлого столетия), неожиданно сменился на параллельный сдвиг всей кривой дожития вправо [15], породив беспрецедентный рост пропорции столетних в популяциях развитых стран [16]. Эти изменения не только не были предсказаны, но и оставались незамеченными в течение нескольких декад.

Неожиданным также оказался рост заболеваемости аллергическими и аутоиммунными болезнями населения развитых стран. Заболеваемость астмой увеличилась втрое в течение двух деkad [17, 18]. Этот рост замедлился только недавно [19]. Причины, порождающие подобные тренды, остаются пока неизвестными. Рост заболеваемости болезнью Альцгеймера напоминает эпидемию и остается необъясненным [20]. Несмотря на то, что начиная с 1990 г. в некоторых странах (США, Дания, Швеция) обозначилась тенденция к уменьшению риска заболеть онкологическими болезнями [21–23], в большинстве других стран этот риск продолжает увеличиваться. Это происходит на фоне повсеместного уменьшения риска рака, связанного с инфекционными причинами [23, 24] и общей тенденции в снижении риска заболеть рядом наиболее распространенных форм рака (рак легких и рак простаты у мужчин, рак матки у женщин и рак желудка у обоих полов). Для ряда других распространенных форм рака этот риск продолжает увеличиваться (рак кожи, рак груди у женщин) [25]. По непонятным пока причинам наблюдается быстрый рост риска заболеть раком крови и лимфатических узлов, раком почек и гипопифиза [21, 24, 26].

**Утверждения о свершившемся эпидемиологическом переходе могут оказаться преждевременными.** Возврат многих “побежденных” инфекционных заболеваний и появление новых подвергают сомнению простой однонаправленный эпидемиологический переход от эры инфекционных патологий к эпохе дегенеративных хронических заболеваний и “болезней цивилизации” [27]. Недавний анализ показал, что более 175 человеческих патогенов (более 12% известных) появляются вновь, и что 37 новых болезней зарегистрировано с 1973 г. [28]. В настоящий момент человечество не располагает надежным инструментом для предсказания будущих изменений спектра человеческой заболеваемости, и оценки опасности, связанной с возможностью новых эпидемий, иницированных мутантными бактериями и вирусами, адаптированными к имеющемуся арсеналу антибиотиков и других лекарств. Стала осознаваться необходимость экспозиции организма к патогенам для стимуляции развития инфраструктуры системы иммунной защиты. Однако delicate динамические соотношения между частотой и уровнями антигенной нагрузки и адекватным развитием иммунной системы еще до конца не изучены. Влияние антигенной стимуляции на процессы старения иммунной системы и всего организма недостаточно изучено.

**Механизмы пластичности кривой смертности неясны.** Экспериментальные и демографические данные обнаруживают высокую пластичность характеристик смертности в популяциях лабораторных животных и человека (т. е. широкий диапазон ее изменений в зависимости от влияющих факторов). Способность характеристик индивидуального старения организма подвергаться изменениям под влиянием внешних факторов или генетических преобразований — одна из возможных причин. Ни диапазон, ни механизмы таких изменений не изучены. Модификация распределения факторов неоднородности в популяции также может внести существенный вклад в изменения кривых смертности. Однако многие факторы, определяющие индивидуальные различия в предрасположенности к заболеваниям, также как и их зависимость от других факторов, остаются неизвестными.

**Кривая смертности является неадекватной мерой индивидуального старения.** Многие исследователи, изучающие старение живых организмов, ассоциируют на-

клон логарифма кривой смертности со скоростью старения. В работе [29] показано, что такая интерпретация не всегда уместна. Она может приводить к парадоксальным выводам, например, о том, что увеличение средней продолжительности жизни, без соответствующего увеличения максимальной (случай ректангуляризации кривой дожития в популяции), соответствует увеличению скорости индивидуального старения. В действительности эта скорость может не меняться вообще при данных изменениях смертности [29].

Индивидуальное старение организма может пониматься как возрастное снижение его устойчивости к стрессовым воздействиям (см. далее о стрессоустойчивости), в то время как смертность характеризует шансы его гибели. Чтобы понять, как связаны между собой старение и смертность, нужно, в первую очередь, понять наиболее вероятные механизмы индивидуальной устойчивости к стрессовым воздействиям. В организме существует три главных эшелона защиты от стресса [30]:

(i) первый несет ответственность за восприимчивость организма к стрессу (т. е. обеспечивает робастность);

(ii) второй характеризует его способность быстро восстанавливать минимально необходимые функции (т. е. отвечает за скорость восстановления);

(iii) третий обеспечивает полноту и качество восстановления до исходного, дострессового, состояния путем ремонта поврежденных систем и молекул, а также компенсации их функций.

Наклон логарифма кривой смертности может меняться как в результате изменения характеристик стрессовых воздействий, так и в результате изменения каждой из различных стратегий защиты от стресса.

**Старение сопровождается снижением стрессоустойчивости.** Среди медиков и геронтологов растет понимание того, что наиболее важное, с точки зрения заболеваемости и смертности, универсальное проявление старения заключается в снижении сопротивляемости организма стрессовым воздействиям. Это снижение имеет три главных фенотипических проявления согласно трем, перечисленным ранее, стратегиям защиты от стресса в организме: (i) организм становится более уязвим к малым стрессам или менее робастным (например, повреждается от воздействий, ранее не оказывавших эффекта, таких как, например, изменение в питании); (ii) организм медленнее восстанавливается до первоначального состояния (нормы), в котором он находился до воздействия стресса; (iii) некоторые из воздействий, после которых молодой организм полностью восстанавливается, в старости не компенсируются даже по прошествии долгого времени и могут привести к возникновению хронической патологии или даже оказаться летальными. Количественный анализ механизмов старения может быть проведен методами математического моделирования [31–33].

**Аллостатическая нагрузка и развитие заболеваний.** Как сказано выше, эффекты постоянно действующих стрессовых факторов на живой организм зависят от его уязвимости к соответствующим воздействиям (робастности). При пониженной робастности или повышенной стрессовой нагрузке, действующей достаточно длительное время, такой стресс вызывает напряженную работу адаптивных механизмов, стремящихся обеспечить функционирование организма в новых условиях, ликвидировать отклонение показателей системы от их значений, наблюдаемых при отсутствии стресса. В результате накапливаются побочные эффекты такой хронической



адаптации, которые называют “аллостатической нагрузкой”. Накопление побочных эффектов может привести к развитию патологии. Снижение стрессоустойчивости организма в результате старения, при той же самой стрессовой нагрузке, рано или поздно приводит к перенапряжению адаптивных механизмов, накоплению побочных эффектов адаптации и возникновению хронических заболеваний. Таким образом, один из механизмов, связывающий старение и здоровье, связан с действием стрессовых факторов на организм. Количественные аспекты этой связи требуют дополнительного исследования с помощью соответствующих математических и компьютерных моделей.

**Роль стрессоустойчивости отдельных клеток в старении организма.** Реакция организма на стресс может сопровождаться изменениями среды, окружающей клетку в соответствующем органе или ткани, которые могут оказаться неблагоприятными для ее функционирования (например, ограничение питания, потребление кислорода) и восприниматься клеткой как стрессовое воздействие или нести сигнал о “неблагополучии” в окружающей клетку среде. Нехватка питания или кислорода может повредить клетку и даже дать сигнал к ее самоуничтожению (апоптозу). Уменьшение числа соматических клеток стимулирует деление и последующую дифференцировку стволовых клеток (при наличии таковых), с целью замещения утраченных. В результате в соответствующей ткани увеличивается пропорция молодых прекрасно функционирующих клеток. В этом случае стресс способствует обновлению органов и тканей. “Гормезис долголетия” может быть результатом такой реакции. В то же время гибель клеток от апоптоза в тканях, где функционирование стволовых клеток ослаблено (или они отсутствуют вовсе) приводит к снижению возможности ткани выполнять свои функции, а следовательно, к патологии органа или системы, а затем и к гибели организма. Отметим амбивалентную роль клеточного апоптоза в развитии хронических заболеваний. Так, при повышенном апоптозе можно ожидать снижения шансов заболеть онкологическими болезнями, но повышения шансов смерти от инсульта или инфаркта миокарда, а при пониженном, наоборот.

**Стратегия защиты от стресса может влиять на скорость старения.** Чтобы избежать разрушительных последствий воздействия стресса, организм может проявлять гибкость, комбинируя все три стратегии защиты. Одна из них связана с изменением робастности (уязвимости) организма. При высокой робастности только стрессовые воздействия достаточно большой амплитуды могут проникнуть в организм и произвести разрушения. Другая компонента связана с ликвидацией и компенсацией последствий стресса. Качество систем обезвреживания чужеродных агентов, проведения ремонта и временной компенсации дефектов в клетке играют здесь главную роль. Наконец, способность к *быстрому* восстановлению (т. е. скорости защитных реакций) может быть определяющей в долговременной способности организма выжить после воздействия стресса. В зависимости от природы стресса та или иная комбинация этих стратегий защиты оказывается наиболее предпочтительной.

В добавление к внешним стрессовым воздействиям, некоторые собственные молекулы организма постоянно производят внутренние стрессы, например, вследствие окислительных процессов. Они связаны с постоянным присутствием в организме свободных радикалов — побочных продуктов производства энергии, функциониру-

вания иммунной системы, а также химически активных молекул, играющих важную роль в сигнальной системе организма. Свободные радикалы способны повреждать белки, молекулы ДНК и другие важные биомолекулы организма. Наличие ремонтного потенциала, адекватного этим повреждениям, поддерживает всю систему в работающем состоянии. Недостаточная их компенсация и неполное устранение приводят к ускоренному старению организма. Ресурс, распределяемый на адаптивную компоненту защиты от внешнего стресса, может быть частично использован для устранения окислительных повреждений, а следовательно, для замедления процесса старения. Таким образом, внешний стресс способен как ускорять, так и замедлять старение. Все зависит от того, какая комбинация стратегий защиты, соответствующих природе конкретного стресса. Математическая модель распределения ресурсов, минимизирующая последствия стрессовых воздействий на организм выбором подходящей комбинации стратегий, позволила бы лучше понять роль стресса в старении и развитии хронических заболеваний.

### 3.2. Предупредить рак — ускорить старение?

Недавние исследования показали, что в регуляции старения и рака участвуют одни и те же гены [34]. Биохимические вещества (белки), производимые определенными генами (например, *p53*) предохраняют организм от развития раковой опухоли. Такая защита, однако, имеет побочные эффекты, приводящие к ускорению процессов старения организма и снижению потенциала долголетия. Попытки уменьшить производство таких белков в тканях организма подопытных животных (лабораторных мышей) часто приводят к увеличению заболеваемости и смертности от рака [34]. Однако максимальная продолжительность жизни тех, кому удалось избежать болезни, может существенно увеличиться. На популяционном уровне этот эффект проявляется в пересечении кривых смертности (дожития) экспериментальной и контрольной групп. Механизм этих парадоксальных эффектов до конца не изучен.

**Замедление старения может значительно увеличить продолжительность активной жизни.** Заметим, что механизмы, связывающие старение с возникновением и развитием хронических заболеваний человека, с количественной точки зрения еще совершенно не изучены. Даже гипотетические проработки этого вопроса с учетом имеющихся экспериментальных данных, полученных на лабораторных животных, могут внести существенный вклад в понимание происходящих здесь процессов.

Эксперименты с популяциями мутантов круглых червей *C. elegans* позволили более чем в пять раз увеличить среднюю продолжительность жизни этих животных [35–38]. Два недавних исследования зафиксировали среднюю продолжительность жизни мутантов, в шесть раз превышающую этот показатель у популяций аналогичных животных дико типа [39, 40]. Исследователи отмечали сохранение высокой активности и функционального статуса у представителей долгоживущей популяции до глубокой старости [40]. В отличие от червей в экспериментах [39], которые развивались медленно и были “худыми” вследствие ограничений калорийности в питании или аналогичных животных в экспериментах [35–38], животные в экспериментах [40] имели нормальную скорость роста, оставались в меру упитанными и были активными в течение почти всего периода жиз-

ни. Это важное наблюдение показывает, что увеличение продолжительности жизни может сопровождаться увеличением продолжительности активной жизни.

Экспериментальные исследования связи между процессами старения и развития онкологических заболеваний в популяции HER-2 мышей (генетически высоко подверженных раку молочной железы) позволили установить, что потребление умеренных доз эпиталамина (препарата шишковидной железы) увеличивает среднюю продолжительность жизни этих мышей [41, 42]. Оказалось, что возрастная кривая смертности от рака молочной железы сдвигается вправо вместе с ростом средней продолжительности жизни. Поскольку практически все животные этой линии заболевают раком молочной железы, данный результат предполагает более медленное прогрессирование опухоли в организме с замедленным старением. Данный факт открывает перспективы для разработки и исследования методов одновременной профилактики рака (а также других заболеваний) и старения.

**Гормезис и тренировка.** Небольшие дозы стресса приводят к небольшим повреждениям в организме. Однако они могут играть важную сигнальную роль. Эти сигналы могут активировать резервы организма в масштабах, превышающих возникшие повреждения и увеличить его устойчивость к последующим стрессам. В результате организм, с активированными таким образом механизмами защиты, оказывается способным сформировать более адекватный отклик на сильный стресс, чем организм без предварительной активации. Это приводит к эффекту гормезиса, характеризующегося относительным увеличением индивидуальной сопротивляемости большему стрессу в результате малого стимула. Яркий пример “поставленного на поток” гормезиса в человеческом обществе — вакцинации против опасных инфекций, когда малая доза антигена формирует защитную реакцию против опасного уровня экспозиции к тому же антигену в организме. Частые (но не чрезмерные) стрессовые воздействия могут стимулировать развитие “инфраструктуры”, обеспечивающей надежную защиту путем формирования более мощного отклика на стрессовый сигнал. Детали биологических механизмов, вовлеченных в указанные процессы, требуют дополнительного изучения.

**Эффекты тренировки в формировании адаптивного иммунитета.** Антигенные факторы, такие как бактерии и вирусы, индуцируют иммунный отклик, который, в свою очередь, стимулирует развитие “иммунологического пространства” (например, объема лимфоидной ткани в организме [43]). Этот объем определяет общее число лимфоцитов в организме. Из этих соображений регулярное стимулирование иммунной системы, особенно в ходе развития организма, может иметь последствия, благоприятные для функционирования иммунной системы в будущем. Аналогично, регулярная творческая деятельность сопровождается прохождением через нейроны интенсивных электрических сигналов, необходимых для записи мозгом новой информации. Этот процесс может стимулировать пролиферацию швановских клеток, улучшающих изоляционные свойства материала, покрывающего нейронные волокна, тем самым замедляя нейродегенерационные процессы в ходе старения организма. Определение количественной меры такой стимуляции требует разработки математической модели, описывающей динамические взаимодействия между соответствующими переменными.

**Подвергается ли тренировке система обезвреживания чужеродных агентов?** Проникновение в организм чужеродных химических агентов, включая лекарства и пищевые добавки, индуцирует в клетках стрессовый отклик системы детоксификации (обезвреживания), регулируемый семейством генов, принадлежащих семейству цитохромов P450. Удаление нежелательных химических веществ обычно происходит в два этапа. На первом химический агент (который сам по себе не обязательно токсичен) расщепляется до нескольких компонентов. На втором этапе эти компоненты реагируют со специальными детоксифицирующими ферментами, выделяемыми клетками организма, после чего результирующие продукты выделяются из системы. Некоторые промежуточные продукты, характерные для первой фазы, могут оказаться токсичными и повреждать окружающие биомолекулы, клетки, ткани и органы. Размер повреждений определяется концентрацией промежуточного продукта, степенью его агрессивности, а также скоростью, с которой он выводится из организма. Некоторые из таких продуктов могут быть канцерогенными и увеличивать риск возникновения рака. Другие могут влиять на скорость старения организма и развитие других хронических заболеваний.

Исследователи отмечают присутствие горметических эффектов малых доз токсических веществ [44]. Весьма вероятно, что молекулярно-биологический механизм детоксификации, также как и механизм иммунной защиты, может наращивать “инфраструктуру” систем обезвреживания под влиянием соответствующих стимулов, т. е. проявлять адаптивные свойства. Некоторые исследования указывают на наличие у людей генетических различий в чувствительности к химическим агентам, появляющимся в окружающей среде. Изучение указанных явлений поможет в расчетах государственных стандартов окружающей среды, регулирующих допустимые уровни ее загрязнения. Количественные аспекты описанных явлений требуют развития соответствующих математических и компьютерных моделей.

### 3.3. Хаос на службе здоровья

Закономерности функционирования живого организма отражаются в сложном динамическом поведении его физиологических индексов. Изменения многих переменных содержат гармоничные колебания — биологические ритмы. Эти колебания происходят в результате биохимических и биофизических процессов, лежащих в основе жизни многоклеточных организмов. Спектр таких колебаний отражает фундаментальные свойства биологической организации организма. Старение и изменения состояния здоровья сопровождаются изменениями этого спектра, которые могут быть полезны для диагностики заболеваний и преждевременного старения.

Кроме биологических ритмов, изменения многих физиологических переменных содержат хаотические компоненты, часто интерпретируемые в качестве побочных эффектов взаимодействия многих влияющих факторов, не содержащих полезной информации. Недавние исследования показали, что “хаотическая” составляющая может быть результатом функционирования фундаментальных нелинейных механизмов, регулирующих метаболические и информационные процессы в живом организме. Более того, характеристики таких процессов могут содержать информацию о состоянии организма. Медицинские воздействия, стиль жизни, внешние и





внутренние факторы могут влиять на состояние организма, меняя свойства этих нелинейностей. Этот факт открывает новые возможности для лучшего понимания этиологии многих хронических болезней, разработки и применения новых лекарственных препаратов и процедур лечения хронических патологий путем изменения нелинейных характеристик соответствующих механизмов. Изучение роли нелинейных зависимостей в процессах старения и развития хронических заболеваний требует разработки соответствующих математических и компьютерных моделей [45].

### 3.4. Будущее за междисциплинарным подходом к изучению старения

Индивидуальное здоровье людей ухудшается с возрастом. Этот факт частично отражен в росте повозрастных характеристик заболеваемости и смертности населения, которые являются результатом влияния тысяч внешних и внутренних факторов, меняющихся со временем и возрастом. Многие дисциплины, включая медицину, генетику, эпидемиологию, демографию, биостатистику и другие, изучают разнообразные аспекты биологических, физиологических, и популяционных механизмов, формирующих отклик организма на такие воздействия. Быстро накапливающиеся данные и знания в указанных областях уже превышают возможности человеческого мозга абсорбировать, систематизировать и использовать эту информацию. Междисциплинарные барьеры создают дополнительные трудности для сопоставления и аналитического синтеза результатов многочисленных исследований, возникновения новых идей, и теоретических концепций, способствующих формированию представлений о механизмах, порождающих реальные данные. Эти обстоятельства препятствуют полному использованию имеющейся информации о старении организма и его подсистем для создания новых лекарств, развития адекватных стратегий профилактики и лечения, а также разработки адекватных рекомендаций для режима питания и стиля жизни. В результате возможности человека предвидеть последствия индустриального развития, климатических и других изменений окружающей среды для общественного здоровья остаются недоиспользованными и увеличиваются медленнее, чем могли бы. Эти проблемы могут быть решены, если междисциплинарные исследования биологических и физиологических механизмов старения и развития заболеваний будут объединены на основе общей методологической платформы, основанной на развитии взаимосвязанных систем проблемно ориентированных математических и компьютерных моделей и статистических методов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поддержание высоких стандартов здоровья населения в меняющихся условиях внешней среды, также как и их дальнейшее улучшение требуют детальной информации о биологических и физиологических механизмах, регулирующих индивидуальное старение и развитие хронических патологий. Для получения этой информации продолжается сбор и анализ продольных и других данных о динамике индивидуальных изменений состояния здоровья, старении и факторах, оказывающих влияние на эти процессы. Чтобы прояснить детали механизмов старения и развития заболеваний, проводятся опы-

ты с лабораторными животными, физиологическими органами и тканями, клеточными культурами "in vitro" и "in vivo", изучаются свойства генов, механизмы их экспрессии и свойства производимых белков.

Важнейшие компоненты этого процесса — систематизация результатов исследований, установление зависимостей между физиологическими переменными и индикаторами здоровья, выяснение подробностей функционирования соответствующих биологических и физиологических механизмов — остаются в значительной степени прерогативой эпидемиологов-аналитиков и экспертов в области специфических патологий. Отметим, что знания, опыт и интуиция этих людей вносят существенный вклад в решение текущих проблем медицинской и здравоохранной практики. В то же время аналитические способности любых специалистов ограничены и не позволяют (без дополнительных инструментов), в полной мере реализовать потенциал имеющихся данных, накопленных знаний и теоретических концепций. Человеческая экспертиза позволяет получить в основном качественные, субъективные оценки. Для обоснования решений о вложении ресурсов в программы здравоохранения или исследовательские проекты, для разработки и оценки эффективности новых лекарств, процедур лечения и профилактических мер желательны количественные оценки реальных ситуаций, тенденций и соответствующих механизмов. Таким образом, для формулировки и проверки гипотез о механизмах, порождающих наблюдаемые тренды, оценки объективных тенденций в изменениях эпидемиологических и демографических показателей, а также для формулировки направлений развития исследований в области старения и развития хронических и острых патологий в человеческом организме требуются качественно новые подходы к организации и использованию результатов междисциплинарных исследований.

Перечисленные проблемы могут быть решены путем построения и применения систем взаимосвязанных математических и компьютерных моделей, позволяющих вычислять количественные оценки процессов старения и развития заболеваний на основе информации, полученной в разных областях исследований. Заметим, что моделирование специфических явлений в биологии, медицине и здравоохранении уже активно применяется для выяснения механизмов наблюдаемых явлений, прогнозирования тенденций процессов, объяснения результатов экспериментов, определения приоритетных направлений исследований и пр. Однако эти модели и разработки недоиспользуют имеющуюся междисциплинарную информацию и не имеют целью создание объединяющей методологической и компьютерной платформы для проведения междисциплинарных исследований. Создание нового инструмента требует объединения усилий математиков, биостатистиков, специалистов в области вычислительной математики и других исследователей, стремящихся осмыслить и систематизировать имеющиеся знания в области старения и связанных с ним процессов с усилиями эпидемиологов, генетиков, биологов, физиологов и других специалистов, изучающих механизмы старения и развития патологических процессов в человеческом организме, организмах животных, а также в популяционных сообществах. Описание организационных механизмов, обеспечивающих высокую эффективность междисциплинарных исследований, выходит за рамки настоящей работы и является темой специального исследования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Vaupel J.W., Manton K.G. and Stallard E. The impact of heterogeneity in individual frailty on the dynamics of mortality // *Demography*. — 1979. — Vol. 16. — P. 439–454.
2. Vaupel J.W. and Yashin A.I. Heterogeneity's ruses: some surprising effects of selection on population dynamics // *American Statistician*. — 1985. — Vol. 39. — P. 176–185.
3. Yashin Anatoli I. and Kenneth G. Manton. Effects of Unobserved and Partially Observed Covariate Processes on System Failure: A Review of Models and Estimation Strategies // *Statistical Science*. — 1997. — 12 (1). — P. 20–34.
4. Yashin A.I., De Benedictis G., Vaupel J.W., et al. Genes, Demography, and Life Span: The Contribution of Demographic Data in Genetic Studies on Aging and Longevity // *Am. J. Hum Genet.* — 1999. — Vol. 5. — P. 1178–1193.
5. Yashin A.I., De Benedictis G., Vaupel J.W., et al. Genes and Longevity: Lessons from Studies of Centenarians // *J. Gerontol. Biol. Sci.* — 2000. — Vol. 55. — P. B319–328.
6. Chamberlain G. Heterogeneity, Omitted Variable Bias and Duration Dependence / *Longitudinal Analysis of Labour Market Data*. Eds. J. Heckman and B. Singer-Cambridge University Press, — 1985. — P. 3–38.
7. Yashin A.I. and Iachine I.A. Genetic Analysis of Durations: Correlated Frailty Model Applied to Survival of Danish Twins // *Genetic Epidemiology*. — 1995. — Vol. 12. — P. 529–538.
8. Yashin A.I., Vaupel J.W. and Iachine I.A. Correlated Individual Frailty: An Advantageous Approach to Survival Analysis of Bivariate Data // *Mathematical Population Studies*. — 1995. — Vol. 5. — P. 145–159.
9. Yashin A.I. and Iachine I.A. What Difference Does the Dependence Between Durations Make? // *Life Time Data Analysis*, — 1999. — Vol. 5. — P. 5–22.
10. Yashin Anatoli I. and Iachine Ivan A. Dependent Hazards in the Problem of Multivariate Survival. // *Journal of Multivariate Analysis*. — 1999. — Vol. 71. — P. 241–261.
11. Yashin A.I., Begun A.Z. and Iachine I.A. Genetic Factors in Susceptibility to Death: Comparative Analysis of Bivariate Survival Models // *Journal of Epidemiology and Biostatistics*. — 1999. — Vol. 4. — P. 53–60.
12. Yashin A.I. and Iachine I.A. How Frailty Models Can Be Used for Evaluating of Mortality And Longevity Limits: Taking Advantage of an Interdisciplinary Approach // *Demography*. — 1997. — Vol. 34. — P. 1–18.
13. Oeppen J., Vaupel J.W. Demography. Broken limits to life expectancy // *Science*. — 2002. — Vol. 296(5570). — P. 1029–1031.
14. Olshanski S.J., Carnes B.A., Cassel C. In search of Methuselah: estimating the upper limits to human longevity // *Science*. — 1990. — Vol. 250. — P. 634–640.
15. Yashin A.I., Begun A.S., Boiko S.I., et al. New age pattern of survival improvement in Sweden: Does it characterize changes in individual aging? // *Mechanisms of Aging and Development*. — 2002. — Vol. 123. — P. 637–647.
16. Vaupel J.W., Jeune B. The Emergence and Proliferation of Centenarians. In: Jeune B. and Vaupel JW, ed. *Experimental Longevity: from Prehistory to the Present*. — Odense, Denmark: Odense University Press, 1995. — P. 109–116.
17. Selnes A., Bolle R., Holt J., Lund E. Cumulative incidence of asthma and allergy in north-Norwegian schoolchildren in 1985 and 1995 // *Pediatr Allergy Immunol.* — 2002. — Vol. 3(1). — P. 58–63.
18. Soriano J.B., Kiri V.A., Maier W.C., Strachan D. Increasing prevalence of asthma in UK primary care during the 1990s // *Int. J. Tuberc. Lung Dis.* — 2003. — Vol. 7(5). — P. 415–421.
19. Senthilselvan A., Lawson J., Rennie D.C., Dosman J.A. Stabilization of an increasing trend in physician-diagnosed asthma prevalence in Saskatchewan, 1991 to 1998 // *Chest*. — 2003. — Vol. 124(2). — P. 438–448.
20. Sadik K., Wilcock G. The increasing burden of Alzheimer disease // *Alzheimer Dis Assoc Disord.* — 2003. — Vol. 17. — P. S75–79.
21. Ries L.A.G., Smith M.A., Gurnry J.G., et al. (eds): *Cancer Incidence and Survival among Children and Adolescents: United States SEER Program, 1975–1995*. — The National Cancer Institute (NCI) monograph., NIH pub. Bethesda, MD, 1999.
22. McKean-Cowdin R., Feigelson H.S., Ross R.K., et al. Declining Cancer Rates in the 1990s // *J. Clin. Oncol.* — 2000. — Vol. 18. — P. 2258–2268.
23. *Health for all*. Data Base. — WHO Regional Office for Europe, 2000.
24. IARC. *Cancer Incidence in Five Continents*. V. I-VIII. IARC Sci. Publications. Lyon. France, 2003.
25. Holly L. Howe, Phyllis A. Wingo, Michael J. Thun, et al. Annual Report to the Nation on the Status of Cancer (1973 Through 1998), Featuring Cancers With Recent Increasing Trends // *Journal of the National Cancer Institute*. — 2001. — Vol. 93. — P. 824–842.
26. Ukraintseva S.V. and Yashin A.I. Economic progress as cancer risk factor. In: *Proceedings of the 12 AEK Cancer Congress*, March 25–28, 2003, Würzburg, Germany, 2003.
27. Omran A.R. The epidemiologic transition. A theory of the Epidemiology of population change. 1971 // *Bull World Health Organ.* — 2001. — Vol. 79(2). — P. 161–170.
28. Masci-Teilor N. and E. Karim. The burden of chronic diseases // *Science*. — 2003. — Vol. 302. — P. 1567–1570.
29. Yashin A.I., Ukraintseva, S.V., Boiko S.I. and Arbeev K.G. Individual aging and mortality rate: How are they related? // *Social Biology*. — 2002. — Vol. 49. — P. 206–217.
30. Ukraintseva S.V., Yashin A.I. Individual aging and cancer risk: How are they related? // *Demographic Research*. — 2003. — Vol. 98. — P. 163–196.
31. Ukraintseva S.V., Yashin A.I. Opposite Phenotypes of Cancer and Aging Arise from Alternative Regulation of Common Signaling Pathways // *Ann. N.-Y. Acad. Sci.* — 2003. — Vol. 1010. — P. 1–4.
32. Michalski A.I., Johnson T.E., Cypser J.R. and Yashin A.I. Heating Stress Patterns in *Caenorhabditis elegans* Longevity and Survivorship // *Biogerontology*. — 2002. — Vol. 2. — P. 35–44.
33. Yashin A.I., Cypser J.W., Johnson T.E., et al. Ageing and survival after different doses of heat shock: the results of analysis of data from stress experiments with the nematode worm *Caenorhabditis elegans* // *Mechanisms of Aging and Development*. — 2001. — Vol. 122. — P. 1477–1495.
34. Michalski A.I. and Yashin A.I. Detection of Hormesis in Longevity Simulation Approach for Heterogeneous Population // *Mathematical Biosciences*. — 2001. — Vol. 175. — P. 57–66.
35. Donehower L. Does p53 affect organismal aging? // *J. Cellular Physiol.* — 2002. — Vol. 192 — P. 23–33.
36. Gems D., Sutton A.J., Sundermeyer M.L., et al. Two pleiotropic classes of daf-2 mutation affect larval arrest, adult behavior, reproduction and longevity in *Caenorhabditis elegans* // *Genetics*. — 1998. — Vol. 150(1). — P. 129–155.
37. Partridge L., Gems D. Mechanisms of ageing: public or private? // *Nat. Rev. Genet.* — 2002. — Mar.; 3(3). — P. 165–175.
38. Larsen P.L., Albert P.S., Riddle D.L. Genes that regulate both development and longevity in *Caenorhabditis elegans* // *Genetics*. — 1995. — Vol. 139(4). — P. 1567–1583.
39. Lakowski B., Hekimi S. Determination of life-span in *Caenorhabditis elegans* by four clock genes // *Science*. — 1996. — Vol. 272. — P. 1010–1013.
40. Houthoofd K., Braeckman B.P., Johnson T.E., Vanfleteren J.R. Life extension via dietary restriction is independent of the Ins/IGF-1 signalling pathway in *Caenorhabditis elegans* // *Exp. Gerontol.* — 2003. — Vol. 38(9). — P. 947–954.
41. Ao-Lin Hsu, Coleen T. Murphy and Cynthia Kenyon. Regulation of Aging and Age-Related Disease by DAF-16 and Heat-Shock Factor // *Science*. — 2003. — Vol. 300. — P. 1142–1145.
42. Anisimov V.N., Alimova I.N., Baturin D.A., et al. The effect of melatonin treatment regimen on mammary adenocarcinoma development in HER-2/neu transgenic mice // *Int. J. Cancer*. — 2003. — Vol. 103. — P. 300–305.
43. Romanyukha A.A. and Yashin A.I. Age related changes in population of peripheral T-cells: Towards a model of immunosenescence // *Mech. Ageing and Dev.* — 2002. — Vol. 124. — P. 433–445.
44. Calabrese E.J., Baldwin L.A. Hormesis: a generalizable and unifying hypothesis // *Crit. Rev. Toxicol.* — 2001. — Vol. (4-5). — P. 353–424.
45. Vaillancourt D.E., Newell K.M. Changing complexity in human behavior and physiology through aging and disease // *Neurobiol. Aging*. — 2002. — Vol. 23. — P. 1–11.

E-mail: yashin@cds.duke.edu





# Междисциплинарное моделирование системных механизмов управления репродукцией и старением

В. Н. Новосельцев<sup>1</sup>, Р. Аркин<sup>2</sup>, Ж. А. Новосельцева<sup>1</sup>, А. И. Яшин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем управления им В. А. Трапезникова, г. Москва

<sup>2</sup>Уэйн Стейт Университет, г. Детройт, США

<sup>3</sup>Университет Дьюка, г. Дюрам, США

Представлен краткий обзор работ, связанных с междисциплинарным моделированием старения и репродукции. Рассмотрена модель, в которой предполагается, что темп индивидуального старения организма пропорционален темпу потребления кислорода и его оксидативной уязвимости. Старение представлено как снижение с возрастом способности организма перерабатывать в энергию вещества, поступающие из окружающей среды. На основе модели оксидативных повреждений и модели смерти от старости построена общая схема моделирования жизненного цикла организма, с помощью которой выполнен анализ системных механизмов управления репродукцией и старением плодовых мушек (*Drosophila* и *Ceratitis capitata*).

## ВВЕДЕНИЕ

Согласно оксидативной теории старение понимается как повреждение клеточных структур организма оксидативными радикалами, которое с 1990-х гг. в литературе рассматривается в качестве общей причины старения [1, 2]. Тем не менее, вплоть до настоящего времени прямой связи между старением и накоплением оксидативных повреждений ни у одного вида животных найдено не было [3, 4]. В то же время были обнаружены глубокие аналогии между человеком и животными. Например, оказалось, что с возрастом и у тех, и у других растет концентрация белковых карбониллов [5–7], а эксперименты на животных позволили понять роль генетических факторов в старении вообще [8–10] и, в частности, в достижении долголетия у человека [11, 12].

После обнаружения удивительного сходства между геномом человека и животных (общие гены у человека и плодовых мушек составляют до 80%) начался активный поиск аналогий между ними. Одновременно усилился и интерес к биологии мушек видов *Drosophila* и *Ceratitis capitata* (средиземноморская плодовая мушка Medfly — Mediterranean fruit fly) как прототипов по изучению различных заболеваний у человека [13]. Подтвердилось старое высказывание Уильяма Роуза, что вид *Drosophila* представляет собой уникальный объект для изучения, “поскольку лишь немногие аспекты ее биологии не привлекли внимания” [14].

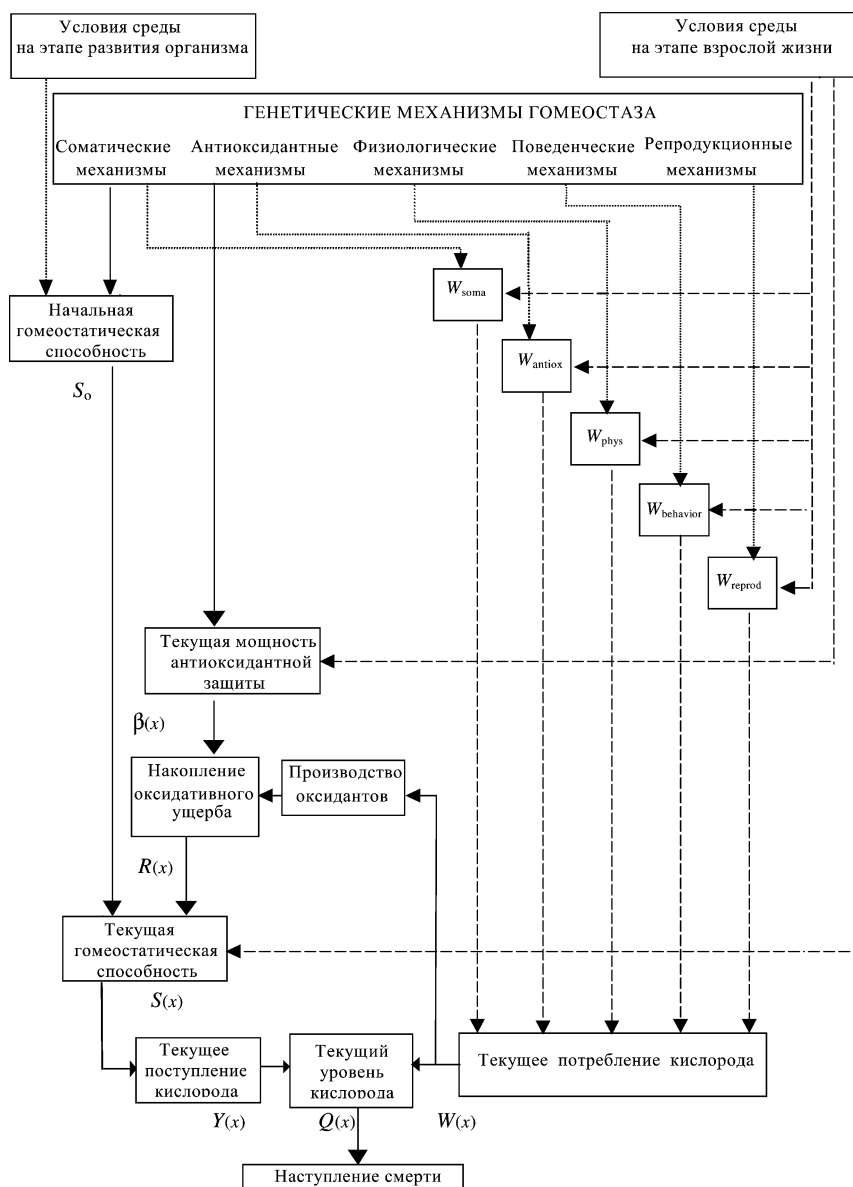
В настоящей публикации мы подводим промежуточные итоги работы по математическому моделированию механизмов управления, которые проводились в Инсти-

туте проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН в содружестве с Институтом демографических исследований Общества им. Макса Планка (г. Росток, Германия). Эти механизмы реализуются в живых организмах и направлены на поддержание их существования в течение интервала времени, необходимого для получения потомства, тем самым обеспечивая сохранение биологических видов в условиях меняющейся среды.

## 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАРЕНИЯ И СМЕРТНОСТИ

В качестве концепции, наиболее адекватно отражающей накопленный запас знаний о механизмах старения, чаще всего выступает теория оксидативных повреждений [15, 16]. Особую роль в ней играют свободные радикалы<sup>1</sup> кислорода (ионизированный кислород  $O_2^-$ , пероксид водорода  $H_2O_2$  и гидроксил  $OH^-$ ) — высокотоксичные вещества, которые вступают в реакции с биологическими макромолекулами и повреждают их. В организме в ходе нормального обмена веществ от 1 до 3% всего потребляемого кислорода превращается в свободные радикалы [16, 17]. Кроме того, во всех организмах существует система ферментной антиоксидантной защиты, включающая в себя ферменты супероксид дисмутазу, каталазу, пероксидазу и др. Защита организма от

<sup>1</sup> Свободные радикалы — кинетически независимые частицы, характеризующиеся наличием неспаренных электронов.



**Рис. 1. Взаимодействие генетических, физиологических и поведенческих факторов в процессе старения и смерти организма**

действия оксидантов связана как с сокращением числа повреждений, так и с их восстановлением. Эти данные позволяют предложить модель старения в виде следующих постулатов [18].

1. Скорость старения индивидуального организма (темп накопления оксидативных повреждений) определяется, с одной стороны, темпом потребления кислорода, а с другой — эффективностью механизмов антиоксидантной защиты.

2. Старение можно представить как снижение гомеостатической способности<sup>2</sup> организма в результате накопления оксидативных повреждений.

<sup>2</sup> Гомеостатическая способность происходит от термина "гомеостаз" — свойства организмов поддерживать свою жизнедеятельность в меняющихся условиях среды.

3. Следствием старения является снижение энергетического ресурса организма с возрастом, а его истощение приводит организм к естественной смерти от старости.

Первый постулат по существу представляет собой основной тезис теории оксидативных повреждений. Вторым подчеркивает связь старения с возрастным снижением гомеостатической способности организма (в отличие от обычного для биogerонтологии анализа накопления оксидированных белков и других веществ с возрастом). Третий постулат отвечает концепции Фриза—Хейфлика [19, 20] о естественной смерти от старости.

С точки зрения моделирования, эти постулаты представляют собой междисциплинарные интерфейсы, связывающие между собой различные дисциплинарные модели [21]. Действительно, второй постулат связывает процессы образования свободных радикалов (дисциплинарная область — биохимия) с повреждениями внутренних структур организма (биофизика). Третий постулат связывает энергетические процессы в организме (физика) с процессом умирания его клеток (физиология). Эти постулаты реализуют междисциплинарный подход, когда для решения сложной задачи можно ограничиться "стыковкой" знаний только в узком круге отношений [21].

Развертывание процесса старения в индивидуальном организме можно описать следующим образом (рис. 1). На этапе развития в организме формируется комплекс гомеостатических механизмов, мощность  $S$  которых определяется генотипом и зависит от условий развития [22]. При старении она уменьшается, и в возрасте  $x$  гомеостатическая способность  $S$  обозначается как  $S(x)$ . Генотип определяет и подверженность организма действию оксидантов. "Уязвимость" гомеостатических систем описывается функцией  $\beta(x)$ . Окружающая среда на протяжении жизни влияет как на гомеостатическую способность  $S(x)$ , так и на уязвимость  $\beta(x)$ .

Существенным элементом модели является сложный характер энергетического баланса. Временной паттерн  $W(x)$ , т. е. зависимость потребления кислорода от возраста, включает в себя несколько компонент — потребление кислорода на поддержание соматической структуры организма ( $W_{soma}$ ) и на реализацию антиоксидантной защиты ( $W_{antiox}$ ), текущие расходы на поддержание двигательной активности ( $W_{phys}$ ) и работу физиологических механизмов гомеостаза ( $W_{behavior}$ ). В репродуктивных возрастах кислородный бюджет включает в себя расходы на производство потомства ( $W_{reprod}$ ).

С началом потребления кислорода в организме непрерывно возникают оксидативные частицы и накапливается оксидативный ущерб. Темп производства оксидативных частиц пропорционален скорости потребле-



ния кислорода, но из-за действия антиоксидантной защиты темп накопления ущерба  $R(x)$  оказывается намного меньше темпа производства частиц. Накопление повреждений, нарушая работу различных подсистем организма, приводит к снижению его текущей гомеостатической способности  $S(x)$ . Уменьшающаяся с возрастом эффективность механизмов приводит к снижению темпа доставки кислорода. Уровень кислорода  $Q(x)$  в митохондриях<sup>3</sup> медленно снижается, а после достижения им нулевого уровня наступает смерть от старости.

Механизмы, представленные на рис. 1, работают в двух временных масштабах [23]. С одной стороны, в быстром масштабе времени функционируют механизмы физиологического гомеостаза и протекают поведенческие и репродуктивные реакции. С другой стороны, накопление оксидативного ущерба и снижение гомеостатической способности с возрастом протекают в медленном масштабе времени. У насекомых единица измерения “быстрого времени” — час (потребление кислорода измеряется в миллилитрах в час), а “медленного” — сутки.

Гомеостатическая модель конструктивна в том смысле, что каждый из ее элементов легко описывается с помощью формул и уравнений. В зависимости от того, как и с какой степенью детализации описаны эти элементы, можно получать разные математические модели старения. Ниже именно эти различия окажутся существенными при рассмотрении различных направлений в исследовании механизмов управления репродукцией и старением плодовых мушек.

### 1.1. Гомеостатическая модель старения

Попытки построения формализованных моделей старения и смертности, основанные на гомеостатических идеях, были предприняты еще в 1960-х гг. [24, 25]. Эти работы внесли существенный вклад в развитие концепций старения. Однако они носили формальный характер и не были связаны с конкретными физиологическими механизмами.

В основе гомеостатической модели старения лежит понятие гомеостатической способности организма, которая характеризует его способность превращать топливо и окислитель, получаемые из окружающей среды, в энергию [22]. Кислород конвертируется в энергию АТФ в митохондриях, поэтому кислородный ресурс организма можно представить его как митохондриальное напряжение кислорода. Общая способность системы преобразовывать атмосферный кислород в энергию определяется ее гомеостатической способностью  $S(x)$ . Строго говоря, гомеостатическая способность представляет собой обобщение коэффициента усиления в законе диффузии Фика [26]. Она может быть представлена в виде такого коэффициента в цепи потока кислорода через множество барьеров между атмосферой и интра-митохондриальными поверхностями, на которых кислород и конвертируется в АТФ.

В свободные радикалы, которые “портят” гомеостатические механизмы в организме, переходит часть  $\alpha$  потребляемого кислорода. Это приводит к уменьшению величины  $S(x)$ . Одновременно антиоксидантные защит-

ные и репарационные механизмы уменьшают скорость реального повреждения внутриклеточных элементов, так что фактически ущерб наносит лишь малая доля возникающего потока оксидативных частиц,  $\gamma \ll 1$ . Таким образом, в возрасте  $x$  повреждения наносятся со скоростью  $\alpha\gamma W(x)$ , где  $\alpha$  и  $\gamma$  — константы.

В последнее время часто говорят о том, что у плодовых мушек темп потребления кислорода фактически не влияет на продолжительность жизни [27]. Это легко объясняется изменением параметров  $\alpha$  и  $\gamma$ , определяющих оксидативную уязвимость (что, в частности, проявляется в увеличении сопротивляемости стрессам у долгоживущих мух): “сопротивляемость стрессу идет рука об руку с продолжительностью жизни” [28].

Представим внутриклеточную энергетическую систему как однородную структуру из  $N$  элементов, из которых в возрасте  $x$  нормально функционируют  $n(x)$ , а часть  $N - n(x)$  описывает биологический эффект накопленного ущерба. Поскольку новые оксидативные частицы ударяют как в нормально работающие, так и в уже поврежденные элементы, число вновь повреждаемых элементов в единицу времени пропорционально отношению  $n(x)/N$ . Если считать, что одного удара достаточно, чтобы вывести элемент из строя, то в медленном времени  $x$

$$\frac{dn(x)}{dx} = -\alpha\gamma W(x) \frac{n(x)}{N}. \quad (1)$$

Обозначая гомеостатическую способность одного элемента символом  $C$ , получаем, что общая гомеостатическая способность системы в возрасте  $x$  равна  $S(x) = Cn(x)$ . Тогда снижение гомеостатической способности системы во времени описывается квазиэкспоненциальной функцией

$$S(x) = S_0 \exp \left[ -\int_0^x R(t) dt \right], \quad (2)$$

которая определяет возрастное снижение  $S(x)$ . Величина

$$R(x) = \beta W(x) \quad (3)$$

задает темп старения, где  $\beta = \alpha\gamma/N$  — коэффициент оксидативной уязвимости системы. Внутриклеточное напряжение кислорода в быстром времени  $\tau$  описывается уравнением

$$\frac{dQ(x+\tau)}{d\tau} = k\{S(x+\tau)[P - Q(x+\tau)] - W(x+\tau)\}. \quad (4)$$

Это уравнение задает “динамику первого порядка” между темпом потребления кислорода  $W(x)$  и кислородным ресурсом  $Q(x)$ . Здесь  $x$  и  $\tau$  — медленное и быстрое (физиологическое) время, соответственно;  $\tau \ll x$ , а  $k$  — масштабный коэффициент. Величина  $P$  — атмосферное напряжение кислорода, а  $S(x+\tau)$ ,  $Q(x+\tau)$  и  $W(x+\tau)$ , соответственно, гомеостатическая способность, кислородный ресурс и темп потребления кислорода в момент  $(x+\tau)$ . Возрастное снижение  $S(x)$  приводит к уменьшению  $Q(x)$ . Когда устанавливается квазистационарный режим, производная  $dQ(x+\tau)/d\tau$  в быстром времени  $\tau$  оказывается равной нулю. Тогда возрастное снижение кислородного ресурса клетки записывается следующим образом:

$$Q(x) = P - W(x)/S(x). \quad (5)$$

<sup>3</sup> Митохондрии — “энергетические станции” клеток, в которых потребляется кислород и производится необходимая для жизнедеятельности энергия.

## 2. СМЕРТЬ ОТ СТАРОСТИ

Причины смерти у организмов в естественных условиях и при искусственном содержании различны [29]. В отличие от лабораторных экспериментов, в природе животные редко доживают до старости. Если же индивидуальные организмы защищены от воздействий среды, то главной причиной смертности в популяции становится естественная смерть от старости.

Концепцию смерти от старости разработал Джеймс Фриз: "...Медицинская модель <...> предполагает, что смерть всегда является результатом развития болезни; если бы не было болезни, не было бы и смерти" [19, с. 131]. На самом деле, смерть наступит даже у тех организмов, которые никогда не болели. Действительно, в молодом организме гомеостаз поддерживается механизмами, возможности которых многократно превышают необходимый минимум. Однако с возрастом способность поддерживать гомеостаз уменьшается, и в какой-то момент резервы организма уменьшаются настолько, что его восстановление делается невозможным. Тогда любое нарушение приведет к фатальному результату, что и станет кажущейся причиной смерти. Аналогичную позицию занял и Леонард Хейфлик [21].

Смерть от старости наступит в некотором возрасте  $x_D$ , который определяется из уравнения (5) в случае  $Q(x_D) = 0$ . Хотя кислород не единственное вещество, участвующее в синтезе АТФ, высказанные положения работают всегда, если только  $W(x)$  — гладкая функция возраста. Но если зависимость  $W(x)$  меняется скачкообразно из-за сдвигов в окружающей среде, в модели появляется нелинейность. Действительно, если скачкообразное уменьшение доступности кислорода в митохондриях вызывает немедленное сокращение синтеза АТФ, то такое же увеличение кислородного ресурса может и не привести к немедленному возрастанию синтеза (например, при нехватке других компонентов, участвующих в синтезе).

## 3. МОДЕЛЬ СТАРЕНИЯ И УМИРАНИЯ ОРГАНИЗМА

Для описания индивидуального жизненного цикла конкретного взрослого насекомого надо определить начальное значение  $S_0$  и идентифицировать его временные паттерны  $\beta(x)$  и  $W(x)$ . Тогда цикл получается как решение уравнений (1)–(5) при заданных  $S_0$ ,  $\beta(x)$  и  $W(x)$ . Если временные паттерны  $\beta(x)$  и  $W(x)$  заменить их усредненными за время жизни константами  $\beta_0$  и  $W_0$ , то значение  $S_0$  легко выбрать так, чтобы получить нужную продолжительность жизни.

Вообще говоря, умирание организма представляет собой "быстрый" (в смысле уравнения (4)) процесс:

$$W(x + \tau) = W(x)\varphi_W(x, \tau); \quad S(x + \tau) = S(x)\varphi_S(x, \tau),$$

где  $\varphi_W(x, \tau)$ ,  $\varphi_S(x, \tau)$  — междисциплинарные интерфейсы [31]. Они описывают изменения в гомеостазе организма, которые приводят его к смерти.

## 4. МОДЕЛЬ ФЕНОТИПИЧЕСКОЙ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ

Чтобы смоделировать популяцию из  $N$  индивидов, придется  $N$  раз моделировать одного индивида [18, 32]. Фенотипическая вариабельность организмов в популяции вводится за счет индивидуальных значений  $S_0^i$  и  $W_0^i$ : значения  $S_0^i$  и  $W_0^i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) разбрасываются вокруг значений  $S_0$  и  $W_0$ :

$$S_0^i = S_0 \cdot \xi_{S_i}; \quad W_0^i = W_0 \cdot \xi_{W_i}. \quad (6)$$

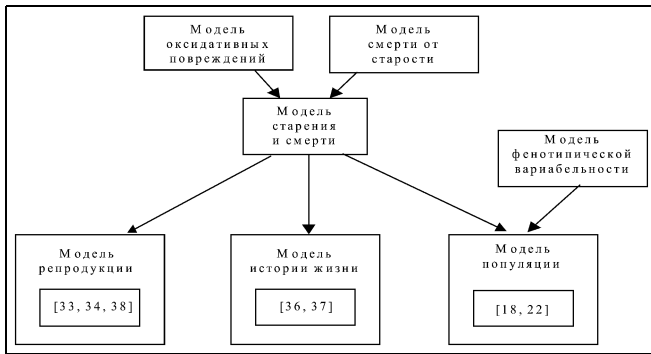
Обычно случайные величины  $\xi_{S_i}$  и  $\xi_{W_i}$  считаются гауссовыми со средним значением 1 и стандартными отклонениями  $\sigma_S$  и  $\sigma_W$ , соответственно. Величина  $\beta$  (см. формулу (3)) в этой модели не случайна. Моделируемые животные смертны, и для каждого из них можно определить возраст в момент смерти  $\tau_D$ . Поскольку гауссово распределение бесконечно, в популяции возникают и организмы с  $\tau_D^i \leq 0$  (обычно не более 0,5...1%), которые из рассмотрения исключаются.

Возможен и другой вариант введения фенотипической вариабельности, когда случайным образом разбрасывается только величина  $S_0^i$  в выражении (6), а потребление кислорода случайным образом изменяется на каждом шаге (программы Matlab позволяют легко реализовать этот прием). Оказывается, что в таком случае результат не меняется — кривые дожития остаются теми же, что и при использовании выражения (6). Однако легко видеть, что такой способ задания ближе к "классическому" подходу Стрелера—Милдвана [24].

При моделировании смерть от старости наступает, как правило, только в пожилом возрасте, а в реальных физиологических экспериментах имеет место и смертность в молодом возрасте от внешних причин. Поэтому начальная часть экспериментальной кривой дожития *in silico* обычно представляется плохо. Чтобы учесть и внешние причины смерти в молодом возрасте, в модели вводится так называемый коэффициент смертности  $k_m$  Мейкема:  $\mu(x) = \mu_0 \exp[-k_m x]$ . Здесь  $\mu(x)$  и  $\mu_0$  — смертности в моделируемой популяции с учетом и без учета смертности от внешних причин. Обычно  $k_m \approx 0,001...0,003$ , и в молодом возрасте от внешних причин из каждых 1000 мушек ежедневно умирает от одной до трех.

## 5. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Процессы старения и смерти у плодовых мушек изучались в основном у дрозофилы *Drosophila* и у средиземноморской плодовой мушки *Medfly*. Прежде всего, анализу было подвергнуто репродуктивное поведение мушек в связи с продолжительностью их жизни. Анализ механизмов управления репродуктивной функцией позволил выдвинуть гипотезу об индивидуальном паттерне репродукции. Оказалось, что этот паттерн подчиняется до тех пор неизвестным закономерностям и существенно отличается от экспериментально наблюдаемого усредненного популяционного паттерна [33, 34]. Особо был выполнен анализ свойств этого паттерна у мушки *Medfly* [38].



**Рис. 2. Схема основных направлений исследований по анализу репродукции, моделированию жизненного цикла и анализу популяционных свойств у плодовых мушек видов *Drosophila* и *Ceratitis Capitata***

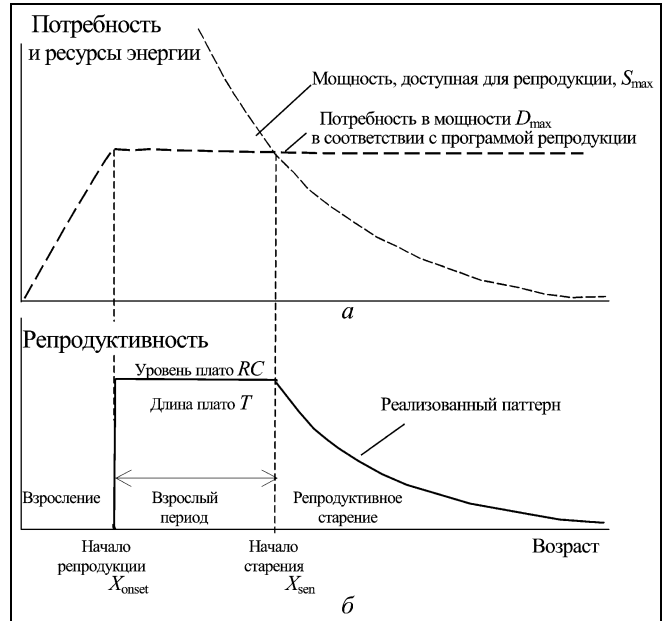
Другое направление исследований было ориентировано на углубленный анализ жизненного цикла у плодовых мушек *Drosophila*. Математическое моделирование позволило не только объяснить и объединить старые теории старения (теорию темпа жизни и пороговую теорию — [36], но и доказать эволюционную оптимальность генотипа одного из распространенных экспериментальных видов дрозофилы — самки штамма Уэйн Стэйт [37].

Наконец, объектом изучения явились свойства популяций мушек. В частности, было выяснено, что у средиземноморской плодовой мушки окислительная уязвимость с возрастом сильно меняется, защищая ее от риска смерти во время производства потомства. Поэтому девственные самки, сохраняя этот паттерн уязвимости и сокращая потребление кислорода, получают дополнительную выгоду в виде снижения уровня смертности и увеличения продолжительности жизни [18].

Схема организации междисциплинарных исследований по трем направлениям приведена на рис. 2.

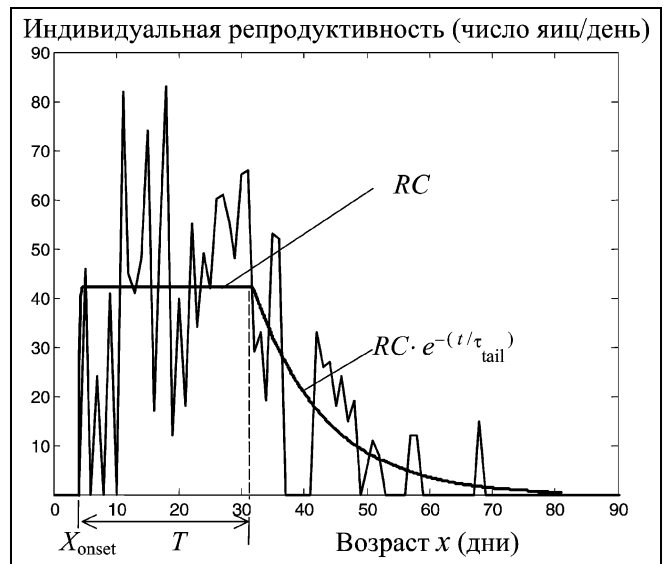
**6. АНАЛИЗ РЕПРОДУКТИВНОГО ПОВЕДЕНИЯ ПЛОДОВЫХ МУШЕК**

Паттерн репродукции у плодовых мушек представляет собой минимум двух временных функций (рис. 3). Одна из них описывает энергию, необходимую для реализации генетической программы репродукции (“энергетический запрос”). Начинаясь с быстрого переходного процесса, она на третий день выходит на установившееся плато, отвечающее генетически predeterminedому темпу производства яиц. Репродуктивная машина работает теперь “на полную мощность”. Другая функция представляет уменьшающуюся с возрастом максимальную мощность, которая может быть потрачена организмом в репродуктивной системе (“энергетическое предложение”). В молодом возрасте энергия, которую организм мушки может выделить на производство потомства, намного превосходит потребности в этой сфере. В критическом возрасте это предложение падает ниже того спроса, который необходим для работы репродуктивной машины на полную мощность. Поддержанию генетически предписанного уровня репродукции становится невозможным, и начинается репродуктивная старость [33—35].



**Рис. 3. Механизм, формирующий временной паттерн репродукции у мушки:**

*a* — паттерн репродукции в каждом возрасте представляет собой минимум двух временных функций; одна из них описывает мощность, задаваемую генетической программой репродукции; другая представляет уменьшающуюся с возрастом максимальную мощность, которая может быть потрачена организмом в репродуктивной системе; в критическом возрасте эта мощность падает ниже уровня, необходимого для работы репродуктивной машины “на полную мощность”; поддержание генетически предписанного уровня репродукции становится невозможным, и начинается репродуктивная старость; *b* — реализованный паттерн репродукции и описывающие его параметры [34]



**Рис. 4. Типичный индивидуальный паттерн (сплошная линия) репродукции у плодовой мушки [35].**

Он характеризуется началом репродукции  $X_{onset} = 4,0$ , длительностью плато  $T = 27,0$ , уровнем плато  $RC = 42,27$ , постоянной времени экспоненциального хвоста  $\tau_{tail} = 10,58$  (в экспоненте  $t = x - T - X_{onset}$ ), возрастом в момент смерти (81 день)

Индивидуальный паттерн репродукции показан на рис. 4 и может быть охарактеризован пятью параметрами [34]. Это возраст начала репродукции, длительность плато, уровень плато, постоянная времени экспоненциального хвоста и возраст в момент смерти.

Было показано, что экспериментально наблюдаемый максимум представляет собой результат усреднения “плоских” индивидуальных паттернов при различных длинах плато [34].

Индивидуальный паттерн дает возможность выявить гетерогенность популяции и проанализировать различ-

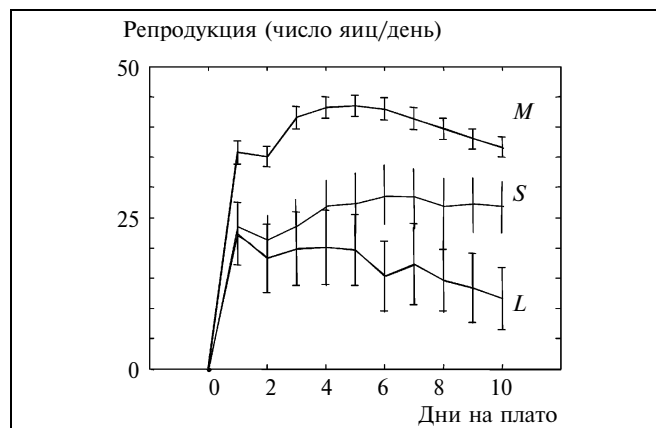


Рис. 5. Репродукция у различных групп мух в популяции статистически различается.

Показан усредненный индивидуальный паттерн в течение первых 10-ти дней пребывания в стационарном режиме на плато для “оптимальных” (*M*) и “ослабленных” мух (*S* и *L*). Популяция *Medfly* состоит из 1000 мушек [38]. Вертикальные линии означают 95%-ное стандартное отклонение

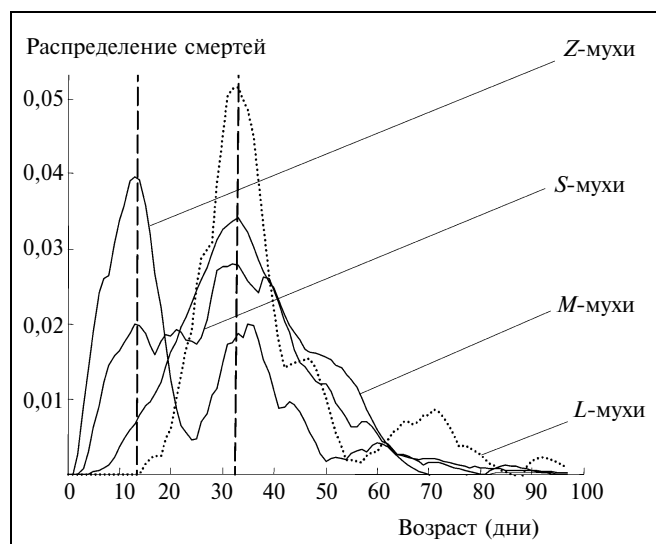


Рис. 6. Распределение смертей *Z*-, *S*-, *M*- и *L*-мух.

В популяции присутствуют две принципиально различные причины смерти. Преждевременные смерти от старости располагаются вблизи точки 13 дней (*Z*- и *S*-мухи), в то время как “нормальные” смерти, вызванные старостью, группируются вокруг точки 33 дня (*M*- и *L*-мухи). Наиболее четко обе причины смерти видны у *Z*-мух, что порождает бимодальное распределение смертности

ные группы мушек (рис. 5 [35, 38]). В частности, выделялось четыре типа мух. Мухи, которые всю жизнь не несли яиц, были названы *Z*-мухами, а мухи с наилучшим распределением ресурсов (и выраженным периодом старения) — *M*-мухами. Мухи, умершие в период активного яйценесения, были названы *S*-мухами, а мухи, прекратившие яйценесение задолго до конца жизни — *L*-мухами. Обозначения *S*, *M* и *L* происходят от английских слов *short*, *medium* и *long* (короткий, средний и длинный). Алгоритм разделения на группы основан на количестве яиц *RS*, снесенных за время жизни каждой мухой, и имеет следующий вид [34]:

*Z*-мухи, если  $RS = 0$ ,

*S*-мухи, если  $RS > 0$  &  $LS - X_{\text{onset}} - T \leq 3$ ,

*L*-мухи, если  $RS > 0$  &  $LS - t_{\text{end}} > 12$ .

Остальные мухи относятся к *M*-классу. Здесь *LS* означает продолжительность жизни (от английского слова *life span*),  $X_{\text{onset}}$  — возраст начала репродукции, а  $t_{\text{end}}$  — возраст снесения последнего яйца. Оказалось, что *Z*-мухи составляют 6,4, *S*-мухи — 12,8, *L*-мухи — 6,5 %. Основа популяции — *M*-мухи (74,5 %). Смерти среди этих групп распределены различно (рис. 6). Кроме того, был подтвержден известный ранее [39] вывод об отсутствии у мух *Medfly* компромисса (трейдоффа) между репродукцией и продолжительностью жизни.

## 7. АНАЛИЗ ИСТОРИИ ЖИЗНИ ПЛОДОВЫХ МУШЕК

По определению Дэвида Резника, “история жизни состоит из описания всех признаков, которые непосредственно влияют на производство потомков и выживание” [40]. Анализ истории жизни и жизненного цикла у мушек *Drosophila* позволил объяснить и объединить прежние теории старения — теорию темпа жизни и пороговую теорию. Для этого пришлось смоделировать парадоксальные результаты экспериментов Майнарда Смита начала 1960-х гг. [36]. Кроме того, была доказана эволюционная оптимальность генотипа у самок дрозофилы [37].

### 7.1. Объединение прежних теорий старения

Вплоть до 1990-х гг. проблемы старения рассматривались в рамках теории темпа жизни (ТТЖ), выдвинутой в 1928 г. Р. Пирлом [14] и оперирующей понятием витальности как “наиболее интегрированной физиологической функции” [41]. Именно, смерть организма наступает, когда его витальность, снижаясь с возрастом, становится ниже заданного порога. В основе ТТЖ лежат два следующих постулата.

А. “Метаболический потенциал, определяемый как общее количество кислорода, потребленное на протяжении жизни, не является постоянным и различен у разных <...> групп”. “Внутри данного вида метаболический потенциал меняется в различных условиях среды”.

В. Темп старения явно зависит от условий среды.

Что касается постулата В, то в 1986 г. он был переформулирован в терминах окислительной теории старения: “Темп старения связан прямым соотношением со скоростью невосстанавливаемых молекулярных повреждений побочными продуктами кислородного обмена и обратным — с эффективностью антиоксидантных и репаративных механизмов” [42].





На протяжении 1960—1970-х гг. в качестве альтернативы ТТЖ рассматривалась пороговая теория [41], согласно которой темп старения не зависит от условий среды. Смерть наступает, когда витальность падает ниже определенного порога, а сам порог зависит от окружающих условий. Чем хуже условия среды, тем он выше и тем раньше наступит смерть (рис. 7). Однако эти теории не объясняют всех экспериментальных данных: “Ни простая теория темпа жизни, ни пороговая теория не могут рассматриваться как надежные” [14].

Сравнение гомеостатической способности и витальности позволяет выявить существующие между ними аналогии. Подобно витальности, гомеостатическая способность представляет собой высокоинтегрированный физиологический показатель. Она уменьшается с возрастом, а смерть наступает после того, как гомеостатическая способность становится ниже некоторого порога. Однако витальность — понятие абстрактное, и для его описания применялись другие показатели (например, половое поведение или отрицательный геотаксис). Гомеостатическая способность представляет собой точно определенный и, главное, измеримый показатель.

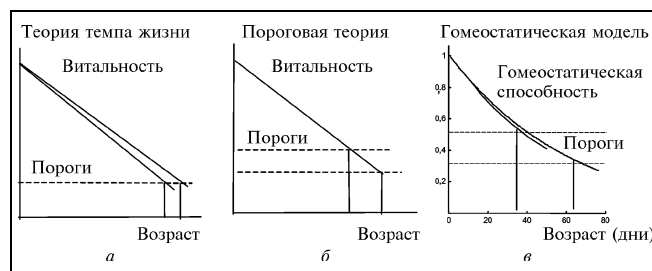
Чтобы убедиться в этом, рассмотрим контрольный эксперимент Майнарда Смита [30]. Будем пользоваться формулой (5), в которую, кроме гомеостатической способности  $S$ , входят величины  $W_0$ ,  $P$  и  $Q_0$ . Потребление кислорода *D. subobscura* при 20 °С можно считать постоянным. Примем его приблизительно равным потреблению кислорода *D. melanogaster* при 21 °С. Это дает  $W_0 = 47,2$  мкл  $O_2$ /день [43]. Далее, эксперимент проводится при  $P = 150$  мм рт. ст. Что касается напряжения  $O_2$  внутри митохондрий, то это наиболее сложный вопрос, поскольку напряжение кислорода вообще измеряется редко. Поэтому оценим его, взяв максимум напряжения кислорода в мышцах покоящегося мотылька *Agrius convolvuli* (13 кПа, [44]). Таким образом,  $Q_0 = 100$  мм рт. ст. Тогда из балансного уравнения (5) получаем  $S_0(P - Q_0) = W_0$ , и для гомеостатической способности имеем окончательный результат  $S_0 \cong 1,0$  мкл  $O_2$ /день/мм рт. ст.

Для завершения расчета параметров модели истории жизни нужно определить еще величину  $\beta_0$ . Для этого выберем значение  $\beta_0$  таким, которое при моделировании дает известную из эксперимента [30] продолжительность жизни (ПЖ) — возраста в момент смерти —  $\tau_{D0} = 67,5$  дн. В результате получаем  $\beta_0 = 3,66 \cdot 10^{-4}$  (мкл  $O_2$ )<sup>-1</sup>.

Таким образом, гомеостатическая модель старения объединяет обе упомянутые теории старения. Как темп старения, так и порог оказываются зависящими от окружающей среды. Принципиальная разница, однако, состоит в том, что ТТЖ и пороговая теории дают сугубо спекулятивные построения, а гомеостатическая модель позволяет получить конкретный график, основанный на моделировании физиологического эксперимента (см. рис. 7).

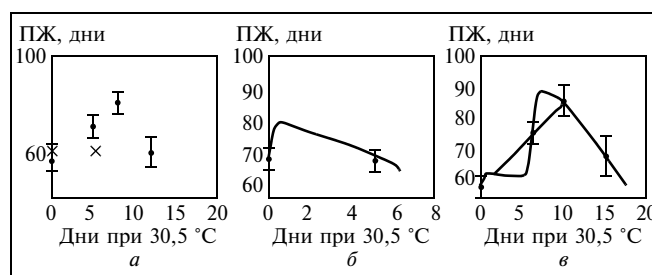
**Парадоксы пороговой теории.** Выдвигая пороговую теорию, Майнард Смит опирался на эксперименты, один из которых мы рассмотрим [30]. Мухи (самки и самцы) в течение первых пяти дней взрослой жизни содержались при 20 °С. Затем они переносились в температуру 30,5 °С, самцы на 5 дней, а самки на 5, 8 и 12 дней. После этого они возвращались в температуру

20 °С, где и содержались до конца жизни. Если у самок ПЖ возрастала благодаря снижению репродукции, то у самцов, судя по двум точкам эксперимента, ПЖ не менялась (рис. 8). Подобные эксперименты, выполненные в соответствии с требованиями середины прошлого века, и послужили основой для выдвигания пороговой теории старения. Моделирование температурных воздействий показывает, как в эксперименте Майнарда Смита был получен парадоксальный результат. В статье [36] были рассмотрены и другие эксперименты. Во всех случаях оказалось, что полный учет факторов, неизвестных в 1960-е гг., позволяет дать объяснение этих результатов в рамках гомеостатической модели старения. В качестве таких факторов рассматривался гормезис и изменение паттерна потребления кислорода с возрастом.



**Рис. 7. Гомеостатический подход объединяет две старые теории старения — теорию темпа жизни и пороговую теорию:**

*a* — теория темпа жизни — в различных условиях среды витальность с возрастом падает линейно, но темп спада зависит от них; смерть наступает после того, как витальность упадет ниже некоторого порога; *б* — пороговая теория — темп уменьшения витальности не зависит от условий среды, но от них зависит порог; *в* — гомеостатическая модель — как темп старения, так и порог зависят от условий среды; кроме того, снижение гомеостатической способности с возрастом нелинейно; в отличие от рис. *a* и *б*, которые представляют собой чисто теоретические построения, рис. *в* представляет решение уравнений (1)—(5) для эксперимента [30]



**Рис. 8. Средняя продолжительность жизни (ПЖ) в экспериментах [30]:**

*a* — мухи содержатся при 20 °С в течение первых 5 дней взрослой жизни, затем самки (черные точки) переносятся в температуру 30,5 °С на 5, 8 и 12 дней, после чего возвращаются в температуру 20 °С; самцы (крестики) экспонировались при 30,5 °С в течение 5 дней; результат выглядит так, как если бы продолжительность жизни у самок не менялась; *б* — самцы *in silico*; сплошной линией показано предсказание гомеостатической модели, точки с доверительным интервалом — экспериментальные данные; *в* — самки *in silico*; дополнительно показана область допустимых решений из-за невозможности точно определить, какая часть производства яиц сохранилась после пребывания в высокой температуре

## 7.2. Эволюционная оптимальность и моделирование жизненного цикла

Старение многоклеточных организмов и ограниченный срок их жизни, заканчивающийся смертью индивидуума — целесообразный механизм, который выработан в природе для сохранения генотипов в процессе смены поколений в меняющихся условиях среды [14, 45]. Хотя бессмертие организмов в эволюции и осуществимо, оно нецелесообразно с точки зрения максимизации числа потомков или увеличения доли соответствующего генотипа в последующих поколениях. Экономически выгоднее вложить нужные ресурсы в репродуктивный аппарат. Такой организм, обладая ограниченным запасом прочности, со временем приходит в негодность и умирает. Однако произведенных за время жизни потомков достаточно для сохранения его генотипа в популяции.

**Эволюционный критерий оптимальности.** Чаще всего считают, что критерием эволюционной оптимальности является максимизация коэффициента приспособленности Фишера  $r$ , который представляет собой усредненную по популяции плодовитость животного на протяжении жизни [46, 47]. В последнее время принято рассматривать “инвестиции”  $R_m$  в поддержание сомы<sup>4</sup> и в непосредственные затраты  $R_r$  на репродукцию.

Ресурс  $R_m$  (индекс  $m$  — от англ. *maintenance* — поддержание) позволяет обеспечить жизнеспособность организма на достаточно длительном периоде времени. Ресурс  $R_r$ , вложенный в репродукцию (индекс  $r$  — от англ. *reproduction* — воспроизводство), дает возможность произвести потомство. Естественный отбор максимизирует усредненную “приспособленность” организмов — их способность оставить наибольшее число потомков в данных условиях среды: репродуктивный показатель  $RV$  достигает максимума. Следовательно,

$$RV = \int_0^{\infty} l(x; R_r, R_m) \cdot m(x; R_r, R_m) dx,$$

где  $x$  — возраст,  $l(x; R_r, R_m)$  — функция дожития при фиксированных ресурсах  $R_r$  и  $R_m$ , выделяемых на репродукцию и поддержание сомы, соответственно, а  $m(x; R_r, R_m)$  — плодовитость при том же распределении ресурсов. Оптимум обычно ищется по распределению полного ресурса между самосохранением и репродукцией. Такое распределение в англоязычной литературе получило название “трейдофф” (*tradeoff* — компромисс).

**Ограничения.** Чтобы обеспечить эволюционный успех генотипа, животный организм должен обеспечить мощный репродуктивный аппарат с максимально допустимым значением потребления кислорода  $W_r^*$ . Однако существует очевидный парадокс: чтобы поддерживать значение  $W_r^*$  большим (иметь эффективные органы репродукции), организм должен иметь и более мощный поддерживающий аппарат (а, значит, и большее значение  $W_m$ ). Поэтому распределение энергии в каждый момент времени  $x$  можно охарактеризовать отношением

$W_r/W_m$  (поскольку потребление кислорода на репродукцию с возрастом меняется,  $W_r^* + W_m = \max_x W(x)$ ). Оптимум достигается тогда, когда эта “метаболическая репродуктивная эффективность” генотипа  $MRE$  максимальна:

$$MRE = W_r^*/(W_r^* + W_m) \rightarrow \max_{W_r^*}$$

**Математическое моделирование истории жизни.** Моделирование осуществляется обычным методом с помощью средств системы Matlab [48]. На рис. 9 приведена схема такого моделирования для истории жизни самки дрозофилы *Drosophila melanogaster* (штамм Уэйн Стейт [49]).

Общий расход энергии  $W(x) = W_r(x) + W_m$ . Компонента  $W_m$  считается постоянной, а  $W_r(x)$  — пропорциональной производимому числу яиц  $M(x)$ . Максимальная продуктивность генетически ограничена пределом  $W_r^*$ . Непосредственное измерение  $MRE$  у конкретного генотипа в терминах  $W_r^*$  и  $W_m$  возможно, если одновременно имеются два паттерна — паттерн репродуктивности  $m(x)$  и паттерн потребления кислорода  $W(x)$ . Тогда для самки дрозофилы, минимизируя разницу между измеренным потреблением кислорода и суммой  $W^*(x) = W_r^*(x) + W_m$  при  $W_m = \text{const}$  методом наименьших квадратов, получаем  $W_r^* = 63,7$  и  $W_m = 86,0$  мкл  $O_2$ /день, а  $MRE = 0,425$ . Тогда “кислородная стоимость” одного снесенного яйца  $C_{\text{egg}} = 1,5$  мкл  $O_2$ /яйцо.

**Фенотипическое множество.** Чтобы представить эволюционные возможности, открытые для организма, мы воспроизводим все гипотетические истории жизни, варьируя значения  $W_r^*$  и  $W_m$  в гомеостатической модели старения и используя один и тот же паттерн репродукции при различных амплитудах  $W_r^*$  и константах  $W_m$ .

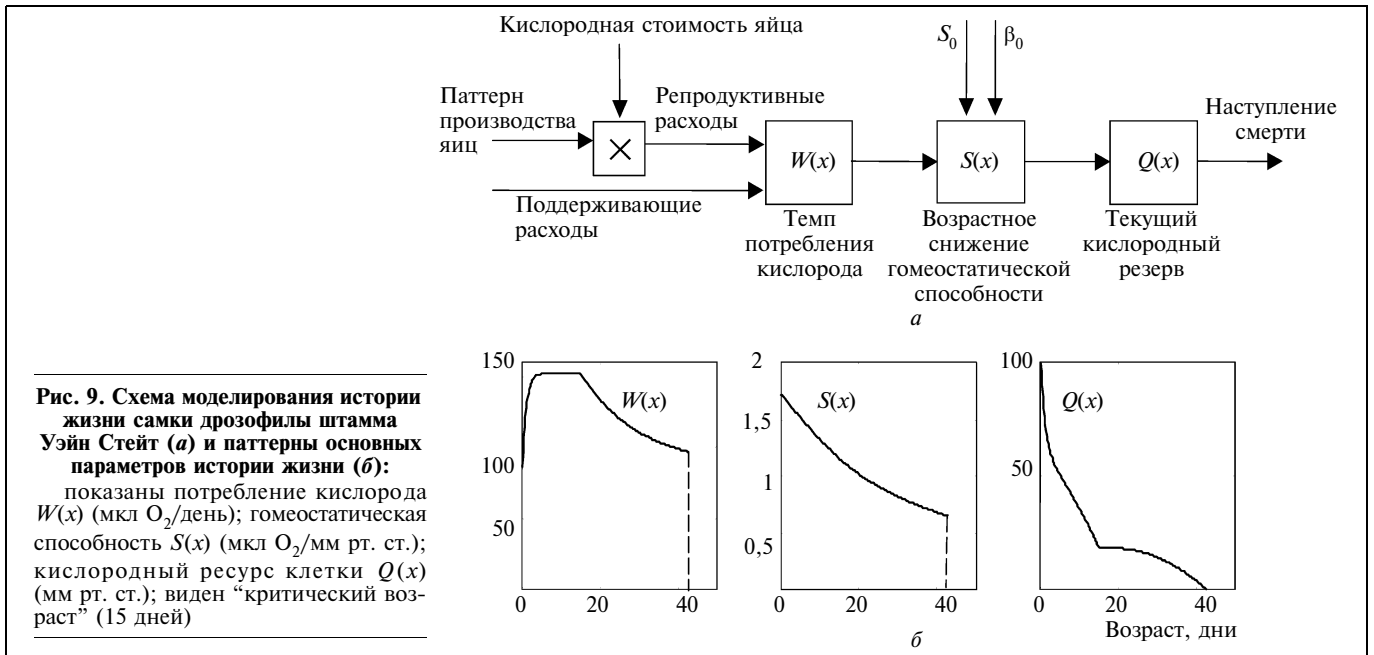
Используя различные комбинации  $W_r^*$  и  $W_m$ , мы получаем соответствующие значения ПЖ и определяем значение репродуктивного успеха (как площадь под кривой репродуктивного паттерна, оканчивающегося при данной ПЖ). Совокупность теоретически возможных кривых  $RS(W_m, W_r^*)$  дана на рис. 10.

“Ступени” на этом рисунке возникают тогда, когда репрезентативная мушка умирает на “репродуктивном плато”, не уменьшая производства яиц в конце жизни. Мушки, пережившие этот критический возраст, существенно продлевают жизнь. Критический возраст (15-й день) виден на рис. 9, з. Инвестиции  $W_m$  представляют собой параметр семейства  $RS(W_m, W_r^*)$ .

**Проверка оптимальности генотипа самки Уэйн Стейт (контрольный штамм).** Для проверки гипотезы оптимальности в статье [37] применен ряд моделей — графическая модель Ван-Ноордвийка — де Йонг [50], эволюционная модель Партридж — Бэртона [47] и модель “одномерной сомы” Кирквуда [51]. Ниже мы рассмотрим только подход Кирквуда.

Теория одномерной сомы анализирует, в основном, расходы на соматическое поддержание  $S$  (не путать с гомеостатической способностью), фактически не обращая внимания на расходы энергии, связанные с репродук-

<sup>4</sup> Сомой (*soma*) называется часть тела животного организма, не связанная с непосредственной передачей наследственного материала (для которой применяется термин *germ line*).



**Рис. 9. Схема моделирования истории жизни самки дрозофилы штамма Уэйн Стейт (а) и паттерны основных параметров истории жизни (б):** показаны потребление кислорода  $W(x)$  (мкл  $O_2$ /день); гомеостатическая способность  $S(x)$  (мкл  $O_2$ /мм рт. ст.); кислородный ресурс клетки  $Q(x)$  (мм рт. ст.); виден “критический возраст” (15 дней)

цией. Теория предсказывает существование оптимального значения  $S^*$ . Это значение расположено ниже предельного уровня  $S'$ , “выше которого демографический темп старения считается равным нулю” [51 с. 16]. Тем самым значение  $S'$  определяет предел существования нестареющих (и теоретически бессмертных) организмов.

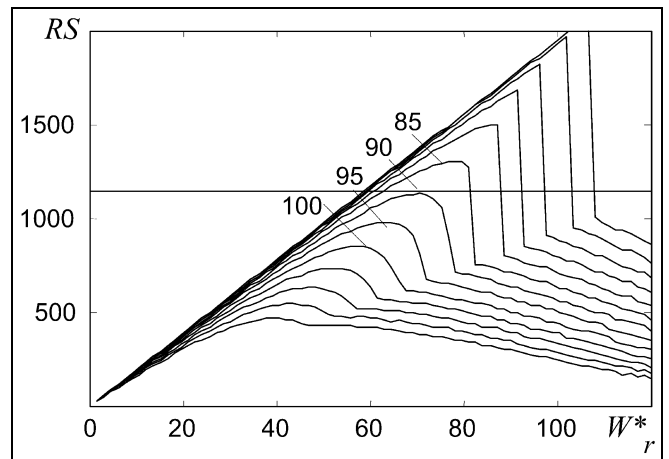
Чтобы представить семейство кривых на рис. 10 как функцию одной переменной кирквудовского типа  $RS(W_m)$ , мы заменим в функции  $RS(W_r, W_m)$  переменную  $W_r$  ее выражением из функции  $MRE = W_r^*/(W_r^* + W_m)$ . Тогда мы получаем функцию одной переменной  $RS(\frac{x}{1-x} W_m, W_m)$ , где символом  $x$  обозначена величина  $MRE$ . Чтобы выяснить, близко ли экспериментально наблюдаемое распределение ресурсов к оптимуму, мы анализируем эту функцию при  $x = 0,425$ . Результирующая кривая  $RS(0,739 W_m, W_m)$  имеет максимум  $RS = 1150$  (яиц за время жизни). Этот максимум расположен в точке  $x = 0,425$ , что соответствует экспериментальным наблюдениям. Таким образом, мы приходим к выводу, что штамм Уэйн Стейт оптимален (рис. 11, а).

Однако следует иметь в виду, что подход Кирквуда обладает существенным недостатком. Максимум  $RS$  получается только при движении по линиям с положительной производной  $dW_r^*/dW_m$ . При движении по линиям с нулевой или отрицательной производной зависимость  $RS(W_m)$ , оказывается, вообще не имеет максимума [52]. В этом проявляется отмеченное выше отсутствие внимания к инвестициям в репродуктивное поведение, которое характерно для модели Кирквуда (рис. 11, б, в).

**Оптимальность коротко- и долгоживущего штаммов Уэйн Стейт.** Логично допустить, что в процессе искусственного отбора на получение долгой и короткой жизни [49] оптимальность исходного штамма исчезает — при изменении условий среды контрольная линия становится неоптимальной. В популяции начинается переходный процесс, который длится несколько поколений

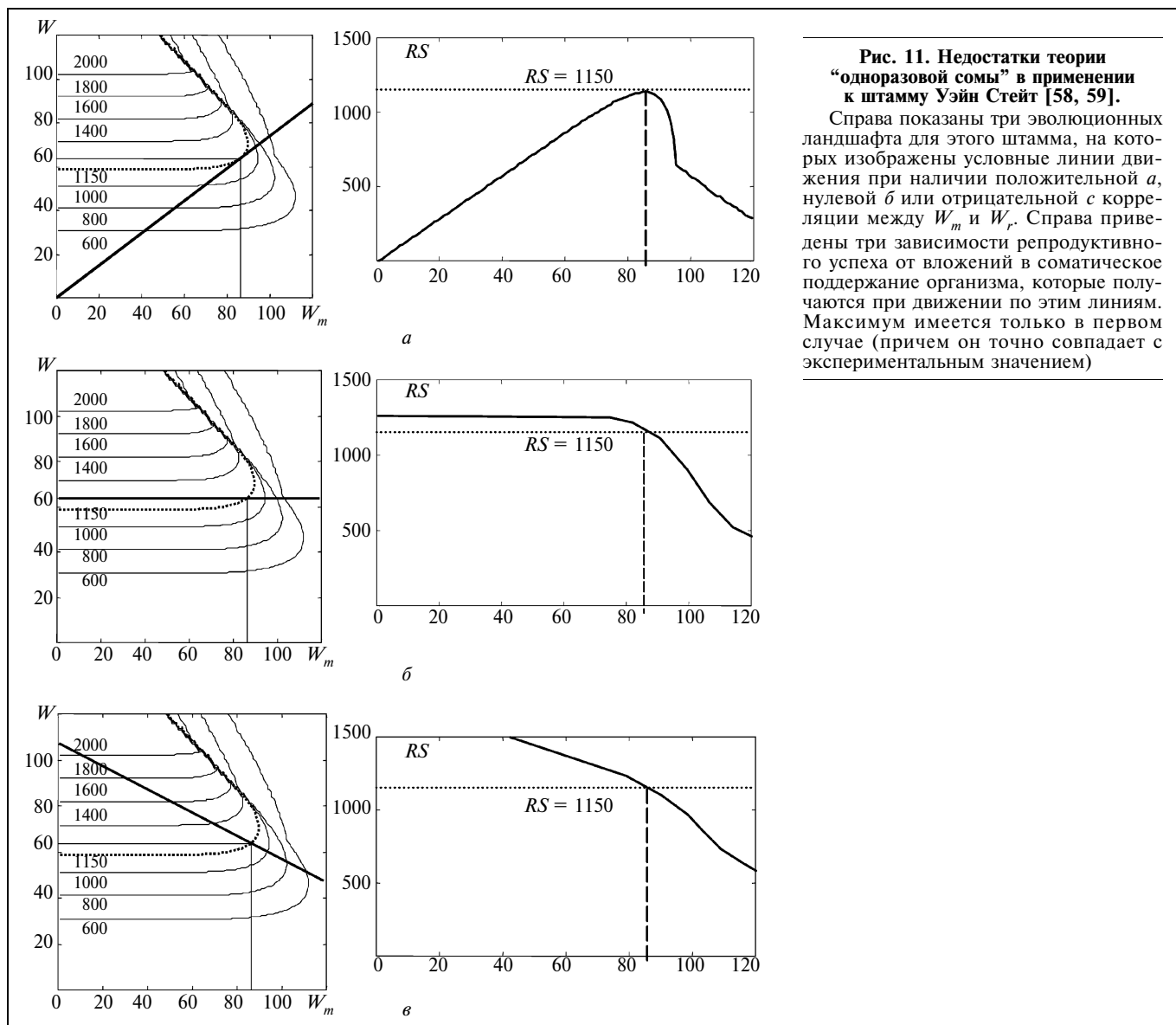
и заканчивается выходом на новый стационарный уровень. По нашим предположениям, искусственная селекция в результате эксперимента, который длится 22 поколения, приводит к появлению новых линий, существенно отличающихся от контрольной линии. Эти линии, по-видимому, оптимальны в новых условиях, когда в репродукции участвуют не все яйца, снесенные мухами в течение жизни, а только их часть (рис. 12).

Сама контрольная линия дрозофилы Уэйн Стейт ( $Ra$ ) при тестировании в нормальных условиях среды, когда для репродукции используются все снесенные яй-



**Рис. 10. Теоретически возможное множество фенотипов для самки дрозофилы.**

Каждая кривая  $RS(W_r^*)$  представляет собой репродуктивный успех  $RS$  (яиц за время жизни) самки в зависимости от вложений в репродуктивный механизм  $W_r^*$  (мкл  $O_2$ /день) при фиксированных вложениях в поддержку  $W_m$ . Четыре значения показаны на рисунке. Приведено 13 кривых  $W_m = 60, 65, \dots, 120$  мкл  $O_2$ /день (сверху вниз). Горизонтальная линия — экспериментально определенное значение  $RS = 1150$

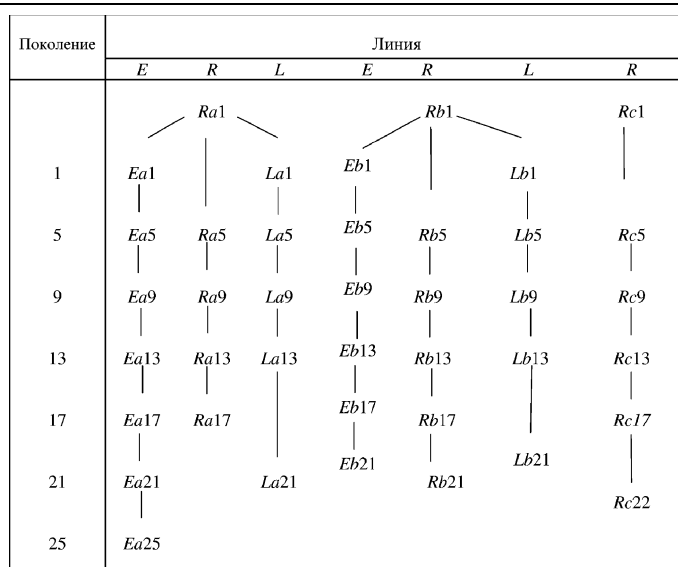


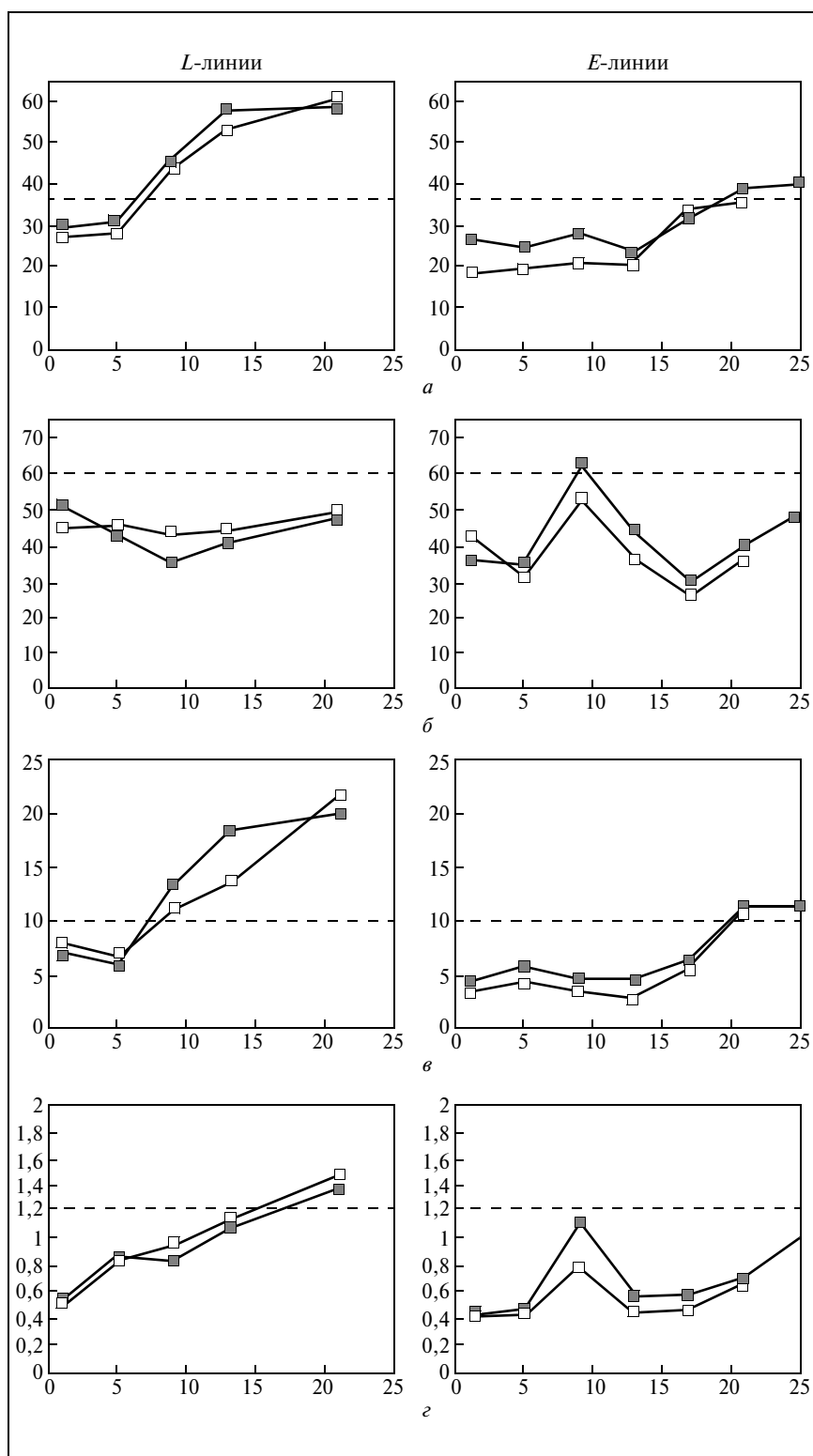
**Рис. 11. Недостатки теории “одноразовой сомы” в применении к штамму Уэйн Стейт [58, 59].**

Справа показаны три эволюционных ландшафта для этого штамма, на которых изображены условные линии движения при наличии положительной  $a$ , нулевой  $b$  или отрицательной  $c$  корреляции между  $W_m$  и  $W_r$ . Справа приведены три зависимости репродуктивного успеха от вложений в соматическое поддержание организма, которые получают при движении по этим линиям. Максимум имеется только в первом случае (причем он точно совпадает с экспериментальным значением)

**Рис. 12. Схема искусственного отбора в популяциях штамма Уэйн Стейт.**

Буквы  $E$ ,  $R$  и  $L$  означают короткоживущую, контрольную и долгоживущую линии. В короткоживущей линии потомство в последующем поколении получается из яиц, снесенных самками текущего поколения только в первую неделю, в долгоживущей линии — только из яиц, снесенных на протяжении последних дней жизни. Остальные снесенные яйца в эксперименте не используются. В контрольных линиях последующее поколение получается из яиц, снесенных в случайный интервал времени на протяжении жизни текущего поколения. Буквы  $a$ ,  $b$  и  $c$  — сестринские линии. Цифры от 1 до 25 означают номер поколения





**Рис. 13. Изменение характеристик жизненного цикла у дрозофилы штамма Уэйн Стейт (долго- (*L*) и короткоживущие (*E*) линии):**

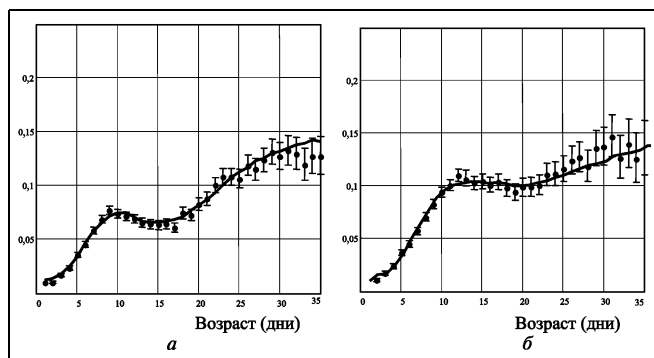
*a* — продолжительность жизни; *b* — репродуктивная способность  $RC$ ; *v* — постоянная времени периода репродуктивного старения  $\tau_{tail}$ ; *z* — репродуктивный успех  $RS$ ; на каждом графике приведены две кривых для двух сестринских линий мух (штрихами показана линия параметра в контрольном эксперименте); удивительно, но практически все эти кривые повторяют друг друга

ца [37], имеет оптимальное распределение энергии между репродукцией и продолжительностью жизни. Но что можно сказать о линиях, которые возникают в процессе искусственной селекции, когда происходит изменение внешних условий? Оптимальны ли “долго-” и “короткоживущие” линии *La*, *Lb* и *Ea*, *Eb*? Если они оптимальны, то какие механизмы приводят их к оптимуму?

Оказывается, что прямое измерение оптимальной истории жизни у дрозофилы можно заменить ее моделированием. Например, в популяции дрозофилы Уэйн Стейт по отношению к нормальной (*Ra*) и долгоживущей (*La*) исходным линиям существуют сестринские линии (*Rb* и *Lb*). Об этих линиях известно, что при одинаковых параметрах истории жизни они существенно различаются по генотипу [53]. На рис. 13 показано, как меняются отдельные параметры истории жизни в зависимости от числа поколений, прошедших в процессе отбора. Оказалось, что параметры паттерна яйценесения у обеих линий меняются практически одинаково — вне зависимости от генотипических особенностей обе линии стремятся к одному и тому же оптимальному фенотипу. Это наблюдение поддерживает идею оптимальности отобранных линий в соответствующих условиях среды.

## 8. ПОПУЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ИСТОРИИ ЖИЗНИ ПЛОДОВЫХ МУШЕК

**Моделирование “молодеющей” популяции мушки *Medfly*.** Американским ученым Дж. Кэри был обнаружен необычный эффект — снижение смертности у девственных самок средиземноморской плодовой мушки в период репродукции [18]. Этот парадоксальный результат означал “реверсию” старения — мухи в соответствии с общепринятым критерием старения в этот период времени “молодели” (рис. 14). Для анализа этого явления и выдвижения правдоподобных гипотез о его механизме требуется перейти от моделирования индивидуального организма плодовой мушки к модели популяции. Для этого в работе [18] была применена приведенная выше модель фенотипической вариативности организмов в генетически однородной популяции, которая описывается уравнением (6). При этом индивидуальные параметры отдельных организмов “разбрасывались” случайным образом, а получающиеся в результате различные индивидуальные истории жизни накаплива-



**Рис. 14.** Экспериментальные кривые смертности в популяции средиземноморской плодовой мушки *Medfly*. Эксперимент *in situ* (сплошная линия) и компьютерные эксперименты *in silico* (точки с доверительным интервалом 95%):

*a* — популяция девственных самок; в возрастах от 10 до 15 дней смертность уменьшается, что позволяет охарактеризовать популяцию как “молодеющую”; *б* — популяция размножающихся самок; увеличенное потребление кислорода из-за возросшей репродукции приводит к выравниванию кривой смертности; в обоих случаях эксперименты *in silico* полностью повторяют результаты реального эксперимента

лись. Затем их параметры обрабатывались точно так же, как в реальном эксперименте.

Чтобы отличать компьютерные эксперименты от реальных, для виртуальных экспериментов был употреблен термин *in silico* [54]. Моделирование *in silico* показало, что популяции мух (1)–(5) при соответствующем выборе потребления кислорода и оксидативной уязвимости в зависимости от возраста полностью повторяют реальный эксперимент [18].

Объяснение этого феномена основывается на том, что в природе самки в период несения яиц защищены от воздействия условий среды за счет благоприятного изменения функции  $\beta(x)$ . Расчеты позволили выдвинуть гипотезу о механизме этого явления. Обычно при репродукции возрастание потребления кислорода  $W(x)$  в репродуктивном периоде компенсируется снижением оксидативной уязвимости организма. Если самка остается девственной, увеличения потребления кислорода не происходит, и, сохраняя пониженную оксидативную уязвимость, она получает определенное преимущество. Смертность в потенциально репродуктивных возрастах снижается, и популяция “молодеет”. Что касается самцов, то их девственная популяция не обладает этим свойством, поскольку при отсутствии самок потребление кислорода у них практически не снижается из-за сложноорганизованного брачного поведения [18].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вопрос надежного и адекватного моделирования сегодня является одной из главнейших проблем анализа сложных систем в различных отраслях человеческой деятельности. Одной из важнейших задач в этой сфере является анализ катастрофических процессов, возникающих в результате взаимодействия междисциплинарных явлений (т. е. явлений, относящихся к различным областям знания). Типичным примером биологической катастрофы является смерть организма в результате старения. При этом смерть организма (с одной стороны,

понятие биологическое, а с другой — демографическое) возникает в результате возрастных нарушений в гомеостатическом комплексе организма (область знаний — физиология) [55, 56].

Ранние теории старения базировались на понятии витальности — интегрированной физиологической способности систем организма поддерживать жизнь своих клеток. Это направление получило свое развитие в рамках теории темпа жизни Р. Пирла, которая трудами Р. Сохала была приближена к теории оксидативных повреждений. Гомеостатическая теория старения, развитая к 2000 г., стала объединяющим этапом в развитии этих теорий.

Если в 1960—1980-х гг. математические модели старения базировались на абстрактной модели витальности, то гомеостатический подход поставил моделирование старения на новую базу. В отличие от гипотетической витальности, гомеостатическая способность легко определяется по экспериментальным данным. Этот подход, будучи соединен с моделью смерти от старости Фриза—Хейфлика, позволил исследовать широкий круг явлений, связанных со старением и смертностью. Во всех случаях использовался один и тот же междисциплинарный подход — гомеостатическая модель старения дополнялась моделью смерти от старости. Однако в каждом конкретном случае эти модели менялись благодаря “встроенным” в модель возможностям варьирования коэффициентами и функциями. Такое варьирование дало возможность в каждом случае рассматривать специфические черты процессов в системе.

В настоящей работе описываются как индивидуумы плодовых мушек, так и их популяции. На индивидуальном уровне прежде всего были исследованы процессы и механизмы, управляющие репродуктивным поведением плодовых мушек. Была выдвинута гипотеза о трех стадиях в процессе репродукции, которая затем была подтверждена на плодовых мушках (дрозофила и средиземноморская плодовая мушка).

Затем был исследован жизненный цикл плодовых мушек, причём было выяснено, что один из наиболее часто используемых в эксперименте штаммов дрозифилы — контрольная линия самок Уэйн Стейт — эволюционно оптимальна. В теории эволюции этот результат носит также принципиальный характер, поскольку практически неизвестны демонстрации оптимальности организмов любого вида. Наконец, математическое моделирование было применено для анализа некоторых интересных свойств в популяциях плодовых мушек. Оказалось, что моделирование может помочь в интерпретации такого явления, как “омоложение” популяций за счет сокращения производства потомства.

Таким образом, междисциплинарное моделирование процессов старения и смертности показало, что оно достигает основной цели математического моделирования в биологических системах — выдвижения биологически правдоподобных и математически корректных гипотез [57]. Действительно, анализ таких гипотез стал основным направлением приложения методов моделирования в биологических исследованиях старения. Мало того, оказалось, что многие из закономерностей старения у плодовых мушек можно перенести и на человека [58, 59]. В частности, это позволило предсказать экспоненциальный характер снижения гомеостатической способности организма человека с возрастом и определить предел видовой продолжительности жизни у человека.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Harman D. The biologic clock: the mitochondria? // Journ. Amer. Geriatr. Soc. — 1972. — Vol. 20. — P. 145–147.
2. Harman D. The free-radical theory of aging // In: Modern biological theories of aging. — H.R. Warner, Sprott R.L., Butler R.N., Shneider E.L. (Eds.). — N.-Y. — 1987. — P. 81–87.
3. Sohal R.S. Oxidative stress hypothesis of aging // Free radical biol. & Med. — 2002. — Vol. 33. — P. 573–574.
4. Orr W.C., Mockett R.J., Benes J.J., Sohal R.S. Effects of overexpression of copper-zinc and manganese superoxide dismutase, catalase, and thioredoxin reductase genes on longevity in *Drosophila melanogaster* // J. Biol. Chem. — 2003. — Vol. 278. — P. 26418–26422.
5. Smith B.A., Edwards M.S., Ballachey B.E., et al. Body weight and longevity in genetically obese and non-obese mice fed fat-modified diet // Growth development and aging. — 1991. — Vol. 55. — P. 81–89.
6. Sohal R.S., Agarwal S., Dubey A., Orr W.C. Protein oxidative damage is associated with life expectancy in houseflies // Proc. Natl. Acad. Sci. — 1993. — Vol. 90. — P. 7255–7259.
7. Mecocci P., Fano G., Fulle S. Age-dependent increases in oxidative damage to DNA, lipids, and proteins in human skeletal muscle // Free Rad. Biol. Med. — 1999. — Vol. 26. — P. 95–103.
8. Rose M.R. Genetics of aging in *Drosophila* // Exp. Gerontol. — 1999. — Vol. 34. — P. 577–585.
9. Guarente L., Kenyon C. Genetic pathways that regulate ageing in model organisms // Nature. — 2000. — Vol. 408. — P. 255–262.
10. Aigaki T., Seong K., Matsuo T. Longevity determination genes in *Drosophila melanogaster* // Mech. Age. Dev. — 2002. — Vol. 123. — P. 1531–1541.
11. Phillips J.P., Parkes T.L., Hilliker A.J. Targeted neuronal gene expression and longevity in *Drosophila* // Exp. Gerontol. — 2000. — Vol. 35. — P. 1157–1164.
12. Perls T., Kunkel L.M., Puca A.A. The genetics of exceptional human longevity // J. Amer. Geriatr. Soc. — 2002. — Vol. 50. — P. 359–368.
13. O'Kane C.J. Modelling human diseases in *Drosophila* and *Caenorhabditis* // Seminars in Cell & Dev. Biol. — 2003. — Vol. 14. — P. 3–10.
14. Rose M.R. Evolutionary biology of aging. Oxford Univ. Press. N.-Y., Oxford, 1991.
15. Orr W.C. Senescence: in search of causality // Dev. Genet. — 1996. — Vol. 18. — P. 93–98.
16. Sohal R.S., Weindruch R. Oxidative stress, caloric restriction and aging // Science. — 1996. — Vol. 273. — P. 59–63.
17. Fleming J.E., Reveillaud I., Niedzwiecki A. Role of oxidative stress in *Drosophila* aging // Mutation Res. — 1992. — Vol. 275. — P. 267–279.
18. Novoseltsev V.N., Carey J., Liedo P., et al. Anticipation of oxidative damage decelerates aging in virgin female medflies: a hypothesis tested by statistical modeling // Exp. Gerontol. — 2000. — Vol. 35. — P. 971–987.
19. Fries J.F. Aging, natural death and the compression of morbidity // New England Journ. Med. — 1980. — Vol. 303. — P. 130–135.
20. Hayflick L. How and why we age // Exp. Gerontol. — 1998. — Vol. 33. — P. 639–653.
21. Новосельцев В. Н. Междисциплинарное моделирование: возможный подход к анализу катастроф // Автоматика и телемеханика. — 1998. — № 2. — С. 101–111.
22. Новосельцев В. Н., Новосельцева Ж. А., Яшин А. И. Старение насекомых. II. Гомеостатическая модель // Успехи геронтологии. — 2000. — № 4. — С. 132–140.
23. Novoseltsev V.N., Novoseltseva J.A., Boyko S.I. and Yashin A.I. Homeostasis and Aging. Slow-Fast Dynamics of Senescence and Death // In: E. Carson and E. Salzsieder (Eds.). — Modelling and Control in Biomedical Systems. — IFAC Symposium. — Karlsruhe / Greifswald. — 2000. — P. 71–76.
24. Strehler G.A., Mildwan A.S. General theory of mortality and aging // Science. — 1960. — Vol. 132. — P. 14–21.
25. Sacher G.A., Trucco E. The stochastic theory of mortality // Ann. N.-Y. Acad. Sci. — 1962. — Vol. 96. — P. 985–1007.
26. Rowell L.B., Sheperd J.T. (Eds). Handbook of Physiology. — Section 12. — Exercise: regulation and integration of multiple systems. — N.-Y.: Oxford University Press, 1996.
27. Van Voorhies W.A., Khazaali A.A., Curtsinger J.W. Selected contribution: long-lived *Drosophila melanogaster* lines exhibit normal metabolic rates // Journ. Applied Physiol. — 2003. — Vol. 95. — P. 2605–2613.
28. Jazwinski S.M. Genetics of aging // Exp. Gerontol. — 1998. — Vol. 33. — P. 773–783.
29. Promislow D.E.L. Senescence in natural populations of mammals: a comparative study // Evolution. — 1991. — Vol. 45. — P. 1869–1887.
30. Mainard Smith J. The effects of temperature and egg-laying on the longevity of *Drosophila Subobscura* // J. Exp. Biol. — 1958. — Vol. 35. — P. 832–841.
31. Новосельцев В. Н. Моделирование естественных технологичеких организмов для исследования процессов управления его жизнедеятельностью // Автоматика и телемеханика. — 1992. — № 12. — С. 96–105.
32. Новосельцев В. Н., Новосельцева Ж. А. Генотипическая и фенотипическая изменчивость организмов // II Съезд биофизиков России. — Институт биофизики клетки РАН. — 1999. — Т. II. — С. 433–434.
33. Новосельцев В. Н., Яшин А.И., Кузнецов Н. А. Математическое моделирование репродукции у насекомых // XI Международный конф. “Новые информационные технологии в медицине и экологии”. — Гурзуф. — 2003. — С. 185–187.
34. Novoseltsev V.N., Novoseltseva J.A., Yashin A.I. What does a fly individual fecundity pattern look like? The dynamics of resource allocation in reproduction and ageing // Mech. Age. Dev. — 2003. — Vol. 124. — P. 605–617.
35. Novoseltsev V.N., Novoseltseva J.A., Boyko S.I., Yashin A.I. What fecundity patterns indicate about aging and longevity: Insights from *Drosophila* studies // Journ. Gerontol. — Biol. Sci. — 2003. — Vol. 58A. — P. 484–494.
36. Novoseltsev V.N., Novoseltseva J.A., Yashin A.I. A homeostatic model of oxidative damage explains paradoxes observed in earlier aging experiments: fusion and extension of older theories of aging // Biogerontology. — 2001. — Vol. 2. — P. 127–138.
37. Novoseltsev V.N., Arking R., Novoseltseva J.A., Yashin A.I. Evolutionary optimality applied to *Drosophila* experiments: hypothesis of constrained reproductive efficiency // Evolution. — 2002. — Vol. 56. — P. 1136–1149.
38. Novoseltsev V.N., Carey J.R., Novoseltseva J.A., et al. Systemic mechanisms of individual reproductive life history in female Medflies. Mechanisms of ageing and development. — 2004. — 125(1): 77–87.
39. Carey J. R., Liedo P., Müller H. G., et al. Relationship of age patterns of fecundity to mortality, longevity, and lifetime reproduction in a large cohort of Mediterranean fruit fly females // J. Geront. — Biol. Sci. — 1998. — Vol. 53A. — P. B245 – B251.
40. Reznick D., Nunney L., Tessier A. Big houses, big cars, superfleas and the costs of reproduction // TREE. — 2000. — Vol. 15. — P. 421–425.
41. Mainard Smith J. Temperature and the rate of aging in poikilotherms // Nature. — 1963. — Vol. 4891. — P. 400–402.
42. Sohal R.S. The rate of living theory: a contemporary interpretation // In: Insect Aging. Strategies and Mechanisms. — Colatz, K.-G., Sohal, R.S (Eds). — Springer-Verlag. — 1986. — P. 23–43.
43. Miquel J., Oro J. L., Bench K. G., Atlan H. Effects of temperature on the life span, vitality and fine structure of *Drosophila melanogaster* // Mech. Age. Dev. — 1976. — Vol. 5 — P. 347–370.
44. Komai Y. Augmented respiration in a flying insect // J. Exp. Biol. — 1998. — Vol. 20. — P. 2359–2366.
45. Dawkins R. The selfish gene. — Second ed. — Oxford: Oxford Univ. Press, 1989.
46. Fisher R. A. The Genetical Theory of Natural Selection. — N.-Y.: Dover Publ., 1958.
47. Partridge L., Barton N. H. Optimality, mutation and the evolution of ageing // Nature. — 1993. — Vol. 362. — P. 305–311.
48. Matlab: the language of technical computing. — Natick, MA, MathWorks Inc. — 1998.
49. Arking R. Successful selection for increased longevity in *Drosophila*: analysis of the survival data and presentation of a hypothesis on the genetic regulation of longevity // Exp. Gerontol. — 1987. — Vol. 22. — P. 199–220.
50. Van Noordwijk A. J., de Jong G. Acquisition and allocation of resources: their influence on variation in life history tactics // Am. Nat. — 1986. — Vol. 128. — P. 137–142.

51. Kirkwood T. B. L. The disposable soma theory of aging // In D. E. Harrison (Ed). Genetic effects on aging II. — Caldwell, NJ: Telford Press, 1990. — P. 9—19.
52. Novoseltsev V. N., Arking R. Homeostatic modeling helps to analyze mechanisms of aging in *Drosophila* // Third European Congress of Biogerontology // Biogerontology. — 2002. — Vol. 3. — P. 83.
53. Arking R., Burde V., Graves K. Identical longevity phenotypes are characterized by different patterns of gene expression and oxidative damage // Exp. Gerontol. — 2000. — Vol. 35. — P. 353—373.
54. Danchin A., Medigue C., Gascuel O., et al. From data banks to data bases // Res. Microbiol. — 1991. — Vol. 142. — P. 913—916.
55. Новосельцев В. Н., Хальфин Р. А., Грибанова Т. Н. Моделирование организма человека в целом для задач управления биосоциальными и биотехническими процессами // Приборы и системы управления. — 1998. — № 6. — С. 66—73.
56. Дагаев В. Н., Новосельцев В. Н. Параметризация фармакокинетических моделей для исследования процессов управления в организме // Автоматика и телемеханика. — 1995. — № 4. — С. 130—144.
57. Новосельцев В. Н., Новосельцева Ж. А., Яшин А. И. Математическое моделирование в геронтологии — стратегические перспективы // Успехи геронтологии. — 2003. — № 12. — С. 149—165.
58. Новосельцев В. Н., Яшин А. И. Почему мы стареем: математические модели истории жизни // Информационные технологии в здравоохранении. — 2002. — № 5—7. — С. 2—11.
59. Новосельцев В. Н. Математическое моделирование организма // Наука в России. — 2003. — № 1. — С. 52—58.

☎ (095) 334-88-91

E-mail: Novoselc@ipu.rssi.ru



УДК 577.71:519.95

# НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОННОГО ТРАНСПОРТА В БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И РОЛЬ СВОБОДНЫХ РАДИКАЛОВ КИСЛОРОДА В СТАРЕНИИ

В. К. Кольтовер

Институт проблем химической физики, г. Черноголовка

Показано, что на основе концепции ограниченной надежности биомолекулярных конструкций можно построить обобщенную теорию, способную объяснить количественные закономерности старения.

## ВВЕДЕНИЕ: КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТАРЕНИЯ

Старение — универсальный процесс, которому подвержены все организмы, как многоклеточные, так и одноклеточные. Внешние, качественные признаки старения весьма разнообразны. Например, у человека с возрастом седеют волосы, а у дрожжевых клеток *Saccharomyces cerevisiae* — увеличивается число “почечных рубцов” на клеточной оболочке. Однако, несмотря на огромное феноменологическое разнообразие видов, старение всех организмов подчиняется (с хорошим приближением) универсальным количественным закономерностям.

Во-первых, существует обратная корреляция между видовой продолжительностью жизни и интенсивностью окислительного метаболизма:

$$TV_0 = 0,8 \cdot 10^8 M^{0,96}, \quad (1)$$

где  $T$  — максимальная продолжительность жизни для животных данного вида (с),  $V_0$  — скорость потребления кислорода в состоянии покоя ( $\text{см}^3/\text{с}$ ),  $M$  — масса тела животного (кг) [1]. Впервые это эмпирическое уравне-

ние было установлено в 1908 г. немецким физиологом М. Рубнером для домашних животных и человека. К настоящему времени оно подтверждено для млекопитающих и животных других видов.

Во-вторых, интенсивность смертности растет при старении по экспоненте:

$$h(t) = h_0 \exp(\gamma t), \quad (2)$$

где  $h_0$  и  $\gamma$  — независимые от времени параметры. Величина  $h(t)$  — это условная вероятность дожить до возраста

$t$ , измеряемая статистически как  $\frac{\Delta n}{\Delta t \cdot n(t)}$ , где  $n(t)$  — чис-

ло живых индивидумов возраста  $t$ ,  $\Delta n$  — число умерших за время  $\Delta t$ . Эту кинетическую закономерность установил Б. Гомпертц в 1825 г., изучавший статистику смертности в Англии. Справедливость “закона Гомпертца” (2) подтверждена для людей (в возрастном интервале примерно от 35 до 90 лет в современном постиндустриальном обществе) и для животных, исследованных в лабораторных условиях — мышей, крыс, плодовых мушек, нематод, моллюсков и др. (см., например, работы [2—4] и цитированную в них литературу). Смертность прока-





риотов *Acholeplasma laidlawii* в стационарной фазе культуры клеток также следует “закону Гомпертца” [5].

Существование универсальных количественных закономерностей позволяет думать, что в основе старения, несмотря на сложность и многообразие его внешних проявлений, лежит некая универсальная причина. Американский химик Д. Харман выдвинул гипотезу о свободных радикалах кислорода как универсальной причине старения живых систем [6]. За прошедшие полстолетия эта идея получила ряд экспериментальных подтверждений в исследованиях патогенеза многих возрастных заболеваний — атеросклероза, сердечно-сосудистых заболеваний, диабета, болезни Альцгеймера и др. На основе этой гипотезы можно объяснить “закон Рубнера” (1): при дыхании возникают свободные радикалы кислорода [6]. Однако за прошедшие полвека стало ясно, что в живых системах нет цепных свободнорадикальных процессов. Поэтому свободнорадикальная гипотеза в своем первоначальном виде не в состоянии объяснить экспоненциального роста смертности (“закона Гомпертца”).

В настоящей работе мы показываем, что возникновение свободных радикалов при дыхании — это одно из следствий общего свойства биосистем, а именно: ограниченной надежности функционирования, лимитированной генетическими программами. На основе концепции ограниченной надежности биосистем можно объяснить и другие экспериментальные данные современной геронтологии, в том числе — количественные закономерности старения.

## 1. ОСНОВНЫЕ ИДЕИ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

Проблема надежности биологических систем охватывает решение таких задач, как классификация отказов, выяснение их количественных закономерностей, физико-химических механизмов и путей реализации в функциональных нарушениях, анализ типов резервирования и механизмов восстановления в биосистемах, разработка методов испытаний надежности биосистем, развитие аппарата математической теории надежности применительно к биосистемам. Исследования в этом направлении в СССР и за рубежом были стимулированы конференциями “Системы надежности клетки” (Киев, 1975 г.) и “Надежность клеток и тканей” (Канев, 1977 г.). В 1978 г. при поддержке академика А. И. Берга при Научном совете по кибернетике АН СССР была создана проблемная комиссия “Надежность биологических систем” (после смерти А. И. Берга — при Научном совете по проблемам биологической физики АН СССР). Комиссия регулярно проводила всесоюзные конференции [7–11], последняя из которых (по надежности и эволюции биосистем) состоялась в Черноголовке в 1989 г.

Подобно техногенным объектам, биологические объекты несовершенны. Нормальное функционирование чередуется со случайными сбоями или отказами. В инженерных дисциплинах надежность технического объекта определяется как его свойство выполнять свою функцию в течение заданного времени в заданных условиях (см., например, книгу [12]). То же самое определение применимо к биологическим объектам [2]. Соответственно, количественной характеристикой надежности работы в интервале времени  $(0, t)$  служит вероятность безотказной работы:

$$R(t) = \text{Prob}(\tau > t) = n(t)/n_0,$$

где  $\tau$  — время безотказной работы объекта в заданном интервале времени, которое является случайной величиной. Статистически надежность измеряется как отношение числа объектов  $n(t)$ , не утративших работоспособность за время  $t$ , к начальному размеру выборки  $n_0$ . Функция  $R(t)$  называется функцией надежности, а ее график зависимости от времени — кривой выживания. Вероятность отказа в том же интервале времени определяется как вероятность противоположного события  $G(t)$ , и равна, соответственно,  $1 - R(t)$ , а производная от нее по времени, т. е. функция плотности распределения  $g(t) = dG/dt$ , называется частотой отказов. Логарифмическая производная от функции  $R(t)$  называется функцией риска (интенсивностью отказов):

$$h(t) = -R'/R = -d(\ln R)/dt.$$

Она представляет собою условную вероятность возникновения отказа в интервале времени  $(t, t + dt)$  при условии, что объект работал безотказно до момента времени  $t$  [2, 12].

Вполне очевидна аналогия между отказом технического объекта и смертью живого “объекта”. Также очевидна аналогия между функциями надежности, частотой отказов, интенсивностью отказов технических систем и, соответственно, функциями выживания, смертностью, интенсивностью смертности людей и животных. Поэтому попытки формального применения в биологии старения стандартных схем и формул математической теории надежности имеют вполне тривиальный характер [4]. На основе теории надежности нетрудно построить модель стареющей системы с растущей во времени функцией интенсивности смертности. Существенно труднее наполнить элементы формальной схемы биофизическим содержанием.

## 2. ЛИМИТИРОВАННАЯ НАДЕЖНОСТЬ ФЕРМЕНТОВ

На всех уровнях организации биосистем центральную роль играют конструкции, которые синтезируются, функционируют и обновляются в соответствии со специальными генетическими программами [13]. Функция фермента как простейшей “молекулярной конструкции” — это катализ конкретной биохимической реакции. Свообразие ферментной конструкции — в ее молекулярных размерах и конформационной лабильности макромолекулы. Ферментативный катализ, будь то химическое превращение субстрата или окислительно-восстановительная реакция электронного транспорта, сопровождается электронно-конформационной перестройкой макромолекулы, т. е. изменением пространственного расположения огромного числа атомов и атомных групп (“конформационной релаксацией”) [13]. Поскольку конструкция молекулярных размеров подвержена флуктуациям параметров среды (температуры и др.), то при электронно-конформационных перестройках случаются сбои (ошибки “конформационной релаксации”). Этот “техногенный подход” к биологическим объектам впервые был сформулирован применительно к электронно-транспортным ферментам в работе [14]. Затем была разработана концепция ограниченной надежности функционирования биомолекулярных конструкций [2, 3, 15–17].

Рассмотрим с этой точки зрения функционирование митохондриальных электронно-транспортных цепей (ЭТЦ). Это мембранные комплексы специализированных “редокс-ферментов”, встроенных во внутреннюю

мембрану митохондрий. Их функция состоит в осуществлении последовательности окислительно-восстановительных реакций переноса электронов от так называемых “субстратов окисления” (никотинамиднуклеотида NADH или сукцината) на цитохромоксидазу и далее на кислород как конечный акцептор электронов с восстановлением его до воды. В этой цепочке окислительно-восстановительных реакций выделяется энергия, которая используется еще одним липопротеидом, АТФ-синтазой, для синтеза универсальной “энергетической валюты” клетки — аденозинтрифосфата (АТФ) (см., например, монографию [13]). Однако ЭТЦ работают с ограниченной надежностью: вместо двухэлектронного восстановления молекулы  $O_2$  до  $H_2O$  случается одноэлектронное восстановление  $O_2$ , и возникает свободный анион-радикал кислорода — супероксидный радикал ( $O_2^{\cdot-}$ ). Этот радикал инициирует химические реакции, в которых происходит окисление ДНК, белков, липидов и других биомолекул, т. е. он токсичен [18–20]. Поэтому с точки зрения теории надежности элементарный акт электронного переноса, в результате которого возникает радикал  $O_2^{\cdot-}$ , представляет собой сбой (“отказ”) в работе ЭТЦ.

Наименее надежным оказалось то звено ЭТЦ, в состав которого входит так называемый коэнзим Q (CoQ). Этот кофермент, принимая электрон от NADH-дегидрогеназы или сукцинатдегидрогеназы, восстанавливается до семихинонного радикала (CoQ $\cdot$ ), который затем окисляется, передавая электрон следующему редокс-ферменту ЭТЦ, так называемой редуктазе цитохрома c. Однако, время от времени, в работе этого “одноэлектронного челнока” случается сбой: электрон от семихинонного радикала CoQ $\cdot$  передается не очередному редокс-ферменту ЭТЦ, а случайно подвернувшейся молекуле кислорода, в результате чего возникает свободный радикал  $O_2^{\cdot-}$  (“свободнорадикальный отказ”).

Интенсивность таких отказов в интактных митохондриях близка к нулю. В клетках, однако, имеются митохондрии с поврежденной (“изношенной”) структурой. Например, повреждаются митохондрии, испытывавшие, хотя бы кратковременно, гипоксию или ишемию. Интенсивность генерации радикалов кислорода в таких митохондриях резко возрастает. В наших экспериментах с митохондриями, выделенными из сердца крыс, было показано, что после гипоксии или ишемии увеличивается вероятность реакции автоокисления семихинонного радикала CoQ $\cdot$  кислородом и образования  $O_2^{\cdot-}$  [21]. Причиной этого оказалась пониженная вязкость мембранных липидов поврежденных митохондрий, из-за чего повышается флуктуационная подвижность липопротеидов и, соответственно, снижается точность адресной передачи электрона молекулами CoQ $\cdot$  [22]. Отметим, что гипоксия — это обычное состояние тканей старых животных, в особенности — сердца и скелетных мышц, поэтому митохондрии, выделенные, например, из сердца старых крыс, характеризуются существенно более высокой, чем митохондрии молодых животных, интенсивностью генерации  $O_2^{\cdot-}$  и других активных форм кислорода (продуктов реакций  $O_2^{\cdot-}$ ) [22].

Учитывая экспериментальные данные об интенсивности генерации и средней концентрации  $O_2^{\cdot-}$ , можно

оценить, что возникновение радикалов  $O_2^{\cdot-}$  в митохондриях происходит с интенсивностью  $\lambda \approx 0,25 \text{ с}^{-1}$  [15, 17].

В митохондриях имеется специализированный антиоксидантный фермент, митохондриальная супероксиддисмутаза (mtSOD), который катализирует реакцию дисмутации  $O_2^{\cdot-}$  в пероксид водорода ( $H_2O_2$ ) и обычный кислород ( $O_2$ ), тем самым защищая субклеточные структуры от  $O_2^{\cdot-}$  и его продуктов [18]. Полагая, что элементарные акты устранения супероксидных радикалов — это случайные события, можно оценить, что устранение радикалов  $O_2^{\cdot-}$  ферментом происходит с интенсивностью

$$\mu \approx -\Delta n(t)/n(t)\Delta t = k_e[E] \approx 1,3 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1},$$

где  $\Delta n(t)$  — число радикалов, устраняемых за время  $\Delta t$ ,  $k_e$  и  $[E]$  — константа скорости ферментативной реакции и концентрация mtSOD, принимаемые приблизительно равными, соответственно,  $(2...3) \cdot 10^9 \text{ М}^{-1}\text{с}^{-1}$  и  $(0,4...0,5) \cdot 10^{-5} \text{ М}$  [18]. Тогда в рамках той же модели “размножения и гибели” получается, что вероятность “просачивания” радикала  $O_2^{\cdot-}$  через mtSOD-защиту

$$z = (\lambda/\mu)/(1 + \lambda/\mu) \approx 1,9 \cdot 10^{-5},$$

т. е. приблизительно два радикала из 100 000.

Биохимические механизмы цитотоксичности  $O_2^{\cdot-}$  не вполне ясны, однако в литературе уже утвердился термин “окислительный стресс”, под которым понимается вред, наносимый организму продуктами химических реакций свободных радикалов кислорода. Показано, что  $O_2^{\cdot-}$  и другие активные формы кислорода инициируют запрограммированную гибель клеток — апоптоз. Тем самым осуществляется, по-видимому, выбраковка клеток с плохими митохондриями, генерирующими слишком много  $O_2^{\cdot-}$  [20].

### 3. СВОБОДНОРАДИКАЛЬНЫЕ ОТКАЗЫ

Известны два основных метода создания надежных устройств из ненадежных функциональных элементов: резервирование и восстановление (или ремонт) отказавших элементов [12]. Известно также, что если функциональные элементы заменять только по мере того, как они выходят из строя, то интенсивность отказов системы становится недопустимо высокой. Чтобы уменьшить интенсивность отказов, необходимо обеспечить профилактическую замену элементов — до того, как они выходят из строя из-за износа. Своевременные профилактические замены повышают надежность систем в сотни раз [12].

Естественно полагать, что высокая надежность биосистем, как и технических, обеспечивается, прежде всего, путем профилактических замен элементов. Более того, количество макромолекулярных конструкций в любой клетке так велико, что вряд ли возможно своевременное узнавание и устранение повреждений “постфактум”. Надежность на клеточном уровне организации обеспечивается путем непрерывного “кругооборота” белков, липидов, митохондрий и т. д. Например, половина митохондрий в клетках миокарда крысы обновляется за 17,5 сут., а эритроцит в крови человека живет в среднем



126 сут. Имеются экспериментальные данные о возрастном снижении интенсивности этого обновления [23]. Поэтому, если предположить, что в соответственных генетических программах заложено возрастное снижение интенсивности и (или) точности профилактических замен, то это должно с неизбежностью привести к снижению с возрастом надежности системы как целого и к ее гибели. Далее изложена теория старения, построенная на этой основе.

#### 4. ТЕОРЕТИКО-НАДЕЖНОСТНАЯ МОДЕЛЬ СТАРЕНИЯ

Принимая во внимание структурно-функциональную неоднородность и связанную с ней иерархичность живых систем, мы сформулировали *первый постулат* теории: существование в организме конечного числа  $N$  критических структур (КС).

*Второй постулат*: со временем в КС происходят необратимые изменения стохастического характера — повреждения, вызванные активными формами кислорода и другими причинами. По сути — это статистическая задача о накоплении случайных структурных дефектов в линейном полимере. Введем параметр  $m_j$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ) “длины дефекта” в начальный момент времени  $t = 0$ . Вид функции плотности распределения  $f$  для этой случайной выборки должен, в принципе, определяться экспериментальным путем, но можно попытаться его “угадать”. Очевидно, что протяженные по длине дефекты менее вероятны, чем относительно короткие дефекты. Следовательно, функция  $f$  должна быть асимметричной. Поэтому в качестве первого приближения можно взять экспоненциальное распределение как простейший тип асимметричного распределения случайной величины. Следует также принять во внимание пороговые эффекты, которыми характеризуются важнейшие процессы в биосистемах, как, например, триггерный механизм проведения нервного импульса, конформационные превращения ДНК и белков и т. д. Таким образом, в первом приближении можно принять для функции распределения начальных дефектов экспоненциальное усеченное распределение с плотностью:

$$f(m) = \alpha \exp(-\alpha m) / [1 - \exp(-\alpha m_c)],$$

где  $\alpha > 0$  — параметр распределения,  $0 < m < m_c$ .

Далее, полагая, что каждая из КС является одинаково жизненно важной, вводим *третий постулат* теории: смерть наступает в тот момент, когда отказывает любая из КС. Тогда длительность жизни индивидуума  $\tau = \min \tau_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, N$ , где  $\tau_j = b(m_c - m_j)$ . Параметр  $b > 0$  имеет смысл величины, обратной скорости возрастных изменений в КС. Для простоты предполагается, что параметры  $m_c$ ,  $\alpha$  и  $b$  одинаковы для всех КС и не зависят от времени. Тогда функция выживания получается просто как функция распределения минимального значения для случайной выборки размера  $N$ :

$$R(t) = \{1 - [\exp(\gamma t) - 1] / [\exp(\gamma T) - 1]\}^N,$$

где  $T = bm_c$ ,  $\gamma = \alpha/b$  [15, 16]. Из этого выражения для значений  $t$ , не слишком близких к значению  $T$ , легко получить

$$R(t) \approx \exp\{(h_0/\gamma)[1 - \exp(\gamma t)]\}$$

и соответствующее выражение для функции интенсивности смертности:

$$h(t) = -d(\ln R)/dt = h_0 \exp(\gamma t), \quad (3)$$

в котором  $h_0 = \gamma N / [\exp(\gamma T) - 1]$ . Формула (3) эквивалентна формуле (2). Таким образом, в рамках этой простой математической модели выводится “закон Гомпертца”.

Для реальных популяций человека известны случаи отклонения кривых интенсивности смертности от “закона Гомпертца” в области больших значений  $t$ . Было показано, что эти отклонения можно объяснить гетерогенностью реальных популяций, т. е. вариабельностью индивидуумов (генетической, демографической и др.), вводя соответствующие функции распределения в параметры модели, например, полагая, что значения  $T$  и  $\gamma$  подчиняются гауссовому распределению [24].

Величина  $T$  — это продолжительность жизни “идеального” индивидуума, не имеющего дефектов в начальный момент времени. Действительно, каждый вид характеризуется своей предельной продолжительностью жизни. Например, в природе не встречаются мыши старше трех лет, обезьяны старше 50-ти и люди старше 120-ти (если не принимать во внимание мифы и газетные сказания). Если, согласно литературным данным, принять, что максимальная продолжительность жизни человека равна примерно 95-ти годам,  $\gamma \approx 0,0612 \dots 0,119 \text{ год}^{-1}$  и  $h_0 \approx 0,82 \dots 0,022 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$ , то, учитывая полученное выражение для  $h_0$ , находим  $N \approx 5 \dots 15$  [16]. По своему порядку эта оценка совпадает с известным к настоящему времени числом так называемых “генов продолжительности жизни” [25]. Например, мутация гена “*age-1*” в клетках нематоды *Caenorhabditis elegans* приводит к 65%-му увеличению продолжительности жизни червей. При этом отмечен существенный рост активности антиоксидантных ферментов СОД и каталазы в клетках мутанта. Аналогичные результаты известны также для мышей и мух дрозофил [25].

Для случая генетических повреждений, вызываемых супероксидными радикалами, модель дает следующее выражение для максимальной продолжительности жизни [16]:

$$T = bm_c \approx m_c / [(qV/E)u + D], \quad (4)$$

в котором  $q$  — вероятность сбоя митохондриальной ЭТЦ с образованием  $O_2^-$ ,  $V$  — скорость дыхания,  $E$  — активность mtSOD,  $u$  — вероятность реализации генетических дефектов, индуцированных свободными радикалами, в функциональных нарушениях КС,  $D$  — коэффициент, учитывающий роль других факторов в старении (помимо активных форм кислорода). По сути, формула (4) эквивалентна формуле (1): отрицательная корреляция между видовой продолжительностью жизни и уровнем потребления кислорода. Таким образом, в рамках нашей модели находит объяснение “закон Рубнера”.

Уравнение (4) предсказывает существование линейной зависимости между величинами  $1/T$  и  $V/E$ . Воспользовавшись известными из литературы результатами измерений активности СОД в тканях мозга, сердца и печени животных 13 видов и человека, а также соответствующими данными об интенсивности основного обмена и максимальной продолжительности жизни, мы действительно получили в этих координатах прямые линии.

Например, для мозга было получено следующее выражение:

$$1/T = (0,0132 \pm 0,0002)(V/E) + (0,004 \pm 0,002), \\ r = (0,997 \pm 0,002), \quad (5)$$

где  $r$  — коэффициент корреляции.

Из значения свободного члена уравнения (5) получаем, что продолжительность жизни могла бы достичь  $1/0,004 = 250$  лет при неограниченно высокой надежности защиты от  $O_2^{\cdot-}$  (при  $E \rightarrow \infty$ ). Аналогичные линейные корреляции были получены для печени и сердца с предельными значениями, соответственно, 200 и 100 лет [3, 17].

Можно предположить, что “критические структуры” — это специализированные регуляторные гены, которые локализованы в хромосомах специализированных клеток, например, гипоталамуса, и контролируют системы надежности клеток и тканей. Вполне вероятно, что эти гены управляют профилактическими заменами (биосинтезом) малонадежных биомолекулярных конструкций, в том числе — электрон-транспортных ферментов, СОД и др. Известно, что на концах хромосом имеются так называемые “теломерные повторы” ( $TTAGGG$ )<sub>n</sub>. Согласно А. М. Оловникову, длина теломерного повтора уменьшается с каждым делением клетки, и чем больше раз поделится клетка, в которой находятся данные хромосомы, тем короче становятся их теломерные концы [26]. Можно предположить, что с возрастом, когда теломерные концы обрезаются до критической величины ( $m_c$ ), то это приводит к фатальному снижению надежности функционирования генов, локализованных в соответственных хромосомах, и, соответственно, к фатальному снижению эффективности защиты клеток и тканей от свободных радикалов и других неблагоприятных факторов. Таким образом, свободнорадикальную теорию старения Д. Хармана [6] и теорию теломерной маргинотомии А. М. Оловникова [26] удастся объединить на основе теории надежности.

## 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПУТИ ПРОДЛЕНИЯ ЖИЗНИ

В соответствии с уравнением (4) для продления жизни необходимо снижать уровень генерации радикалов кислорода и повышать надежность защиты от них. Так, например, при калорийно-ограниченной диете, с помощью которой удается существенно продлить жизнь животным различных видов, от рыб до приматов, по-видимому, снижается общее потребление кислорода организмом [27]. Чем ниже потребление кислорода (параметр  $V$ ), тем меньше образуется радикалов  $O_2^{\cdot-}$  как побочных метаболитов дыхания. Привели к успеху эксперименты по продлению жизни мух путем усиления экспрессии ферментов СОД и каталазы [28]. В этом случае имеет место увеличение параметра  $E$  антиоксидантной защиты. Фибробласты человека совершают примерно не более 50 удвоений, а затем погибают либо мутируют в раковые клетки (так называемый “предел Хейфлика”). Удалось, однако, преодолеть этот предел на 20 и более удвоений путем введения в нормальные клетки гена, кодирующего теломеразу — фермент, достраивающий недорепарированные теломерные концы хромосом [29]. По нашей модели в этом случае существенно увеличивается допустимый порог накопления повреждений в “критических структурах” (параметр  $m_c$ ).

Рассмотрим с теоретико-надежностной точки зрения эксперименты по продлению жизни с помощью ингибиторов свободнорадикальных реакций перекисного окисления — так называемых антиоксидантов. Например, удалось продлить на 38% среднюю продолжительность жизни мышей с помощью эмоксипина (2-этил-6-метил-3-оксипиридин) [30]. Такой же эффект был достигнут в экспериментах с дрозофилами с помощью дибунола (он же — ионол, 4-метил-2,6-дитретбутилфенол, ВНТ) [6, 27]). В химических системах эти вещества действительно способны перехватывать активные радикалы кислорода. Маловероятно, однако, что в биосистемах они действуют по антиоксидантному механизму. Например, известно, что константы скоростей реакций антиоксидантов с радикалом  $O_2^{\cdot-}$  не превышают  $10^2 M^{-1}c^{-1}$ , что делает их просто неспособными конкурировать за  $O_2^{\cdot-}$  со специализированным антиоксидантным ферментом СОД, у которого эта константа около  $10^9 M^{-1}c^{-1}$ . Радикал  $OH^{\cdot}$ , который возникает в реакции  $O_2^{\cdot-}$  с  $H_2O_2$  в присутствии ионов металлов переменной валентности (реакция Фентона), является настолько сильным окислителем, что он реагирует с одинаково высокой константой скорости, близкой к диффузионному пределу ( $10^{10} \dots 10^{11} M^{-1}c^{-1}$ ) с любой органикой и, соответственно, в условиях клетки его просто невозможно перехватить никаким антиоксидантом. Отметим, что и многие другие представления “свободнорадикальной медицины” не выдерживают аналогичного химико-кинетического анализа (например, об антиоксидантном механизме действия природных “антиоксидантов” аскорбата и альфа-токоферола). Сомнения в антиоксидантном механизме действия “антиоксидантов” *in vivo* было высказано нами давно [17]. Аналогичные сомнения появились недавно и в зарубежной литературе [31].

Согласно уравнению (5) можно добиться увеличения продолжительности жизни путем повышения надежности работы ЭТЦ — понизив вероятность ( $q$ ) сбоя ЭТЦ, при которых возникают радикалы  $O_2^{\cdot-}$ . По-видимому, именно таким образом продлевает жизнь антиоксидант ВНТ. Было показано, что инъекции ВНТ крысам приводят к увеличению степени оксигенации митохондрий сердца [32]. Между тем, для тканей старых животных характерно состояние гипоксии. Известно также, что при гипоксии митохондрии сердца повреждаются, превращаясь в генераторы интенсивных потоков  $O_2^{\cdot-}$ , т. е. гипоксия приводит к снижению надежности работы митохондриальных ЭТЦ [21, 22]. Можно предположить, что ВНТ, повышая степень оксигенации митохондрий, предотвращает это нежелательное последствие гипоксии, повышая, фактически, значение параметра  $q$  надежности работы митохондриальных ЭТЦ. Таким образом, ВНТ действительно оказывает антиоксидантное действие, но делает это не путем прямого перехвата радикалов, а косвенно — снижая уровень их генерации в митохондриях. Поскольку при инъекциях ВНТ мы наблюдали возникновение спектра электронного парамагнитного резонанса нитрозильных комплексов гемоглобина в крови животных, то можно полагать, что действие этого и других антиоксидантов опосредовано через монооксид азота (NO) и гормональную регуляцию редокс-гомеостаза [32].



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулированный нами подход к проблеме старения живых систем основан на концепции генетически детерминированной надежности работы биосистем на всех уровнях организации. Первостепенное значение имеет ограниченная надежность работы митохондриальных электронно-транспортных цепей, при сбоях которых образуются супероксидные радикалы. Активные формы кислорода инициируют свободнорадикальные повреждения в ДНК и других биоструктурах, которые накапливаются с возрастом. Поскольку эти повреждения происходят на молекулярном уровне, то они имеют случайный характер и, в этом смысле, можно утверждать, что процесс старения имеет стохастический характер. Долговечность живых систем обеспечивается, прежде всего, профилактическим путем: предотвращение свободнорадикальных повреждений благодаря специализированным антиоксидантным ферментам, предотвращение отказов функциональных элементов благодаря непрерывной замене (“кругообороту”) белков, мембранных липопротеидов и др. Однако, поскольку надежность всех систем защиты и восстановления ограничена генетической программой, то ограничена и продолжительность жизни: она детерминирована “сверху” генетической программой. Таким образом, старение имеет детерминированно-стохастический характер: генетическая предопределенность надежности бимолекулярных конструкций и стохастическая реализация этой программы. Обобщенная таким образом свободнорадикальная теория объясняет, даже в рамках простой математической модели, основные количественные закономерности старения (“законы” Гомпертца и Рубнера) и согласуется с другими экспериментальными данными биогеронтологии. В ряде случаев кинетика смертности реальных популяций, например мух дрозофил, существенно отклоняется от простого гомпертцовского типа [33]. Очевидно, однако, что на той же принципиальной основе может быть построена более сложная модель, учитывающая функциональные взаимодействия между критическими структурами, изменения параметров во времени и другие “нелинейные” эффекты, которые необходимо принять во внимание для более адекватного математического описания онтогенеза и старения сложных систем.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Azbel M. Y. Mortality invariants and their genetic implications // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. — 1998. — Vol. 95. — P. 9037–9041.
2. Гродзинский Д. М., Войтенко В. П., Кутлахмедов Ю. А., Кольтовер В. К. Надежность и старение биологических систем. — Киев: Наукова думка, 1987. — 172 с.
3. Koltover V. K. Reliability concept as a trend in biophysics of aging // J. Theor. Biol. — 1997. — Vol. 184. — P. 157–163.
4. Gavrilov L. A., Gavrilova N. S. J. The reliability theory of aging and longevity // J. Theor. Biol. — 2001. — Vol. 213. — P. 527–545.
5. Капитанов А. Б., Аксенов М. Ю., Татищев О. С., Кольтовер В. К. Культура клеток *Acholeplasma laidlawii* как объект для изучения возрастных изменений плазматических мембран // Докл. АН СССР. — 1985. — Т. 281. — № 1. — С. 186–189.
6. Harman D. Free radical theory of aging: History // Free Radicals and Aging. I. Emerit, B. Chance (Eds.). — Basel: Birkhauser, 1992. — P. 1–10.
7. Системы надежности клетки // Ред. Д. М. Гродзинский. — Киев: Наукова думка, 1977. — 168 с.
8. Надежность клеток и тканей // Ред. Д. М. Гродзинский. — Там же, 1980. — 211 с.

9. Надежность биологических систем // Ред. Д.М. Гродзинский, Ю. А. Кутлахмедов, И. Н. Гудков. — Там же, 1985. — 224 с.
10. Надежность и элементарные события процессов старения биологических объектов // Ред. Д.М. Гродзинский, Ю. А. Кутлахмедов. — Там же, 1986. — 208 с.
11. Надежность и гомеостаз биологических систем // Ред. Д.М. Гродзинский, Ю. А. Кутлахмедов. — Там же, 1987. — 192 с.
12. Базовский И. Надежность. Теория и практика. — М.: Мир, 1965. — 373 с.
13. Блюменфельд Л. А. Проблемы биологической физики. — М.: Наука, 1977. — 336 с.
14. Блюменфельд Л. А., Кольтовер В. К. Трансформация энергии и конформационные переходы в митохондриальных мембранах как релаксационные процессы // Мол. биол. — 1972. — Т. 6. — С. 161–166.
15. Кольтовер В. К. Надежность ферментативной защиты клетки от супероксидных радикалов и старение // Докл. АН СССР. — 1981. — Т. 256. — № 1. — С. 199–202.
16. Кольтовер В. К. Надежность ферментных систем и молекулярные механизмы старения // Биофизика. — 1982. — Т. 27. — С. 614–617.
17. Кольтовер В. К. Надежность электрон-транспортных мембран и роль анион-радикалов кислорода в старении. Дисс. ... д-ра биол. наук / Ин-т физиол. им. А. А. Богомольца АН Украины. — Киев, 1987. — 351 с.
18. McCord J. M. Superoxide dismutase in aging and disease: An overview // Superoxide Dismutase. Meth. Enzymol. — 2002. — Vol. 349. — P. 331–341.
19. Кольтовер В. К. Исторические предпосылки и эволюция свободнорадикальной теории старения // Проблемы старения и долголетия. — 2000. — Т. 9. — № 1. — С. 78–89.
20. Skulachev V. P. The programmed death phenomena, aging, and the Samurai law of biology // Exp. Gerontol. — 2001. — Vol. 36. — № 7. — P. 995–1024.
21. Nohl H., Koltover V., Stolze K. Ischemia/reperfusion impairs mitochondrial energy conservation and triggers CO<sup>•+</sup> release as a byproduct of respiration // Free Radical Res. Comms. — 1993. — Vol. 18. — P. 127–137.
22. Кольтовер В. К. Надежность митохондриальных электрон-транспортных мембран и роль супероксидных радикалов в старении // Хим. физика. — 1996. — Т. 15. — С. 101–106.
23. Terman A., Brunk U. T. Myocyte aging and mitochondrial turnover // Exp. Gerontol. — 2004. — Vol. 39. — P. 701–705.
24. Кольтовер В. К., Андрианова З. С., Иванова А. Н. Моделирование кривых выживания и смертности популяций человека на основе теории надежности // Изв. РАН. Сер. биол. — 1993. — № 1. — С. 121–129.
25. Barzilai N., Shuldiner A. R. Searching for human longevity genes: The future history of gerontology in the post-genomic era // J. Gerontol. — 2001. — Vol. 56. — P. M83–M87.
26. Olovnikov A. M. Telomeres, telomerase, and aging: Origin of the theory // Exp. Gerontol. — 1996. — Vol. 31. — P. 443–448.
27. Фролькис В. В., Мурадян Х. К. Экспериментальные пути продления жизни. — Л.: Наука, 1988. — 248 с.
28. Mockett R. J., Bayne A. C. V., Kwong L. K., et al. Ectopic expression of catalase in *Drosophila* mitochondria increases stress resistance but not longevity // Free Radocal Biol. Med. — 2003. — Vol. 34 — P. 207–217.
29. Bodnar A. G., Ouellette M., Frolkis M., et al. Extension of life-span by introduction of telomerase into normal human cells // Science. — 1998. — Vol. 279. — P. 349–352.
30. Обухова Л. К. Вклад академика Н. М. Эмануэля в развитие отечественной геронтологии: свободнорадикальные механизмы в процессе старения // Успехи геронтологии. — 1999. — Т. 3. — С. 27–31.
31. Azzi A., Davies K., Kelly F. Free radical biology — terminology and critical thinking // FEBS Lett. — 2004. — Vol. 558. — P. 3–6.
32. Koltover V. K. The antihypoxic action of antioxidant BHT mediated via nitric-oxide: A study of EPR signals in tissues of rats of different ages // J. Amer. Aging Ass. — 1995. — Vol. 18. — P. 85–89.
33. Arking R., Buck S., Novoselov V. N., et al. Genomic plasticity, energy allocations, and the extended longevity phenotypes of *Drosophila* // Aging Res. Revs. — 2002. — Vol. 1. — P. 209–228.

☎ (096) 522-25-81

E-mail: koltover@icp.ac.ru



# УПРАВЛЕНИЕ СТАРЕНИЕМ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬЮ ЖИЗНИ

А. И. Михальский<sup>1</sup>, А. И. Яшин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем управления им В. А. Трапезникова, г. Москва

<sup>2</sup>Университет Дьюка, г. Дюрам, США

Отмечено, что накопленные данные о факторах, влияющих на процессы старения и продолжительность жизни, позволяют ставить задачу управления этими процессами на уровне клетки, органа, организма, популяции. Подчеркнуто, что накопленный в биологии, медицине, геронтологии и демографии опыт требует обобщения с позиций, позволяющих учитывать общие закономерности процессов, протекающих в разнотипных системах. Дан анализ результатов экспериментов по влиянию различных факторов на продолжительность жизни червей *C.elegans* и данных по инвалидизации людей в старших возрастах. На основании полученных результатов указаны потенциальные пути управления старением и увеличением продолжительности жизни.

*Всех же дней Мафусала было девятьсот шестьдесят девять лет; и он умер.*  
Первая книга Моисеева. Бытие 5:27.

## ВВЕДЕНИЕ

Старение живых организмов хорошо знакомо всем, но в то же время оно является процессом с непонятными закономерностями и противоречивыми причинно-следственными связями. Даже само определение старения вызывает трудности из-за разнообразия его проявлений. Обычно старение организма связывают со снижением репродуктивной функции, изменением гормонального статуса и связанными с этим внешними изменениями. Одновременно наблюдаются дегенеративные явления в сердечно-сосудистой системе, потеря эффективности иммунной системы, накопление ошибок в геноме при делении клеток стареющего организма. Вся совокупность этих процессов ведет к снижению сопротивляемости организма по отношению к негативным внешним воздействиям и повышению риска гибели. В современной литературе принято отождествлять феномен старения и явление повышения риска гибели в процессе жизнедеятельности [1]. Увеличение во времени риска гибели считается признаком старения организма, а темп увеличения этого риска — скоростью старения. При этом важно отличать риск гибели, связанный с дегенеративными процессами в организме, от риска, обусловленного неблагоприятными внешними факторами. Для животных это сезонные изменения, наличие хищников, для человека — травматизм, инфекционные заболевания. Существует множество физиологических показателей и биомаркеров, связанных со старением. Однако эти

показатели, характеризующие состояние отдельных систем организма, не характеризуют весь процесс потери жизнеспособности и могут рассматриваться лишь как вспомогательные характеристики [2].

Медицина и биология рассматривают процесс старения как дегенерационные проявления в организме и его частях. Геронтология позволяет смотреть на старение системно в пределах организма, а демография в пределах популяции. Кибернетика позволяет с единых позиций дать абстрактные описания процессов, протекающих на различных уровнях от клетки до популяции, и выявить их взаимосвязь. Выяснение ключевых состояний и условий, при которых происходит изменение свойств процесса старения, а также характерных воздействий, способных приостановить его — это задача науки управления. Зная структуру процесса старения и управляемую компоненту в нем, становится возможным прогнозировать будущее состояние индивидуума и популяции, оценивать результаты и эффективность методов и мероприятий по профилактике старения и по продлению жизни.

В статье рассмотрены примеры математического описания результатов манипулирования продолжительностью жизни червей *C.elegans* и их долгоживущих мутантов. Также описаны результаты изучения старения людей на примере процесса потери дееспособности в пожилом возрасте с учетом половых и генетических различий. Рассмотрение старения как процесса повышения вероятности смерти с возрастом позволило обобщить данные разнородных экспериментов и указать возможные направления управления старением.



## 1. ФЕНОМЕНОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ СТАРЕНИЕМ

Разнообразие проявлений старения и множество противоречивых фактов указывают не только на сложность этого явления, но и на возможность управления им, т. е. вмешательства с целью достижения желаемого результата. Последние исследования показали, что неправильно считать старение присущим всему живому. Оказалось, что существуют организмы, которые не проявляют признаков старения. Так, гидра не проявляет признаков снижения репродукции и увеличения риска гибели с возрастом [3], существуют свидетельства об отсутствии старения у некоторых видов рыб [4]. Некоторые рыбы живут непродолжительно и гибнут, подчиняясь генетической программе, как, например, тихоокеанский лосось [5]. Обнаружены даже организмы, демонстрирующие отрицательное старение, т. е. снижение шансов гибели по мере своего роста [6]. К таким организмам относятся некоторые растения, кораллы.

Попытки повлиять на процессы, вызывающие старение, предпринимаются давно. В работе [7] перечислены известные факторы, влияющие на продолжительность жизни лабораторных животных и человека, в статье [8] приведены новейшие данные, подтверждающие эффект увеличения продолжительности жизни при определенных воздействиях на организм. Наиболее универсальным оказывается ограничение калорийности питания, которое приводит к увеличению продолжительности жизни всех исследуемых организмов — от дрожжей до млекопитающих [9–11]. Причем это пока единственно известное воздействие, надежно продлевающее жизнь и замедляющее старение среди млекопитающих [12]. Другим фактором, продлевающим жизнь, является понижение температуры тела [13]. Это воздействие эффективно лишь для организмов, у которых отсутствует система терморегуляции, например, мух, червей. С помощью понижения температуры тела экспериментально удается увеличивать максимальную продолжительность жизни вдвое [7]. При этом, однако, увеличение продолжительности жизни не всегда сопровождается снижением темпа старения. Так, мыши, живущие на питании пониженной калорийности, демонстрируют признаки старения раньше, чем их сородичи, получающие полноценное питание, но живущие меньше [14]. В то же время воздействия, приводящие к замедлению темпа старения, как правило, сопровождаются увеличением продолжительности жизни [15]. Исключения составляют случаи воздействия, приводящие к увеличению смертности по причинам, не связанным со старением. Например, добавление мелатонина в пищу мышей чистой линии СВА приводит одновременно как к замедлению старения, так и к увеличению частоты возникновения спонтанных раковых опухолей [16]. Приведенные примеры показывают, что старение и продолжительность жизни являются процессами одновременно связанными, но и противоречивыми, что необходимо учитывать при разработке и применении воздействий, продлевающих жизнь и замедляющих дегенеративные старческие проявления.

Особенный интерес представляет изучение старения и продолжительности жизни генетически модифицированных организмов. Дело в том, что существующие в природе организмы — так называемый “дикий тип”,

прошли длительный эволюционный отбор, в результате которого сложился и передается по наследству генотип, оптимально соответствующий условиям существования организма. Наблюдающийся в популяции небольшой разброс генетических характеристик служит для обеспечения устойчивости вида и его адаптации к меняющейся среде обитания [17]. В полной мере это относится и к человеку. Оказалось, что если провести некоторые генетические модификации с простейшими организмами, то можно существенно увеличить продолжительность жизни. Для круглых червей нематод *Caenorhabditis elegans* генетические модификации позволяют увеличить продолжительность жизни в шесть раз [18, 19], у мух такие модификации увеличивают продолжительность жизни до 85...100 % [20, 21]. Увеличение продолжительности жизни до 30...40 % по сравнению с диким типом наблюдается и у некоторых мутантных мышей [22, 23]. Эти мутации не закрепляются в естественных условиях, поскольку цель эволюции — обеспечение максимального числа потомков, а мутантные организмы имеют, как правило, сниженный репродуктивный потенциал. Однако изучение мутаций, увеличивающих продолжительность жизни, позволяет выяснять биохимические процессы, лежащие в основе феномена старения, и указывает направления, в которых необходимо искать средства продления жизни.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ЛАБОРАТОРНЫМИ ЖИВОТНЫМИ

В последнее время был проведен ряд экспериментов по направленному воздействию на лабораторных животных с целью изучения механизмов регуляции старения и продолжительности жизни. Эти эксперименты ставились на червях, мухах, мышах и включали в себя ограничение питания, термическое воздействие, ряд экстремальных воздействий в виде увеличения плотности содержания животных, ограничения возможности размножения, гравитационных перегрузок, иссушения. Математическое описание наблюдаемого при этом изменения продолжительности жизни позволяет моделировать процесс старения организма при различных внешних воздействиях.

### 2.1. Эксперименты с *Caenorhabditis elegans*

Круглые свободно живущие черви *Caenorhabditis elegans* стали популярны в генетических исследованиях наравне с мухами *Drosophila*. Это объясняется их малыми размерами около 1 мм, короткой продолжительностью жизни около трех недель в нормальных условиях, простотой строения — число соматических клеток не превышает 1000. В экспериментах по термическому воздействию, проводившихся в лаборатории Т. Johnson (Institute for Behavioral Genetics, USA) с чистой линией червей TJ1060 (*spe-9; fer-15*), группы животных по 150 особей возрастом 4 дня, выведенные при температуре 25,5 °С, подвергались воздействию температуры 35 °С в течение различного времени от 0 до 12 ч. После этого животные помещались в температуру 20 °С, и в каждой группе регистрировалось число погибших животных. Условия питания строго контролировались и были идентичны во всех группах. Наблюдения длились до момента гибели последней особи в группе. По полученным данным оце-

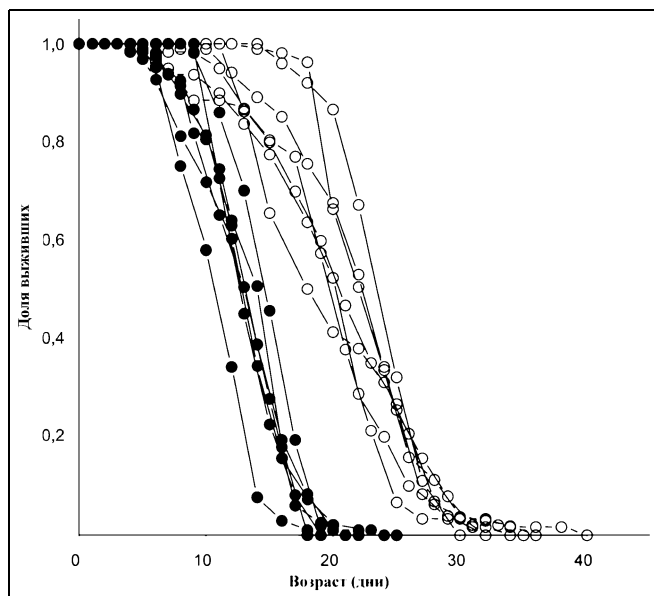


Рис. 1. Доля червей дикого типа, доживших до определенного возраста при разной температуре на пострепродуктивном периоде жизни:

○ — 15 °С; ● — 25,5 °С

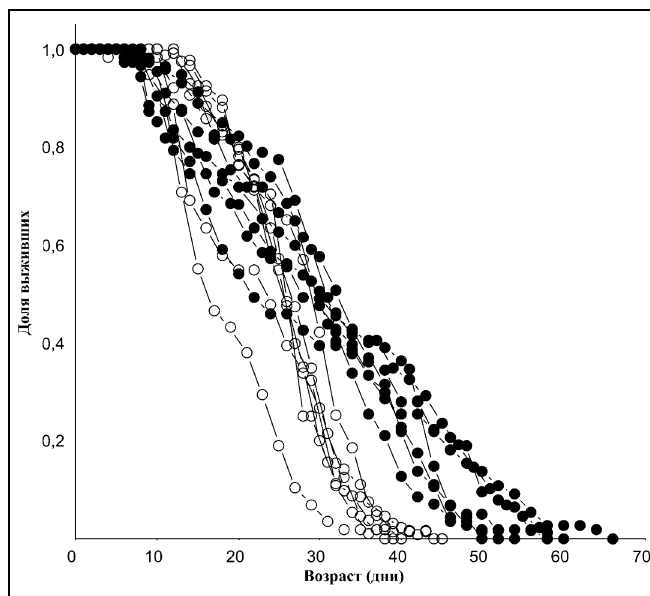


Рис. 2. Доля червей мутантов *daf-2(m41); daf-12(m20)*, доживших до определенного возраста при разной температуре на репродуктивном периоде жизни:

○ — 15 °С; ● — 25,5 °С

нивалась вероятность гибели после термического стресса и строилась модель воздействия стресса на систему защиты организма [24]. В табл. 1 приведены оценки средней продолжительности жизни червей после нагревания и 95 %-ные доверительные интервалы для этих оценок.

Видно, что нагревание в начале жизни в течение 1 ч способствует статистически значимому увеличению средней продолжительности жизни по сравнению с отсутствием нагревания. Для выделения компоненты старения изучалась вероятность дожития до определенного возраста червей из контрольной группы, не прошедших нагревание, и червей, которых нагревали в течение 1 ч. В работе [24] показано, что процесс старения у червей *C. elegans* характеризуется наличием двух стационарных состояний защиты организма, между которыми происходит переключение вследствие снижения с возрастом уровня предельных нагрузок, переносимых организмом. Оказалось, что эффект положительного влияния нагревания в начале жизни не сказывается на начальном уровне защиты, а проявляется в увеличении эффективности защиты в старших возрастах. В статье [25] предложен механизм подобного триггерного переключения как результата нелинейности системы дифференциальных уравнений, описывающих выработку защитных и повреждающих веществ в организме.

Предложенная модель [25] с двумя стационарными состояниями защиты объясняет и эффект длительного воздействия температуры на разных этапах жизни червей *C. elegans*, наблюдавшийся в другом эксперименте. Группы червей дикого типа и червей с двойными мутациями *daf-2(m41); daf-12(m20)*, которые отличаются повышенной продолжительностью жизни, содержались при температурах 15 и 25,5 °С на репродуктивном и пострепродуктивном периодах их жизни в различных сочетаниях [26]. Оказалось, что для дикого типа изменение температуры на репродуктивном периоде не отразилось на продолжительности жизни, а понижение температуры на пострепродуктивном периоде привело к существенному увеличению продолжительности жизни. На рис. 1 представлены графики изменения доли животных, доживших до определенного возраста при температуре на пострепродуктивном периоде 15 и 25,5 °С. Графики построены по независимым группам из 50-ти животных. Иная картина наблюдается для мутантов. Двойные мутанты *daf-2; daf-12* живут дольше при температуре 25,5 °С и меньше при 15 °С. При этом существенное значение имеет температура на репродуктивном периоде. Температура на пострепродуктивном периоде оказывает слабое влияние на продолжительность жизни. На рис. 2 представлены графики изменения доли жи-

Таблица 1

Средняя продолжительность жизни червей *Le* (дни) в зависимости от длительности нагревания  $t$  (часы) при температуре 35 °С в начале жизни (в скобках указан 95%-ный доверительный интервал)

$t$	0	1	2	4	6	8	10	12
<i>Le</i>	16,6 (±0,8)	18,2 (±1,2)	17,6 (±0,8)	14,6 (±1,2)	6,8 (±0,8)	4,2 (±0,4)	1,8 (±0,2)	0,8 (±0,2)





вотных, доживших до определенного возраста при температуре на репродуктивном периоде 15 и 25,5 °С. Графики построены по независимым группам из 50-ти животных. Из рисунков виден разный характер изменения дожития червей дикого типа и мутантов при изменении температуры. У червей дикого типа при снижении температуры происходит сдвиг кривой дожития вправо, что соответствует старению с запаздыванием. У мутантов при повышении температуры кривая дожития растягивается по временной шкале, что соответствует замедленному старению.

Модель триггерного переключения защитных свойств организма [25] следующим образом объясняет наблюдаемые эффекты. Черви дикого типа являются организмами, эволюционно приспособленными к существованию в определенных условиях. Это означает, в частности, устойчивость к колебаниям температуры. Репродуктивный период - самый ответственный с точки зрения эволюции период жизни, поскольку в это время производится потомство и все системы организма должны работать наиболее эффективно и устойчиво. В результате нелетальное понижение температуры на репродуктивном периоде жизни *C. elegans* не оказывает заметного влияния на продолжительность жизни. Понижение температуры на пострепродуктивном периоде ведет к снижению метаболизма, уменьшению производства активных повреждающих веществ и увеличению продолжительности жизни [12].

Черви-мутанты не приспособлены к жизни в естественных условиях. Оптимальные условия их существования отличаются от оптимальных условий существования червей дикого типа, а системы поддержания жизни, не пройдя "настройку" естественным отбором, не обладают такой устойчивостью, как системы дикого типа. Это ведет к чувствительности организма к температуре на репродуктивном периоде. Тот факт, что повышение температуры продлевает жизнь, означает, что оптимальные условия для жизни мутанта находятся в области повышенной температуры, видимо, благодаря дополнительной активации системы производства защитных веществ при повышении температуры. Снижение температуры на пострепродуктивном периоде приводит к незначительному увеличению продолжительности жизни из-за снижения производства активных повреждающих веществ, однако этот эффект существенно слабее эффекта увеличения продолжительности жизни благодаря повышению температуры на репродуктивном периоде. Для червей дикого типа неизменность смертности на репродуктивном периоде и ее уменьшение на пострепродуктивном периоде при снижении температуры приводит к сдвигу кривой дожития вправо (см. рис. 1). Смертность червей-мутантов понижается при повышении температуры уже на репродуктивном периоде, что выглядит как замедление старения (см. рис. 2).

### 3. СТАРЕНИЕ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ЖИЗНИ ЛЮДЕЙ

Люди живут значительно дольше круглых червей, и эксперименты по управлению старением и продолжительностью жизни, даже в случае преодоления этических проблем, заняли бы слишком много времени. По этой причине изучение управления старением и продол-

жительностью жизни проводится на статистическом материале с учетом данных о присутствующих факторах риска, полученных на животных. Для сбора таких данных в настоящее время осуществляется ряд масштабных национальных проектов по изучению смертности и изменения здоровья населения с возрастом. При этом контролируются как показатели состояния здоровья, так и различные факторы риска, влияющие на здоровье человека. Наиболее известными из зарубежных в настоящее время являются Фремингемское исследование (Framingham Heart Study) [27], Балтиморское исследование пожилых (BLSA) [28], Национальные обследования по уходу за пожилыми (NLTC) [29], Долговременное изучение пожилых датских близнецов (LSADT) [30]. Анализ данных таких исследований позволяет делать предварительные выводы о механизмах и закономерностях, лежащих в основе феномена старения и долголетия человека.

#### 3.1. Изучение инвалидизации

В рамках Национальных обследований по уходу за пожилыми (NLTC) в настоящее время доступны результаты обследований жителей США старше 65-ти лет за период 1982—1999 гг. Данные содержат информацию о длительной (длящейся дольше 90 дней) неспособности самостоятельно выполнять необходимые в повседневной жизни действия, такие как есть, встать с постели, встать со стула, ходить по помещению и выходить из него, одеваться, купаться, пользоваться туалетом. Люди, участвовавшие в исследовании, были медицински подробно опрошены относительно их медицинского состояния, семейной истории, материального положения. За период с 1982 по 1999 г. было опрошено 41 662 чел. (17 136 мужчин и 24 526 женщин) старше 65-ти лет.

Возможность самостоятельно выполнять действия, необходимые в повседневной жизни, характеризует общее состояние здоровья человека. Изменение этих показателей с возрастом характеризует процесс одряхления организма и может быть использовано для оценки степени старения человека. В работах [29, 30] показано, что в населении США старше 65-ти лет наблюдается снижение доли лиц, неспособных самостоятельно выполнять действия, необходимые в повседневной жизни. Это рассматривается как указание на замедление развития дегенеративных процессов в изучаемом населении и как признак увеличения активной продолжительности жизни [31].

Детальное изучение механизмов, лежащих в основе наблюдаемых изменений, требует сбора дополнительной информации, но уже на основании имеющихся данных можно выделить основные направления, по которым происходит это улучшение [32]. В табл. 2 представлены оценки вероятности физиологического состояния, в котором человек, обследованный в определенном году, не в состоянии выполнить все перечисленные выше действия, необходимые в повседневной жизни. Это состояние можно назвать недееспособностью или инвалидизацией. Оценки стандартизованы по возрастному распределению населения США старше 65-ти лет [33]. Приведенная в таблице характеристика имеет смысл распространенности инвалидизации. Видно, что как сре-

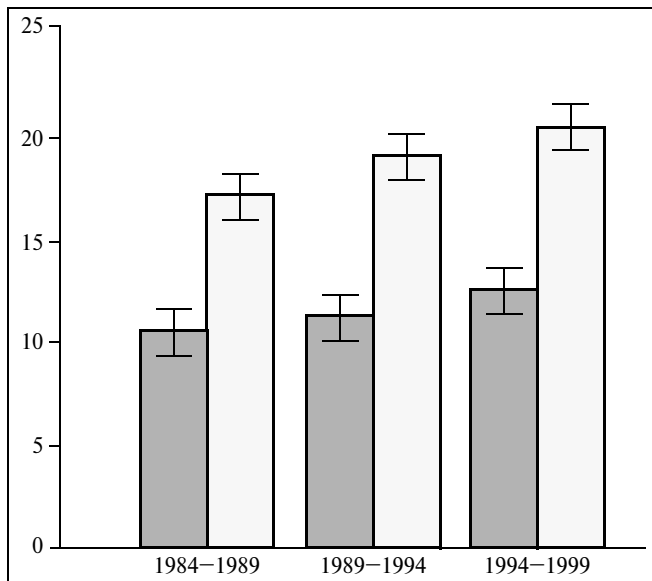


Рис. 3. Стандартизованные по возрасту оценки вероятности инвалидизации (%) за период между двумя обследованиями:

■ — для мужчин; □ — для женщин

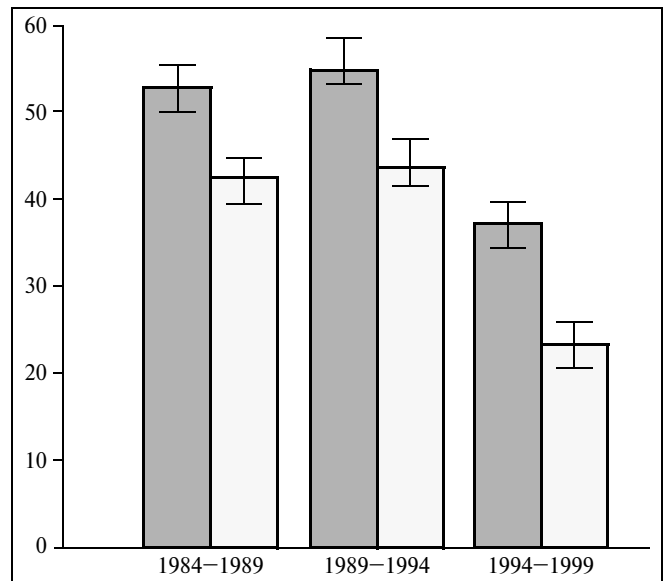


Рис. 4. Стандартизованные по возрасту оценки вероятности смерти (%) за период между двумя обследованиями:

■ — для мужчин; □ — для женщин

ди мужчин, так и среди женщин наблюдается устойчивое снижение распространенности инвалидизации во времени. При этом женщины с большей вероятностью оказываются в состоянии с плохим здоровьем, чем мужчины. Чтобы выяснить, какие процессы отвечают за половые различия в состоянии здоровья и за наблюдаемые тренды, были рассчитаны оценки трех вероятностей: вероятности инвалидизации за период между двумя последующими годами наблюдений, вероятности возвращения в дееспособное состояние за время между двумя соседними обследованиями и вероятности не умереть до следующего обследования, будучи в состоянии инвалидизации при последнем обследовании [32]. Оказалось, что во всех возрастных группах старше 65-ти лет женщины с большей вероятностью переходят в состояние инвалидизации, чем мужчины, но смертность в этом состоянии у женщин ниже, чем у мужчин. Вероятности улучшения здоровья для женщин и мужчин значимо не различаются. Рис. 3 и 4 иллюстрируют различия между мужчинами и женщинами. На рис. 3 приведены оценки вероятности инвалидизации за период между двумя обследованиями для мужчин и для женщин, стандартизованные по возрастному распределению населения США

старше 65-ти лет с соответствующими 95 %-ми доверительными интервалами. На рис. 4 приведены аналогично стандартизованные оценки вероятности смерти за период между двумя обследованиями среди инвалидизированных мужчин и женщин.

Полученные оценки позволяют сделать вывод о наличии принципиально различных стратегий поддержания жизни, реализуемых природой в мужчинах и женщинах. В мужчинах реализуется стратегия защиты здоровья, которая предписывает в пожилых возрастах поддерживать организм на работоспособном уровне (низкая уязвимость), не оставляя достаточно резервов для его поддержания в состоянии нездоровья (низкая живучесть). В женщинах, наоборот, больше резервов направлено на поддержание жизни (живучесть) из-за более слабой защиты здоровья (более высокая уязвимость). В результате анализа инвалидизации, связанной с неспособностью пользоваться телефоном, распоряжаться деньгами, самостоятельно готовить пищу, принимать лекарства или стирать, показано, что различные стратегии жизни реализуются и в пределах одного пола [34]. Так, мужчины с ограниченной дееспособностью, которые были способны самостоятельно выполнять все

Таблица 2

Стандартизованные по возрасту оценки распространенности инвалидизации в населении США старше 65-ти лет по полу и году обследования (в скобках приведены соответствующие 95%-й доверительные интервалы)

Пол	1982	1984	1989	1994	1999
Мужчины	31,0 (30,0; 32,0)	25,0 (24,1; 25,9)	20,6 (19,7; 21,6)	16,5 (15,6; 17,3)	14,6 (13,7; 15,4)
Женщины	39,2 (38,4; 40,0)	35,1 (34,3; 35,8)	30,4 (29,6; 31,2)	25,6 (24,8; 26,4)	23,2 (22,4; 24,0)
Оба пола	37,6 (37,0; 38,2)	32,9 (32,3; 33,5)	28,1 (27,4; 28,7)	23,4 (22,8; 24,0)	21,0 (20,4; 21,6)



действия, необходимые для повседневной жизни (вставать с постели, ходить по дому и т. д.), но не могли самостоятельно выполнять действия, связанные с когнитивными функциями (принимать лекарства, звонить по телефону и т. д.), после 90 лет имели большую продолжительность жизни, чем их ровесники с лучшими показателями здоровья. Аналогичный вывод был сделан и при анализе состояния здоровья долгожителей [35]. Оказалось, что в результате прогресса медицины до старости стали доживать люди с не самым лучшим здоровьем, которые в старших возрастах получили преимущество в выживаемости перед своими более здоровыми в юности сверстниками.

### 3.2. Изучение генетической компоненты в старении человека

Показатель неспособности выполнять действия, необходимые в повседневной жизни, объективно характеризует старение человека, и на основании данных о недееспособности близнецов можно изучать степень генетической предопределенности состояния здоровья в старости. Данные, необходимые для такого анализа, собраны в рамках проекта “Долговременное изучение пожилых датских близнецов” (LSADT) при обследовании пар близнецов старше 75-ти лет. Начиная с 1995 г. все близнецы старше 75-ти лет, включенные в Датский регистр близнецов [36], каждые два года проходили интервью, содержащее вопросы о самооценке состояния здоровья, наличествующих заболеваниях, возможности самостоятельно выполнять действия, необходимые в повседневной жизни, когнитивных способностях, условиях жизни. За период 1995–2001 гг. была собрана информация о 282 монозиготных и 408 дизиготных пар близнецов одинакового пола.

Роль генетических факторов в инвалидизации оценивалась по совокупности всех данных за период 1995–2001 гг. с учетом их лонгитюдного характера [37]. Инвалидизация определялась как неспособность самостоятельно выполнять одно из действий, необходимых для повседневной жизни: встать с кресла или кровати, перемещаться по дому, пользоваться туалетом, выходить из дома. Перечисленные действия характеризуют как силу, так и подвижность человека. Оценка роли генетических факторов в инвалидизации проводилась с помощью модели скрытых компонент. В рамках этого подхода признак дееспособности рассматривается как двоичная случайная величина, принимающая значение 0, если человек недееспособен, и 1 в противном случае. Конкретное значение этого индикатора определяется тем, превосходит ли значение скрытой компоненты заданный порог. Скрытая компонента  $t$ , в свою очередь, является случайной величиной, представимой в виде  $t = a + c + e$ , где  $a$  — аддитивная генетическая компонента,  $c$  — негенетическая компонента, соответствующая средовым факторам, общим для близнецов,  $e$  — компонента, соответствующая индивидуальным средовым факторам. Величины  $a$ ,  $c$  и  $e$  являются результатом взаимодействия большого числа независимых микрособытий на генетическом уровне и уровне окружающей среды. При этом величины  $a$  коррелированы для близнецов,  $c$  — одинаковы для близнецов, но независимы от величины  $e$ , величина  $e$  независима от величин  $a$  и  $c$ .

В рамках этой модели скрытые компоненты  $t_1$  и  $t_2$  для пары близнецов имеют двумерное нормальное распределение с нулевым средним и ковариационной матрицей

$$\text{cov}(t_1, t_2) = \begin{pmatrix} \sigma_a^2 + \sigma_c^2 + \sigma_e^2 & r\sigma_a^2 + \sigma_c^2 \\ r\sigma_a^2 + \sigma_c^2 & \sigma_a^2 + \sigma_c^2 + \sigma_e^2 \end{pmatrix}.$$

Здесь  $\sigma_a^2$ ,  $\sigma_c^2$ ,  $\sigma_e^2$  — дисперсии соответствующих компонент,  $r$  — коэффициент корреляции генетических компонент для близнецов. Поскольку монозиготные близнецы генетически идентичны, то для них  $r = 1$ . Дизиготные близнецы в среднем имеют только половину общих хромосом, что приводит к значению  $r = 0,5$ . Среднее значение величин  $t_1$  и  $t_2$  можно считать равным нулю, поскольку значение порога, превышение которого соответствует недееспособности человека, является параметром модели, который настраивается по данным.

В рамках описанной модели вероятность наблюдать определенную траекторию инвалидизации для одной пары близнецов при наблюдении в течение  $n$  лет задается выражением [37]

$$F_r(\sigma_a, \sigma_c, \sigma_e, \bar{z}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int \prod_{j=1}^n \prod_{i=1}^2 \left[ 1 - \Phi \left( \frac{z_j - (r\sigma_a^2 + \sigma_c^2)^{1/2} y}{\sqrt{\sigma_e^2 + (1-r)\sigma_a^2}} \right) \right]^{\delta_i^j} \times \Phi \left( \frac{z_j - (r\sigma_a^2 + \sigma_c^2)^{1/2} y}{\sqrt{\sigma_e^2 + (1-r)\sigma_a^2}} \right)^{1-\delta_i^j} e^{-\frac{y^2}{2}} dy,$$

где  $\delta_i^j = 0$ , если близнец  $i$  недееспособен в году  $j$ , и 1 иначе,  $\bar{z}$  — вектор пороговых значений ненаблюдаемой компоненты  $t$  для различных возрастов,  $\Phi$  — функция нормального распределения. Функция правдоподобия траекторий инвалидизации, полученных при наблюдении  $N$  пар близнецов, имеет вид:

$$L(\sigma_a, \sigma_c, \sigma_e, \bar{z}) = \prod_{i=1}^N F_r(\sigma_a, \sigma_c, \sigma_e, \bar{z}).$$

Оценки дисперсий  $\sigma_a^2$ ,  $\sigma_c^2$ ,  $\sigma_e^2$  и пороговых значений  $\bar{z}$  получаются максимизацией правдоподобия. При этом степень генетической предопределенности инвалидизации — степень наследования — определяется как доля дисперсии генетической компоненты в общей дисперсии скрытой компоненты  $t$ :

$$h^2 = \frac{\sigma_a^2}{\sigma_a^2 + \sigma_c^2 + \sigma_e^2}.$$

Оценки наследования инвалидизации, построенные по данным LSADT за период 1995–2001 гг. показали, что для людей старше 75-ти лет негенетические средовые факторы, общие для близнецов, не играют существенной роли в инвалидизации. С вероятностью 0,95 степень наследования инвалидизации без разделения пола

лежит в пределах от 10 до 45 %. При этом для женщин степень наследования выше (14–54 %), чем для мужчин (0–40 %). Последняя оценка имеет слишком большой доверительный интервал из-за малого числа мужчин в возрастной группе старше 75-ти лет. Полученные оценки показывают, что окружающая среда оказывает большее по сравнению с генетическими факторами влияние на женщин, чем на мужчин. Это, в принципе, означает большую управляемость через факторы окружающей среды состоянием здоровья и процессом старения женщин, чем мужчин.

#### 4. ПУТИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬЮ ЖИЗНИ

Сравнение результатов экспериментов по влиянию на продолжительность жизни лабораторных животных и закономерностей старения людей позволяет указать пути, по которым возможно управление здоровьем и продолжительностью жизни. Биохимической основой известных способов замедления старения и продления жизни является изменение баланса между образованием активных форм кислорода, других соединений в процессе жизнедеятельности организма и активностью систем защиты макромолекул от них [8]. Описанные в настоящей статье результаты анализа экспериментов с червями *C. elegans* показывают, как происходит это перераспределение в терминах изменения эффективности защиты жизни организма в целом. Оказывается, что последствия воздействий на организм в младших возрастах могут проявляться позже, не вызывая сразу непосредственного эффекта. Объяснение этому, по видимому, лежит в эволюционной природе формирования живых организмов, в силу которой эволюционно вырабатываются организмы, устойчивые к воздействиям внешней среды в молодом, репродуктивном периоде. Этот вывод подтверждается экспериментами с долгоживущими мутантами *C. elegans*, которые не обладают подобной устойчивостью и демонстрируют увеличение продолжительности жизни при повышении температуры на репродуктивном периоде. Черви дикого типа на такие изменения температуры не реагируют.

Применительно к человеку это означает важность мероприятий по профилактике старения в молодых возрастах. Именно в этот период закладывается стиль жизни и привычки, которые позже приводят либо к бодрой, дееспособной старости, либо к разрушению со временем организма. Эффективным управляющим воздействием для профилактики старения являются достаточная физическая активность, сбалансированное питание [8].

Как было показано, роль генетической компоненты в инвалидизации не превышает 30 %, оставшаяся часть определяется условиями существования. Таким образом, можно говорить, что на 70 % состояние человека в старости определяется условиями его жизни и его привычками в молодости и зрелом возрасте. Но и позже можно еще кое-что исправить. Как показывают наблюдения за экспериментальными животными и демографические данные, нормальный организм способен довольно быстро восстановить свои защитные силы даже в довольно преклонном возрасте, если убрать факторы, негативно действующие на его состояние [38]. В работе

[39] показано, что кривая смертности в экспериментальной популяции дрозофил “пластична” в любом возрасте. Отмечается [40], что смертность населения наиболее чувствительна к временным, а не к когортным влияющим факторам.

Изучение процесса инвалидизации среди пожилых людей позволяет сделать вывод о том, что существует компромисс между эффективностью системы защиты здоровья организма и эффективностью поддержания его жизнеспособности. У женщин и мужчин баланс между этими системами различен, что и объясняет большую продолжительность жизни женщин относительно мужчин. Среди мужчин также реализуются различные соотношения эффективности упомянутых систем. В результате, среди лиц, доживших до пожилых возрастов, преимущество по выживанию имеют лица с более эффективной системой поддержания жизнеспособности, а не здоровья. Этот вывод означает, что наибольший вклад в увеличение средней продолжительности жизни следует ожидать от мероприятий по защите жизни лиц со слабым здоровьем, поскольку в старости они могут получить преимущества в шансах выживания по сравнению с людьми, имеющими хорошее здоровье в юности.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные примеры манипулирования продолжительностью жизни червей и закономерности потери дееспособности людей в пожилых возрастах указывают пути влияния на темп старения живого организма, повышения его жизнеспособности. Привлечение современных математических методов для описания старения и смертности оказывается плодотворным для выяснения общих закономерностей процессов, протекающих в столь различных организмах, как люди и лабораторные животные. Универсальные математические модели старения позволяют прогнозировать изменение жизнеспособности отдельных организмов и популяций, оценивать эффективность методов воздействия на организм, выяснять пределы допустимых вмешательств.

Обсуждаемые в настоящей статье методы управления старением и продолжительностью жизни людей не выходят за круг традиционно известных рекомендаций: хранить здоровье в молодом возрасте, умеренно и разнообразно питаться в преклонном, избегать вредных привычек и своевременно вылечивать болезни. Однако с появлением широкого спектра средств медикаментозного воздействия на организм с целью его поддержания и дополнительной защиты на биохимическом уровне становится актуальной задача прогноза долговременных последствий применения различных препаратов и терапий. Оценка последствий таких воздействий на людей с учетом результатов, полученных в биологических лабораториях и медицинских учреждениях, является прямой задачей управления. Дальнейшее накопление данных и опыта в генной инженерии, биохимии старения наравне с изучением современных геронтологических и демографических тенденций позволит науке управления сформулировать эффективные подходы к проблеме замедления старости и продления жизни.



## ЛИТЕРАТУРА

1. *Finch C.* Longevity, Senescence, and the Genome. — Chicago: University of Chicago Press, 1990.
2. *McClearn G.E.* Biomarkers of age and aging // *Exp. Gerontol.* — 1997. — Vol. 32. — P. 87–94.
3. *Martinez Daniel E.* Mortality patterns suggest lack of senescence in hydra // *Exp. Gerontol.* — 1998. — Vol. 33. — P. 217–225.
4. *Klapper W., Heidorn K., Kuhne K., et al.* // Telomerase activity in "immortal" fish. // *FEBS Lett.* — 1998. — Vol. 434. — P. 409–412.
5. *Robertson O.H., Wexler B.C., Miller D.F.* Degenerative changes in the cardiovascular system of the spawning Pacific salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) // *Circulation Research.* — 1961. — Vol. 9. — P. 826–834.
6. *Vaupel J.W., Baudisch A., Dolling M., et al.* The case for negative senescence // *Theor. Popul. Biol.* — 2004. — Vol. 65. — P. 339–351.
7. *Виленчик М. М.* Биологические основы старения и долголетия. — М.: Знание, 1976.
8. *Голубев А. Г.* Биохимия продления жизни // *Успехи геронтолог.* — 2003. — Вып. 12. — С. 57–76.
9. *Gerhard Glenn S.* Caloric Restriction in Nonmammalian Models // *Journal of Anti-Aging Medicine.* — 2001. — Vol. 4. — P. 205–214.
10. *Roth G. S., Ingram D. K. and Lane M. A.* Caloric Restriction in Primates and Relevance to Humans // *Ann. N.-Y. Acad. Sci.* — 2001. — Vol. 928. — 305–315.
11. *Masoro E.J.* Dietary restriction // *Exp. Gerontol.* — 1995. — Vol. 30. — P. 291–298.
12. *Mattison J.A., Lane M.A., Roth G.S. and Ingram D.K.* Caloric restriction in rhesus monkeys // *Exp. Gerontol.* — 2003. — Vol. 38. — P. 35–46.
13. *Smith J. M.* The Effects of Temperature and of Egg-Laying on the Longevity of *Drosophila subobscura* // *J. Exp. Biol.* — 1958. — Vol. 35. — P. 832–842.
14. *Dubey A., Forster M. J., Lal H., Sohal R. S.* Effect of Age and Caloric Intake on Protein Oxidation in Different Brain Regions and on Behavioral Functions of the Mouse // *Arch. Biochem. Biophys.* — 1996. — Vol. 333. — P. 189–197.
15. *Anisimov V. N., Khavinson V. K., Mikhalski A. I., Yashin A. I.* Effect of synthetic thymic and pineal peptides on biomarkers of ageing, survival and spontaneous tumor incidence in female CBA mice // *Mechanisms of Ageing and Development.* — 2001. — Vol. 122. — P. 41–68.
16. *Anisimov V.N., Zavarzina N.Y., Zabezhinski M.A., et al.* Melatonin increases both life span and tumor incidence in female CBA mice // *J. Gerontol. A Biol. Sci. Med. Sci.* — 2001. — Vol. 56. — P. B311 – B323.
17. *Алтухов Ю. П.* Генетические процессы в популяциях — М.: Академкнига, 2003.
18. *Johnson T. E.* The increased life span of age-1 mutants in *Caenorhabditis elegans* and lower Gompertz rate of aging // *Science.* — 1990. — Vol. 249. — P. 908–912.
19. *Arantes-Oliveira N., Berman J. R. and C. Kenyon.* Healthy Animals with Extreme Longevity // *Science.* — 2003. — Vol. 302. — P. 611.
20. *Tu M., Epstein D., Tatar M.* The demography of slow aging in male and female *Drosophila* mutant for the insulin-receptor substrate homologue chico // *Aging Cell.* — 2002. — Vol. 1. — P. 75–80.
21. *Rogina B., Reenan R. A., Nilsen S. P., Helfand S. L.* Extended Life-Span Conferred by Cotransporter Gene Mutations in *Drosophila* // *Science.* — 2000. — Vol. 290. — P. 2137–2140.
22. *Migliaccio E., Giorgio M., Melei S., et al.* The p66shc adaptor protein controls oxidative stress response and life span in mammals // *Nature.* — 1999. — Vol. 402. — P. 309–313.
23. *Flurkey K., Papaconstantinou J., Miller R.A., Harrison D.E.* Lifespan extension and delayed immune and collagen aging in mutant mice with defects in growth hormone production // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* — 2001. — Vol. 98. — P. 6736–6741.
24. *Michalski A. I., Johnson T. E., Cypser J. R., Yashin A.I.* Heating Stress Patterns in *Caenorhabditis elegans* Longevity and Survivorship // *Biogerontology.* — 2001. — Vol. 2. — P. 35–44.
25. *Михальский А. И., Яшин А. И.* Биологическая регуляция и продолжительность жизни // *Проблемы управления.* — 2003. — № 3. — С. 61–65.
26. *Larsen P. L., Michalski A. I., Yashin A. I.* Longevity and temperature at different stages of *C.elegans* life // 2nd european congress on biogerontology, August 25–28, 2000, Saint Petersburg, Russia.
27. *Dawber T.R., Meadors G. F., Moore F. E. J.* Epidemiological approaches to heart disease: The Framingham Study // *Am. J. Public Health.* — 1951. — Vol. 41. — P. 279–286.
28. *Pearson J.D., Morrell C.H., Brant L.J., et al.* Age-associated changes in blood pressure in a longitudinal study of healthy men and women // *J. Gerontol. A Biol. Sci. Med. Sci.* — 1997. — Vol. 52. — P. M177–M183.
29. *Manton K.G., Corder L., Stallard E.* Chronic disability trends in elderly United States populations: 1982–1994 // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* — 1997. — Vol. 94. — P. 2593–2598.
30. *Christensen K., McGue M., Yashin A., et al.* Genetic and Environmental Influences on Functional Abilities in Danish Twins Aged 75 Years and Older // *J. Gerontol. A Biol. Sci. Med. Sci.* — 2000. — Vol. 55. — P. M446 – M452.
31. *Manton K. G., Gu X.* Changes in the prevalence of chronic disability in the United States black and nonblack population above age 65 from 1982 to 1999 // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* — 2001. — Vol. 98. — P. 6354–6359.
32. *Michalski A. I., Manton K.G., Yashin A.I.* Investigation of Disability Trends Using Surveys. — Тр. 1-ой междунар. франц.-росс. конф. "Модели долговечности, старения и деградации в теории надежности, медицине и биологии", 2004, Санкт-Петербург, Россия.
33. *Hobbs F.B., Damon B.L.* 65+ in the United States. — Current Population Reports: Special Studies, 1996.
34. *Michalski A.I., Manton K.G., Yashin A.I.* Does Frailty Always Mean Short Longevity? — Population Association of America 2003 Annual Meeting, 2003, Minneapolis, USA.
35. *Yashin A. I., Ukraintseva S.V., De Benedictis G., et al.* Have the oldest old adults ever been frail in the past? A hypothesis that explains modern trends in survival // *J. Gerontol. A Biol. Sci. Med. Sci.* — 2001. — Vol. 56. — P. B432–B442.
36. *Christensen K., Holm N. V., McGue M., et al.* A Danish population-based twin study on general health in the elderly // *Journal of Aging and Health.* — 1999. — Vol. 11. — P. 49–64.
37. *Michalski A. I., Christensen K., Yashin A.I.* Old Age Disability and Genetics: Investigation on Longitudinal Twin Data. — Тр. 1-ой междунар. франц.-росс. конф. "Модели долговечности, старения и деградации в теории надежности, медицине и биологии", 2004, Санкт-Петербург, Россия.
38. *Vaupel J. W., Carey J.R., Christensen K.* It's never too late // *Science.* — 2003. — Vol. 301. — P. 1679–1681.
39. *Mair W., Goymer P., Pletcher S. D., Partridge L.* Demography of Dietary restriction and death in *Drosophila* // *Science.* — 2003. — Vol. 301. — P.1731–1733.
40. *Kannisto V.* Development of oldest-old mortality, 1950-1990: Evidence from 28 developed countries / *Odense Monographs on Population Aging; 1.* — Odense: Odense University Press. 1994.

☎ (095) 334-88-20

E-mail: mikhalsk@ipu.ru

E-mail: Yashin@cds.duke.edu



# ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ РАЗЛАДКИ В ЗАДАЧЕ МАКСИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОПРОДУКТИВНОСТИ И РЕЗУЛЬТИРУЮЩАЯ ГЕТЕРОГЕННОСТЬ ПОПУЛЯЦИИ

А. А. Бутов, М. А. Волков

*Ульяновский государственный университет, г. Ульяновск*

Решена задача оптимального управления параметрами разладки энергопродуктивности. Показана неунимодальность целевой функции при определенных ограничениях, приводящая к возникновению гетерогенности популяции в ходе процессов старения.

## ВВЕДЕНИЕ

Определение структур популяций (выделение субпопуляций) и решение обратной задачи — идентификации целевой функции на основе анализа структуры — оказывается наиболее полезным и актуальным при анализе таких объектов, как системы с разладками. В технических приложениях момент разладки зачастую интерпретируется как момент перехода прибора или машины в “форсированный” режим работы (например, переход работы двигателя на бензин с более низким октановым числом), в биологических — как момент перехода организма в состояние кортизолового стресса, в результате которого может развиваться гипертония или диабет, и т. п. В качестве момента разладки также может рассматриваться момент дифференцировки тканей, который сопровождается онтогенетическими событиями (например, переходом из личиночной стадии в фазу зрелого организма). Во многих таких случаях после разладки приближается момент выхода из строя или смерти (и, таким образом, меняется скорость старения организмов), но увеличивается вероятность выполнения основных функций в текущий момент. Возможность этого увеличения вероятности и трактуется здесь как исходная предпосылка формулировки задачи оптимального управления параметрами разладки (моментом перехода в форсированный режим и его интенсивностью).

## ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ РАЗЛАДКИ КАК МОДЕЛЬ СТАРЕНИЯ ОРГАНИЗМОВ

В настоящей работе предлагается следующая постановка задачи: управление моментом разладки с целью оптимизации целевой функции; при этом целевая функция, зависящая от показателей смертности, определяет структуру формируемой популяции. Задачи в такой по-

становке восходят к анализу управляемых моментов останковки (см. работы [1–9]). Основное отличие заключается в том, что мы рассматриваем не только управление моментами останковки, но и управление поведением случайных процессов, характерным для систем с разладками.

В биологии часто рассматриваются физиологические показатели, которые до момента нарушения нормально-го состояния (момента разладки) находятся около своего среднего значения, а затем начинают расти до пересечения критической границы, после чего и наступает смерть организма (либо в иных приложениях — разрушение системы). В популяционной биологии естественно возникает задача максимизации средней энергопродуктивности в течение всей жизни организмов. Теоретические результаты в области оптимизации квадратичных стохастических целевых функций были получены в работе [10].

Анализ задачи максимизации энергопродуктивности показал наличие при некоторых параметрах двух локальных максимумов построенной целевой функции, что объясняет наблюдаемую природную неоднородность (гетерогенность) рассматриваемой популяции. Из этого следует, что она делится, по крайней мере, на две группы (соответствующие этим экстремумам): особи, у которых аллостатическая болезнь развивается с большой скоростью (но момент заболевания наступает в старших возрастах), и особи с рано возникающими (но медленно текущими) хроническими заболеваниями. У первой группы момент разладки наступает позже, чем у второй, но скорость развития заболевания выше после разладки, чем у хронически больных. У хронических — скорость меньше, но момент разладки наступает в начале жизни. Данное утверждение может быть биологически обосновано для болезней адаптации. В качестве примера гетерогенности популяции можно рассмотреть деление митохондрий на две группы, которые формируются по



стратегиям выработки энергии в организме (см., например, статью [11]).

В случае гибели организмов в момент пересечения некоторой границы случайным процессом с разладкой возникает ряд задач, связанных с выбором такого момента, целевыми функциями, определяемыми такими процессами, эволюционным отбором по стратегиям разладок и др.

Пусть процесс с разладкой  $X = (X_t)_{t \geq 0}$  записывается в классическом виде (см., например, работу [3]):

$$dX_t = \alpha I(t \geq \theta) dt + dW_t, \quad (1)$$

где  $\theta$  — детерминированный момент разладки,  $\alpha$  — скорость нарастания энергопродуктивности,  $I$  — индикаторная функция, принимающая значения 0 или 1,  $W$  — стандартный винеровский процесс. Пусть момент смерти (выхода из строя)  $\tau$  наступает при выполнении условия

$$\tau = \inf\{t : t \geq 0, X_t = 1\}. \quad (2)$$

Возникает задача нахождения максимума целевой функции:

$$\varphi = E \int_0^\tau X_t dt + \beta E\tau \rightarrow \max_{\alpha, \theta}, \quad (3)$$

где  $\beta$  — неотрицательный коэффициент.

Таким образом, функция  $f(t) = X_t + \beta$  представляет собой вырабатываемую мощность в момент  $t$ , а ее интеграл  $\varphi = \int_0^\tau f(s) ds$  — совокупную выработанную энергию

за все время жизни. Заметим, что целевая функция  $\varphi$  является компромиссной в энергопродуктивности и продолжительности жизни. Ее оптимизация осуществляется на основе решения задачи управления моментом разладки  $\theta$  и скоростью  $\alpha$  роста энергопродуктивности.

Эта задача соответствует эволюционно обусловленному режиму максимальной совокупной (за все время жизни индивидуума) энергопродуктивности. Такая постановка задачи также находит экспериментальное подтверждение при изучении уровней плодовитости и продолжительности жизни насекомых [12]. В приведенных обозначениях справедлива следующая

**Теорема.** Для целевой функции  $\varphi$  существует область значений параметра  $\beta \in (C; 0,5]$ ,  $C < 0,5$ , в которой существуют два локальных максимума  $\varphi$  при  $\theta \in [0; +\infty)$ .

Доказательство теоремы см. в Приложении.

Настоящая теорема может служить основанием и для решения обратной задачи — идентификации целевой функции “по итогам” формирования неоднородных популяций. При этом допускается следующая гипотеза.

Исходя из экспериментально установленных параметров  $\theta$ ,  $\alpha$  и линейного приближения целевой функции (3), определяются ее максимумы. Положения полученных максимумов целевой функции соответствуют положениям максимумов функции распределения индивидуумов в популяции. В результате эволюционного отбора в популяции будет больше всего индивидуумов, характеристики которых соответствуют этим максимумам; таким образом, определяется структура популяции.

Главный результат теоремы состоит в том, что полученная гетерогенность была выявлена при абстрактном

рассмотрении популяции (не было привязки к экспериментальным данным). Кажущаяся простота и линейность (по параметрам и процессам) в постановке задачи (3) обманчива — решение существенно нелинейно и вид целевой функции подтверждает это. Таким образом, этот подход можно применить и при решении других задач, в которых присутствуют процессы с разладкой, и можно предположить, что рассматриваемая система распадается на несколько подсистем. Например, при анализе данных по экспрессии генов: до моментов смены онтогенетических фаз в организме (моментов разладки) определяются группы генов, вместе экспрессирующиеся или супрессирующиеся, после моментов разладки — гены могут переходить в другие группы или образовывать новые. При этом необратимые нарушения (выбывание объекта) в геноме происходят при пересечении процессом экспрессии некоторой критической нижней или верхней границы. Если гены распределяются в соответствии со значениями целевой функции, то состав группы может быть определен. Возникновению подгрупп (т. е. структуры) соответствует наличие нескольких локальных максимумов целевой функции.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главный результат настоящей работы заключается в выводе (в форме теоремы) о существовании (при определенных ограничениях) двух локальных максимумов целевой функции — кумулятивной энергопродуктивности. При этом текущая мощность предполагается классическим процессом с разладкой.

Из теоремы вытекает следствие, состоящее в том, что по значению параметра  $\beta$  можно определить значения параметров целевой функции  $\theta$  и  $\alpha$ . Это позволяет осуществить идентификацию целевой функции (решение обратной задачи). В случае, когда эволюционное развитие завершено и известно распределение индивидуумов в популяции, можно сделать предположение о соответствии максимумов функции распределения и целевой функции. В этом случае, учитывая линейное приближение целевой функции (3), можно установить ее параметры.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

**Доказательство теоремы.** Исследуем с помощью семимартингалных методов распределение  $\tau$  — момента пересечения границы процессом с разладкой. Найдем:

$$E \int_0^\tau X_t dt = E \left( \int_0^{\tau \wedge \theta} X_t dt + \int_{\tau \wedge \theta}^\tau X_t dt \right). \quad (4)$$

Учитывая выражения (1) и (4), получаем

$$E \int_0^\tau X_t dt = E \left( X_{\tau \wedge \theta} (\tau \wedge \theta) - \int_0^{\tau \wedge \theta} s dW_s \right) + E \left( X_\tau \tau - X_{\tau \wedge \theta} (\tau \wedge \theta) - \int_{\tau \wedge \theta}^\tau s dX_s \right).$$

В силу того, что для мартингала  $W$  математическое ожидание  $E \int_0^{\tau \wedge \theta} s dW_s = 0$ , а значение процесса  $X_t = 1$  при

$\alpha \geq 0$  (так как после пересечения границы процесс  $X$  равен этой границе), запишем ( $\tau \wedge \theta$  означает  $\min\{\tau, \theta\}$ )

$$\begin{aligned} E \int_0^\tau X_t dt &= E(X_{\tau \wedge \theta}(\tau \wedge \theta)) + E(\tau - X_{\tau \wedge \theta}(\tau \wedge \theta)) - \\ &- E \int_{\tau \wedge \theta}^\tau t(\alpha I(t \geq \theta)) dt + dW_t = \\ &= E\tau - E\left(I(\tau > \theta)\alpha\left(\frac{\tau^2}{2} - \frac{\theta^2}{2}\right)\right) = E\tau - \alpha \frac{E(\tau^2 - \theta^2)^+}{2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Заметим, что  $EX_\tau^2 = EX_t = 1$ , так как  $X_t = 1$ . В свою очередь,  $EX_\tau^2$  записывается в виде:  $EX_\tau^2 = E(\alpha(\tau - \theta)^+ + W_\tau)^2 = E(\alpha^2((\tau - \theta)^+)^2 + 2\alpha(\tau - \theta)^+ \cdot W_\tau + W_\tau^2)$ .

Подставим в выражение (1)  $t = \tau$  и получим, что  $W_\tau = 1 - \alpha(\tau - \theta)^+$ . Возьмем математическое ожидание  $W_\tau$  и получим, что  $1 = \alpha E(\tau - \theta)^+$  ( $EW_\tau = 0$ , поскольку  $E\tau < \infty$ ). Учитывая эти преобразования, получаем

$$\begin{aligned} EX_\tau^2 &= E(\alpha^2((\tau - \theta)^+)^2 + 2\alpha(1 - \alpha(\tau - \theta)^+)(\tau - \theta)^+ + \\ &+ W_\tau^2) = E\left(2\alpha(\tau - \theta)^+ - \alpha^2((\tau - \theta)^+)^2 + \int_0^\tau 2W_s dW_s + \tau\right) = \\ &= 2 - \alpha^2 E((\tau - \theta)^+)^2 + E\tau = 2 - \alpha^2 E((\tau - \theta)^+(\tau + \theta) - \\ &- 2\theta) + E\tau = 2 - \alpha^2 E((\tau^2 - \theta^2)^+ - 2\theta(\tau - \theta)^+) + E\tau = \\ &= 2 - \alpha^2 E(\tau^2 - \theta^2)^+ + 2\alpha\theta + E\tau. \end{aligned}$$

Следовательно,

$$\alpha \frac{E(\tau^2 - \theta^2)^+}{2} = \frac{1}{2\alpha} + \theta + \frac{E\tau}{2\alpha}. \quad (6)$$

Из выражений (5) и (6) получаем

$$\begin{aligned} E \int_0^\tau X_t dt &= E\tau - \frac{1}{2\alpha} - \theta - \frac{E\tau}{2\alpha} = \\ &= E\tau \left(1 - \frac{1}{2\alpha}\right) - \frac{1}{2\alpha} - \theta. \end{aligned} \quad (7)$$

Найдем величину  $E\tau$ . Представим  $\tau$  в виде

$$\begin{aligned} \tau &= ((\tau - \theta)^+ + \theta)I(\tau > \theta) + \tau I(\tau \leq \theta) = \\ &= (\tau - \theta)^+ + \theta I(\tau > \theta) + \tau I(\tau \leq \theta). \end{aligned}$$

Тогда

$$E\tau = \frac{1}{\alpha} + \theta(1 - F(\theta)) + \int_0^\theta x dF(x), \quad (8)$$

где  $F(x)$  — функция распределения первого момента пересечения границы винеровским процессом  $F(x) =$

$$= P(\sup_{0 \leq s \leq x} W_s \geq 1) = \int_0^x \frac{1}{\sqrt{2\pi s^3}} e^{-\frac{1}{2s}} ds. \text{ Исходя из того, что}$$

$$\int_0^\theta x dF(x) = \theta F(\theta) - \int_0^\theta F(x) dx, \text{ запишем выражение (8) в виде}$$

$$\begin{aligned} E\tau &= \frac{1}{\alpha} + \theta - \theta F(\theta) + \theta F(\theta) - \int_0^\theta F(x) dx = \\ &= \frac{1}{\alpha} + \int_0^\theta (1 - F(x)) dx = \frac{1}{\alpha} + \int_0^\theta G(x) dx, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $G(x) = 1 - F(x)$ . Таким образом, из выражений (7) и (9) получаем

$$E \int_0^\tau X_t dt = \left(\frac{1}{\alpha} + \int_0^\theta G(x) dx\right) \left(1 - \frac{1}{2\alpha}\right) - \frac{1}{2\alpha} - \theta,$$

и целевая функция принимает вид

$$\begin{aligned} \varphi &= E \int_0^\tau X_t dt + \beta E\tau = \left(\frac{1}{\alpha} + \int_0^\theta G(x) dx\right) \left(1 - \frac{1}{2\alpha}\right) - \\ &- \frac{1}{2\alpha} - \theta + \beta \left(\frac{1}{\alpha} + \int_0^\theta G(x) dx\right) = \\ &= \left(\frac{1}{\alpha} + \int_0^\theta G(x) dx\right) \left(1 + \beta - \frac{1}{2\alpha}\right) - \frac{1}{2\alpha} - \theta. \end{aligned}$$

Обозначим  $v = 1/\alpha$ , тогда полученная целевая функция записывается как

$$\varphi = \left(v + \int_0^\theta G(x) dx\right) \left(1 + \beta - \frac{v}{2}\right) - \frac{v}{2} - \theta.$$

Приравняем нулю частные производные целевой функции  $\varphi$  по  $\theta$  и  $v$  для последующего нахождения ее экстремумов:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \theta} = G(\theta) \left(1 + \beta - \frac{v}{2}\right) - 1 = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial v} = \left(1 + \beta - \frac{v}{2}\right) - \frac{1}{2} \left(v + \int_0^\theta G(x) dx\right) - \frac{1}{2} = 0. \quad (11)$$

$$\text{Выразим } v \text{ из уравнения (11): } v = \frac{1}{2} + \beta - \frac{1}{2} \int_0^\theta G(x) dx;$$

подставим в уравнение (10):

$$G(\theta^*) = 2 \left[ \frac{3}{2} + \beta + \frac{1}{2} \int_0^{\theta^*} G(x) dx \right]^{-1}. \quad (12)$$

В соответствии с функцией распределения первого момента пересечения границы винеровским процессом функция  $G(x)$  принимает вид (по определению (2) граница для процесса  $X = (X_t)_{t \geq 0}$  равна 1):

$$G(\theta) = 1 - F(\theta) = 1 - \int_0^\theta \frac{1}{\sqrt{2\pi t^3}} e^{-\frac{1}{2t}} dt. \quad (13)$$

Выразим  $\beta$  из формулы (12):

$$\beta = \frac{2}{G(\theta^*)} - \frac{3}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\theta^*} G(x) dx. \quad (14)$$

Подставим формулу (13) в выражение (14):

$$\begin{aligned} \beta &= 2 \left[ 1 - \int_0^{\theta^*} \frac{1}{\sqrt{2\pi t^3}} e^{-\frac{1}{2t}} dt \right]^{-1} - \frac{3}{2} - \\ &- \frac{1}{2} \left( \theta^* - \theta^* \int_0^{\theta^*} \frac{1}{\sqrt{2\pi t^3}} e^{-\frac{1}{2t}} dt + \int_0^{\theta^*} \frac{1}{\sqrt{2\pi t}} e^{-\frac{1}{2t}} dt \right). \end{aligned} \quad (15)$$

Подсчет интегралов в формуле (15) производился численным методом. Рассматривая поведение целевой





функции  $\varphi(\theta, \nu)$  при различных значениях параметра  $\beta$ , приходим к выводу, что при  $\beta \in (C; 0,5]$  и ограничении  $\theta \geq 0$  целевая функция  $\varphi$  имеет три точки, подозрительные на экстремум. Выполнив численный анализ их окрестностей, получим, что две из них являются локальными максимумами, а третья — седловая точка.

Таким образом, численно установлено, что целевая функция имеет два локальных максимума при  $b \in (C; 0,5]$  и значение константы  $C = 0,445 \pm 0,0001$ . При значениях  $\beta \leq C$  единственный локальный максимум целевой функции находится при  $\theta = 0$ . При  $\beta > 0,5$  целевая функция имеет один локальный максимум при  $\theta \geq 0$ . Теорема доказана.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ширяев А. Н. Некоторые точные формулы в задаче о разладке // Теория вероятностей и ее применение. — 1965. — Т. 10, вып. 2. — С. 380—385.
2. Ширяев А. Н. Об оптимальных методах в задачах скорейшего обнаружения // Теория вероятностей и ее применение. — 1963. — Т. 8, вып. 1. — С. 26—51.
3. Ширяев А. Н. Статистический последовательный анализ. — М.: Наука, 1976.

4. Пресман Э. Л., Сонин И. М. Последовательное управление по неполным данным. — М.: Наука, 1982.
5. Яшин А. И. Теоретические и прикладные задачи оценивания скачкообразных процессов. Препринт. — М.: Институт проблем управления, 1978.
6. Гихман И. И., Скороход А. В. Управляемые случайные процессы. — Киев: Наукова думка, 1977.
7. Дынкин Е. Б., Юшкевич А. А. Управляемые марковские процессы и их приложения. — М.: Наука, 1975.
8. Севастьянов Б. А. Ветвящиеся процессы. — М.: Наука, 1971.
9. Крылов Н. В. Управляемые процессы диффузионного типа. — М.: Наука, 1977.
10. Butov A. A., Kuznetsov N.A., Liptser R.Sh., et al. Generalized observations control in problems of stochastic optimization // IFAC Control Science and Technology (8th Triennial World Congress). Kyoto, Japan, 1981. — P. 851—856.
11. Скулачев В. П. Эволюция, митохондрии и кислород // Сорский образовательный журнал. — 1999. — № 9. — С. 4—10.
12. Carey J. R., Liedo P., Muller H. G., et al. Dual modes of aging in Mediterranean fruit fly females // Science. — 1998. — № 281 (5379). — P. 996—998.

☎ (8422) 63-66-78

E-mail: butov@mv.ru



УДК 577.71:519.95

# НОРМАЛЬНОЕ СТАРЕНИЕ КАК СЛЕДСТВИЕ РЕАКЦИИ УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ОРГАНИЗМА НА ВНЕШНИЕ СИГНАЛЫ, НЕ СПОСОБСТВУЮЩИЕ ЕГО ПОЛНОМУ САМОПОДДЕРЖАНИЮ I. Биологические предпосылки

А. В. Халявкин<sup>1</sup>, А. И. Яшин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт биохимической физики, Москва

<sup>2</sup>Университет Дьюка, г. Дюрам, США

Дан обзор результатов новейших исследований, подтвердивших способность клеток и других компонентов сложных организмов противостоять их старению. Поставлена задача поиска подходов к пониманию первопричины старения особей, состоящих из потенциально нестареющих клеток. Предположено, что старение организма скорее результат определенных сдвигов параметров его управляющих систем, чем фатальных изменений составляющих его клеток. Показано, что это может быть связано с тем, что способность организма к самоподдержанию зависит не только от его структурно-функциональных особенностей, но и от внешних условий, индуцирующих различные режимы жизнедеятельности. Приведены факты, совместимые с предложенным подходом.

## ВВЕДЕНИЕ

Известно, что показатель ожидаемой продолжительности жизни людей, построенный по странам — текущим рекордсменам по этому параметру — растет линейно уже более 160-ти лет (каждые 10 лет на 2,5 года у

женщин и несколько меньше у мужчин) [1]. С успехами в целенаправленном контроле и регулировании процесса старения это не связано, поскольку до сих пор не поняты причины, по которым регуляция и координация жизненных процессов в организме становятся с возрастом все менее эффективными, а сам стареющий организм все более уязвимым к факторам окружающей сре-

ды. Согласно взглядам Б. Стрелера, в самих клетках и многоклеточных организмах не заключено ничего такого, что препятствовало бы их превращению в нестареющие системы [2]. Такое мнение подтверждается и данными, полученными в новейших исследованиях [3–5]. Само же старение может быть скорее следствием отклонений в работе высших интегративных механизмов организма, чем результатом первичных деструктивных изменений его компонентов [6, 7]. Однако вопрос о причинах и фатальной неизбежности подобного рода отклонений остается открытым.

В этой связи предлагается концепция роли внешнего сигнала как ведущего фактора, задающего темп старения. Согласно этой концепции первопричиной естественного старения может быть дрейф ряда физиологических параметров, из-за неадекватного взаимодействия “среда — биообъект”, выводящего управление организмом из режима его полного самоподдержания. Учитывая, что математическое моделирование смертности и старения вносит весомый вклад в развитие современной геронтологии [8–10], вторая часть статьи будет посвящена модельному обоснованию концепции. В настоящей работе мы проанализируем некоторые биологические данные, необходимые для построения минимальной модели предлагаемой концепции.

## 1. СТАРЕНИЕ КАК БИОЛОГИЧЕСКИЙ ФЕНОМЕН

Старение организмов представляет собой сложный процесс, суммарное проявление которого состоит в возрастном снижении его надежности. Единого мнения о причинах и механизмах старения до сих пор нет [11]. Наиболее распространенными и приемлемыми концепциями старения считаются свободнорадикальная теория и теломерная гипотеза [11].

Согласно первой из них, старение рассматривается как процесс накопления повреждений в организме из-за действия весьма реакционноактивных частиц — свободных радикалов, главным образом, активных форм кислорода.

Теломерная гипотеза постулирует обусловленную пространственными ограничениями неизбежность неполной редупликации теломер — концевых участков линейных хромосом. Предполагается, что этот процесс в конечном итоге приводит к старению соматических клеток (т. е. клеток тела) и, следовательно, к старению всего организма. В ядрах клеток зародышевой линии, осуществляющей преемственность поколений, активен специальный фермент теломераза, постоянно достраивающий теломеры. Полагают, что именно поэтому зародышевая линия считается “бессмертной”, в отличие от стареющих соматических клеток.

Подчеркнем, что к настоящему времени накопилось много фактов, противоречащих этим концепциям. Поэтому в 2003 г. их сторонники отказались рассматривать окислительный стресс [12] и укорочение теломер [13] в качестве первопричины естественного старения. Отметим, что эти концепции все же имеют ограниченное применение, но лишь для патологического старения. Однако в данной статье мы рассматриваем только нормальное, физиологическое, старение.

Автор теломерной гипотезы старения А. М. Оловников признал, что она непригодна для объяснения старения [13] и взамен нее выдвинул новую, редусомную, ги-

потезу старения и контроля над ходом биологического времени в индивидуальном развитии [13, 14]. Согласно этой гипотезе, покрытая белками линейная молекула ДНК гипотетической частицы редусомы представляет собой копию сегмента хромосомной ДНК [14]. Редусома не покидает тело своей хромосомы даже при клеточных делениях, удерживаясь в своем хромосомном гнезде. Подобно теломерной ДНК линейная ДНК редусомы с течением времени укорачивается. Поэтому крошечные редусомы прогрессирующе уменьшаются в размерах; отсюда и их название. Вместе с убылью ДНК в редусоме уменьшается и число содержащихся в ней разных генов. Укорочение молекул редусомной ДНК (и вызванное этим изменение набора генов в редусомах) меняет с возрастом уровень экспрессии различных хромосомных генов и благодаря этому служит ключевым средством измерения биологического времени в индивидуальном развитии [14].

А давние сторонники свободнорадикальной концепции старения У. Орт и Р. Сохал, продлившие жизнь мух экспрессией дополнительных генов ферментов супероксиддисмутазы и каталазы, пересмотрели роль активных форм кислорода в развитии нормального старения [12]. Проанализировав собственные и литературные данные, они нашли, что степень прироста средней продолжительности жизни в популяции трансгенных мух отрицательно коррелирует со средней продолжительностью жизни у контрольных мух. Чем больше она была в контроле, тем меньше оказывался ее прирост у трансгенных мух. Наибольший эффект наблюдался у мух с исходно низкой продолжительностью жизни. У этих мух недостаточная активность фермента супероксиддисмутазы, контролирующая уровень свободных радикалов, вполне могла быть лимитирующим фактором. У мух с нормальной продолжительностью жизни эффект был незначительным и даже отрицательным. Поэтому совокупность имеющихся данных, по их мнению [12], никак не подтверждает роли окислительного стресса в становлении нормального, естественного старения. Хотя, повторимся, патологическое старение зачастую протекает на фоне окислительного стресса.

Кроме того, недавно выяснилась существенная физиологическая роль, которую свободнорадикальные процессы играют в регуляции многих функций организма. К примеру, оказалось, что активные формы кислорода являются особым классом так называемых вторичных посредников [15, 16]. Они, наряду с циклическим аденозинмонофосфатом, ионами кальция и некоторыми фосфолипидными метаболитами, осуществляют важную функцию в путях передачи сигналов от внеклеточных регуляторных лигандов (сигнальных молекул) через поверхностные рецепторы и последующие каскады внутриклеточных биохимических реакций вплоть до регуляции активности факторов транскрипции, контролирующей экспрессию генов. Образование в клетках активных форм кислорода находится под строгим контролем организма и регулируется при помощи набора гормонов, цитокинов, ростовых факторов и т. п. [15, 16]. Поэтому неоправданное применение антиоксидантов может подавить важные функции клеток и быть достаточно опасным. Отсюда понятно, почему в норме антиоксиданты оказывают, как правило, незначительный геропротекторный (т. е. замедляющий старение) эффект, тогда как при целом ряде патологий, связанных с повы-



шенным образованием активных форм кислорода, токсичных в высоких концентрациях, антиоксидантная терапия весьма эффективна.

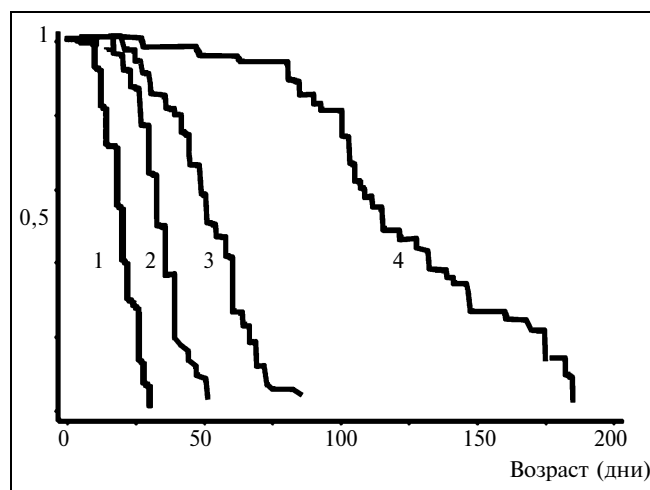
Таким образом, вопрос о первопричинах естественного, не патологического, старения вплоть до настоящего времени остается открытым.

## 2. ВНЕШНИЙ СИГНАЛ КАК ПРИЧИНА СТАРЕНИЯ

Для успешного функционирования и выживания индивидов важно своевременное обнаружение и обработка сигналов внешней среды, также как и адекватный отклик на них. Поэтому неудивительно, что ткани и органы, принадлежащие к физиологическим системам, эволюционно приспособлены к наиболее вероятному диапазону природного давления среды — совокупного влияния внешних факторов, соответствующих особенностям естественной среды обитания. И организм как целое реагирует на эту совокупность внешних воздействий посредством определенных изменений в системах управления физиологического уровня, а также специфическими изменениями в путях передачи сигналов клеточного уровня. Часть таких изменений может, в принципе, детерминировано модифицировать картину старения в соответствии с конкретными обстоятельствами.

По этой причине исследование процесса естественного старения путем наблюдения или изучения животных в неволе, также как и людей в относительно комфортных условиях, может быть недостаточно информативным [17, 18]. В то же время хорошо известно, что большинство исследований старения проведено именно на человеке и лабораторных или домашних животных, т. е. в искусственных условиях обитания. Эти обстоятельства неизбежно приводят к изменениям физиологии и поведения, не свойственным жизни на воле и не соответствующим оптимальным параметрам организма, заложенным эволюционно в его геноме [17, 18]. Поэтому можно полагать, что в естественной среде обитания качество функционирования гомеостатических физиологических систем должно быть значительно лучше, чем в лабораторных условиях, а возрастное сужение границ возможных отклонений от возрастной же нормы (сопротивляемости стрессовым воздействиям) должно проявляться в гораздо меньшей степени. Следовательно, темп старения организма в этих условиях может быть значительно ниже, а неспецифическая сопротивляемость существенно выше, чем в дезадаптирующих комфортных условиях.

Непосредственно проверить предположение о возможном позитивном влиянии адекватного окружения на паттерн старения затруднительно. Это связано с тем, что в лабораторных условиях практически невозможно воссоздать все компоненты естественной среды обитания, способствующей адекватному режиму жизнедеятельности с минимальным темпом старения. Однако если в генах, продукты которых вовлечены в передачу сигналов в контурах регуляции физиологических и внутриклеточных систем организма, произойдут мутации, это исказит реакцию организма на стимулы окружающей среды и изменит режим его жизнедеятельности. Ведь известно, что пути передачи сигналов состоят из разветвленных цепей биохимических реакций, в которых участвуют особые макромолекулы (лиганды, рецепторы, субстраты, адаптеры, ферменты и т. п.). Нарушения в



### Увеличение сроков жизни генетически модифицированных лабораторных нематод *C. elegans* [19]:

ордината — доля выживших к данному возрасту; 1 — контроль; 2 — мутанты *daf-2*; 3 — мутанты *daf-2* с ингибированием этого гена методом РНК интерференции; 4 — то же, что и 3, плюс удаление репродуктивных органов

работе генов, ответственных за синтез этих белков, могут приводить к отклонениям в работе этой сложной системы. Однако в ряде случаев такие сдвиги могут способствовать тому, что, находясь в лабораторных условиях, мутантная особь станет функционировать подобно нормальному организму в естественной среде. В подобных случаях темп ее старения должен быть ниже. А поскольку смертность от внешних причин в лабораторных условиях невысока, то у таких мутантов следует ожидать существенного увеличения сроков жизни.

В связи с этим интересно отметить, что в последнее время описано большое число мутаций или изменений уровней экспрессии ряда генов, увеличивающих продолжительность жизни лабораторных животных на 10...100% и выше (см., например, рисунок из работы [19] и обзоры [20, 21]). Многие из этих генов кодируют белки, вовлеченные во внутриклеточные пути передачи сигналов, а также во внеклеточные участки физиологических систем управления организмом. Продукты этих генов участвуют в процессах приема и обработки сигналов окружающей среды и их преобразовании в соответствующие физиологические, поведенческие, морфогенетические и другие системные реакции целостного организма. Кроме того, некоторые из этих генов непосредственно вовлечены в регулирование защитных механизмов. Например, активности антиоксидантных ферментов находятся под строгим гормональным контролем [22], который, в свою очередь, модулируется воздействиями окружающей среды. Таким образом, изучение подобных мутаций может способствовать как прояснению роли внешнего сигнала в становлении нормального старения, так и выявлению потенциалов организма к замедлению старения и к увеличению продолжительности его жизни.

Приведем по одному примеру, взятому с разных уровней организации живой материи. Эти примеры достаточно красноречиво иллюстрируют роль внешнего, по

отношению к биообъекту, фактора в становлении его естественного старения.

На макромолекулярном уровне рассмотрим старение коллагена — медленно обновляемого структурного белка (около 30% всех белков человека). С возрастом в коллагене накапливаются поперечные сшивки и происходит ряд других нежелательных, кажущихся неизбежными, физико-химических модификаций, ухудшающих его свойства опорно-сигнального белка. Однако выяснилось, что “на возрастные структурные изменения, или старение, коллагена оказывают влияние гормоны, и, следовательно, эти изменения являются вторичными причинами старения. В разные периоды жизни уровень гормонов меняется, а это может приводить к изменению физических свойств коллагена” ([23], с. 162). Манипулируя соотношением гормонов, удавалось получить молодой коллаген у старых животных [23]. Таким образом, старение коллагена “контролируется” внешними сигналами, в роли которых выступает набор гормонов.

Субклеточный уровень проиллюстрируем старением клеточных органелл — митохондрий. Для “энергетических станций” клеток, митохондрий, внешней средой является внутриклеточное окружение. До сих пор снижение активности митохондрий при старении связывалось с возрастным накоплением мутаций в их ДНК. Однако опыты по переносу митохондриальных ДНК от пожилых доноров к молодым показали, что они остаются функционально интактными [24]. И пересадка ядер “бессмертных” клеток HeLa в клетки пожилых доноров восстанавливала у них активность старых митохондрий [24]. Значит, снижение функции митохондрий с возрастом связано с сигналом извне.

На клеточном уровне можно привести пример, рассмотренный в работе [25]. Из него следует, что только свежeweделенные клетки больных (страдающих определенным заболеванием, по сути напоминающим нормальное старение) малочувствительны к инсулину. Когда же эти клетки несколько суток выдерживались вне организма, их чувствительность к инсулину восстанавливалась. Это значит, что в нарушении повинен не генетический дефект, а изменение внутренней среды организма, в котором жили клетки [25].

На органном уровне, в качестве подобного примера, напомним результаты экспериментов, в которых пересадка яичников старых не циклирующих крыс молодым крысам, у которых предварительно удаляли собственные яичники, приводит к восстановлению цикла у молодых реципиентов старых не функционировавших яичников [26, 27]. Значит, яичники старых животных перестают функционировать не из-за “истощения пула яйцеклеток” и не из-за “накопления повреждений”, а в результате изменений внутренней среды организма, возможно связанных с нарушениями на более высоких этапах регуляции. Вплоть до гипоталамуса, участвующего в контроле всех функций особи.

Видимо, это справедливо в отношении старения не только репродуктивных, но и других органов и, возможно, всего организма в целом. В пользу такого взгляда свидетельствуют эксперименты по подсоединению (“пересадке”) старых грызунов к эмбриональным гипоталамусам [28, 29]. Оказалось, что трансплантация эмбриональных гипоталамусов старым мышам и крысам восстанавливала их плодовитость, иммунный статус, и целый ряд других важных признаков, присущих моло-

дому организму, и продляла жизнь подопытным грызунам [28, 29]. Интересно, что сходных результатов удавалось добиться и различного рода искусственной активацией гипоталамических структур старых крыс [27, 30, 31], как бы восполняя дефицит потоков сигналов, понижающих эти регуляторные структуры. Дефицит, который присущ организмам подопытных животных, функционирующим в неволе.

Поскольку реакции организма во многом являются откликами на внешние воздействия, анализ приведенных выше и ряда других фактов позволил развить представление о том, что первопричина старения может быть связана с дрейфом ряда физиологических параметров (например, порогов чувствительности гипоталамических структур [25]) из-за неадекватного взаимодействия “среда — биообъект”, выводящего управление организмом из режима его самоподдержания. Представляет определенный интерес и тот факт, что базовые закономерности статистики смертности, такие как закон Гомперца и корреляция Стрелера—Милдвана [2, 8], тоже косвенно подтверждают предлагаемую концепцию. Подробности о популяционных данных, совместимых с развиваемым подходом, и минимальные модели, его иллюстрирующие, будут представлены в нашей следующей статье.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Принципы и подходы, позволяющие оценить теоретически достижимые минимальные темпы старения в условиях, побуждающих организмы как сложные системы к функционированию в адекватном режиме жизнедеятельности, до сих пор недостаточно разработаны. Однако анализ совокупности имеющихся данных показывает их совместимость с предположением о существовании внешних условий и индуцированных ими режимов функционирования, способствующих значительному замедлению процесса старения человека и других сложных организмов. В следующей статье мы приведем и проанализируем дополнительные данные в развитие предложенной концепции, а также представим минимальную математическую модель, описывающую процесс возникновения нормального старения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Oeppen J., Vaupel J. W.* Broken limits to life expectancy // *Science*. — 2002. — Vol. 296. — P. 1029—1030.
2. *Стрелер Б.* Время, клетки и старение. — М.: Мир, 1964.
3. *Mathon N.F., Malcolm D.S., Harrisingh M.C., et al.* Lack of replicative senescence in normal rodent glia // *Science*. — 2001. — Vol. 291. — P. 872—875.
4. *Tang D.G., Tokumoto Y.M., Apperly J.A., et al.* Lack of replicative senescence in cultured rat oligodendrocyte precursor cells // *Science*. — 2001. — Vol. 291. — P. 868—871.
5. *Халаякин А. В., Блохин А. В.* Длительное ограничение пролиферации клеток в культуре не приводит к их пролиферативному старению // *Цитология*. — 1994. — Т. 36, — № 5. — С. 465—468.
6. *Rosen R. J.* Feedforward and global system failure: a general mechanism for senescence // *J. Theor. Biol.* — 1978. — Vol. 74. — P. 579—590.
7. *Халаякин А. В.* Об одном подходе к контролю продолжительности жизни // *Проблемы биологии старения*. — А. А. Малиновский (ред.). — М.: — Наука, 1983. — С. 49—55.



8. *Yashin A.I., Iachine I.A., Begun A.S.* Mortality modelling: a review // *Math. Population Studies*. — 2000. — Vol. 8, — No 4. — P. 305–332.
9. *Крутько В. Н., Славин М. Б., Смирнова Т. М.* Математические основания геронтологии. — М.: УРСС, — 2002. — 384 с.
10. *Новосельцев В. Н., Новосельцева Ж. А., Яшин А. И.* Математическое моделирование в геронтологии — стратегические перспективы // *Успехи геронтологии*. — 2003. — Вып. 12. — С. 149–165.
11. *Анисимов В. Н.* Физиологические и молекулярные механизмы старения. — СПб.: — Наука, — 2003. — 468 с.
12. *Orr W.C., Sohal R.S.* Does overexpression of Cu, Zn-SOD extend life span in *Drosophila melanogaster*? // *Exp. Gerontol.* — 2003. — Vol. 38. — P. 227–230.
13. *Оловников А. М.* Редусомное старение: комментарии // *Успехи геронтологии*. — 2003. — Вып. 12. — С. 28–45.
14. *Оловников А. М.* Редусомная гипотеза старения // *Биохимия*. — 2003. — Т. 68. — С. 2–33.
15. *Турпаев К. Т.* Активные формы кислорода в регуляции генной экспрессии // Там же. — 2002. — Т. 67. — P. 339–352.
16. *Dröge W.* Free radicals in the physiological control of cell function // *Physiol. Rev.* — 2002. — Vol. 82. — P. 47–95.
17. *Comfort A.* The Biology of Senescence, — N.-Y.: Elsevier, 1979. — 414 p.
18. *Gershon H., Gershon D.* Critical assessment of paradigms in aging research // *Exp. Gerontol.* — 2001. — Vol. 36. — P. 1035–1048.
19. *Arantes-Oliveira N., Berman J. R., Kenyon C.* Healthy animals with extreme longevity // *Science*. — 2003. — Vol. 302, — No. 5645. — P. 611.
20. *Khalyavkin A. V., Yashin A. I.* How the analysis of genetic mutations can help us to solve basic problems in gerontology? I. Life-extending genetic modifications in round worm *C. elegans* // *Adv. Gerontol.* — 2003. — Vol. 11. — P. 34–42.
21. *Khalyavkin A. V., Yashin A.I.* How the analysis of genetic mutations can help us to solve basic problems in gerontology? II. Life-extending genetic modifications in budding yeast *S. cerevisiae*, fruit fly *D. melanogaster* and laboratory mice *M. musculus* // *Ibid.* — 2003. — Vol. 12. — P. 45–54.
22. *Bolzan A. D., Brown O. A., Goya R. G., Bianchi M.S.* Hormonal modulation of antioxidant enzyme activities in young and old rats // *Exp. Gerontol.* — 1995. — Vol. 30. — P. 169–175.
23. *Канунго М.* Биохимия старения. — М.: Мир, — 1982. — 294 с.
24. *Hayashi J.-I., Ohta S., Kagawa Y. et al.* Nuclear but not mitochondrial genome involvement in human age-related mitochondrial dysfunction. Functional integrity of mitochondrial DNA from aged subjects. // *J. Biol. Chemistry*. — 1996. — Vol. 269, — No. 9. — P. 6878–6883.
25. *Дильман В. М.* Большие биологические часы. — М.: Знание, — 1986. — 256 с.
26. *Aschheim P.* Aging in the hypothalamic-hypophyseal-ovarian axis in the rat // *Hypothalamus, Pituitary and Aging*.-Springfield: Ch. C. Thomas. — 1976. — P. 376–418.
27. *Мейтес Д.* Роль нейроэндокринной системы в старении // *Физиол. журн.* — 1990. — Т. 36, — № 5. С 70–76.
28. *Ата-Мурадова Ф. А., Донцов В. И.* Влияние пересадки эмбрионального гипоталамуса на лимфоидные ткани у старых мышей // *Докл. АН СССР*. — 1987. — Т. 297. — С. 237–240.
29. *Huang H. H., Kissane J. Q., Hawrylewicz E. J.* Restoration of sexual function and fertility by fetal hypothalamus transplant in impotent aged male rats // *Neurobiol. Aging*. — 1987. — Vol. 8. — P. 465–472.
30. *Clemens J. A., Amenomori Y., Jenkins T., Meites J.* Effects of hypothalamic stimulation, hormones and drugs on ovarian function in old female rats // *Proc. Soc. Exp. Biol. and Med.* — 1969. — Vol. 182. P. — 561–563.
31. *Гаркави Л. Х., Квакина Е. Б., Уколова М. А.* Адаптационные реакции и резистентность организма. — Ростов-на-Дону: Рост. ун-т. — 1990. — 224 с.

☎ (095) 422-71-64

E-mail: [ab3711@mail.sitek.net](mailto:ab3711@mail.sitek.net)

[yashin@cds.duke.edu](mailto:yashin@cds.duke.edu)



## ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Статья представляется в редакцию по электронной почте или в одном экземпляре на бумаге, к которому необходимо приложить дискету с текстом, идентичным напечатанному. Аннотация, название статьи и фамилии авторов желательно перевести на английский язык. Объем оригинальной статьи не должен превышать 12, обзорной — 18 страниц текста. Текст печатается через полтора интервала с одной стороны бумаги формата А4, страницы нумеруются. В электронной форме текст должен быть набран в редакторе не ниже Word 97 шрифтом Times New Roman, 12 пунктов.

Рисунки должны иметь расширение, совместимое с Word 97 (Рисунок MS Word (толщина линий — не менее 3 пкс), редакторы CorelDraw, Photoshop, Illustrator и т.п.).

Фотографии должны быть предельно четкими, на глянцевой бумаге или в формате TIFF с разрешением 300 dpi (цветовая кодировка CMYK). Все буквенные обозначения на рисунках необходимо пояснить в основном или подрисовочном текстах.

Математические формулы следует набирать в формульном редакторе MathTypes 5.0 Equation или MS Equation 3.0, греческие и русские буквы набирать прямым шрифтом, латинские — курсивом. Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в последующем изложении.

Список литературы составляется в порядке цитирования и оформляется в соответствии с действующим ГОСТом. Ссылки на литературу в тексте отмечаются порядковыми номерами в квадратных скобках.

Перед заголовком статьи желательно указать индекс УДК, а в ее конце — номер контактного телефона и электронный адрес.





# МОДЕЛИ РЕФЛЕКСИВНОГО ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Д. А. Новиков<sup>1</sup>, А. Г. Чхартишвили<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова, г. Москва,

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

Дан обзор современного состояния теоретико-игровых моделей рефлексивного принятия решений. Отмечено, что большинство концепций равновесия в теории игр основаны на том, что параметры игры являются общим знанием, т. е. известны всем игрокам (агентам), всем агентам известно, что это всем известно и так далее до бесконечности. Рассмотрен общий случай, когда агенты могут иметь различные представления о представлениях друг друга, что приводит к бесконечной (рефлексивной) структуре информированности. Показано, что в этом случае целесообразно применение концепции информационного равновесия. Описана рефлексивная модель, дано определение информационного равновесия, приведены результаты исследования его свойств (существование, стабильность и др.) и решения для ряда случаев задачи о максимальном ранге рефлексии, а также некоторые примеры.

## ВВЕДЕНИЕ

Теоретико-игровые модели широко применяются для описания социально-экономических систем (см., например, книги [1–3]). Многообразие экономических и социальных отношений обуславливает и многообразие постановок игровых задач. В настоящей работе обсуждается информационный аспект принятия решений в конфликтной ситуации и, в частности, влияние взаимной информированности.

Как известно [2, 3], игра  $\Gamma_0$  в нормальной форме описывается, во-первых, кортежем  $\Gamma_0 = \{N, (X_i)_{i \in N}, (f_i(\cdot))_{i \in N}\}$ , включающим в себя множество игроков (агентов)  $N = \{1, 2, \dots, n\}$ , множества их допустимых действий  $(X_i)_{i \in N}$  и совокупность целевых функций  $(f_i(\cdot))_{i \in N}$ ;  $f_i: \prod_{j \in N} X_j \rightarrow \mathbb{R}^1$ ,  $i \in N$  (здесь и далее  $\mathbb{R}^1$  — множество вещественных чисел), и, во-вторых, — информированностью агентов, т. е. той информацией, которой они обладают на момент выбора своих действий. Традиционно в теории некооперативных игр предполагается, что агенты выбирают свои действия одновременно и независимо, а информация об игре  $\Gamma_0$  является *общим знанием* (common knowledge — см., например, работы [2–7]), т. е. каждому агенту известен набор участников игры, все целевые функции и допустимые множества, а также известно, что это известно остальным агентам и им известно также о его информированности и так далее до бесконечности. Можно сказать так: все агенты знают, в

какую игру они играют, т. е. условия игры (правила, возможности и интересы участников) являются общим знанием.

Для выбора действия в описанной ситуации каждый агент должен смоделировать действия других агентов, чтобы самому выбрать действие, максимизирующее целевую функцию (предположение о том, что агент, выбирая свое действие, пытается максимизировать целевую функцию с учетом всей имеющейся у него информации, называется *гипотезой рационального поведения* [2]). Это моделирование агентом хода мысли других агентов называется *рефлексией* [4–6]. И здесь, опять же, весьма существенную роль играет информированность агентов.

Размышления агента о выборе своего действия включают в себя *стратегическую рефлексию* — какие действия выберут остальные? Размышления такого рода можно проводить различным образом, и исход игры, соответственно, будет разным. В настоящей работе мы будем исходить из наиболее распространенной сегодня концепции решения игры — равновесия Нэша. Равновесие Нэша — это ситуация, в которой каждый агент выбирает наилучшее для себя действие при фиксированных действиях остальных (или, иначе говоря, ситуация, в которой никто не может увеличить свой выигрыш, выбрав в одностороннем порядке другое действие). Более строго: вектор действий  $(x_1^*, \dots, x_n^*)$  называется равновесным по Нэшу, если  $\forall i \in N \quad x_i^* \in \operatorname{Arg} \max_{x_i \in X_i} f_i(x_1^*, \dots, x_{i-1}^*, x_i, x_{i+1}^*, \dots, x_n^*)$

Существенно следующее: чтобы вычислить свое равновесное по Нэшу действие,  $i$ -й агент должен знать все це-



левые функции и допустимые множества и быть уверенным, что и остальные игроки их знают, и что они знают, что все остальные их знают и т. д. Таким образом, концепция равновесия Нэша существенно опирается на то обстоятельство, что условия игры являются общим знанием.

Отметим, что существует ряд моделей, в которых стратегическая рефлексия более сложная, чем в игре в нормальной форме  $\Gamma_0$  (в том числе стратегическая рефлексия в биматричных играх, рассмотренная в работе [5]). Среди них: иерархические игры [8], информационные расширения игр [9, 10], концепции связанного равновесия (correlated equilibrium) [3] и решения в угрозах-контругрозах [11]. Тем не менее, во всех этих моделях условия игры являются общим знанием.

В отличие от кратко перечисленных выше моделей стратегической рефлексии в настоящей работе рассматривается модель, в которой не все параметры игры являются общим знанием. Для описания этой модели предположим, что выигрыши агентов зависят не только от их действий, но и от некоторого параметра  $\theta \in \Omega$  (“состояния природы”), значение которого не является общим знанием, т. е. целевая функция  $i$ -го агента имеет вид  $f_i(\theta, x_1, \dots, x_n)$ ,  $i \in N$ . Тогда стратегической рефлексии логически предшествует *информационная рефлексия* — размышления агента о том, что каждый агент знает (предполагает) о параметре  $\theta$ , а также о предположениях (представлениях) других агентов и пр. Тем самым мы приходим к понятию структуры информированности агента, отражающей его информированность о неизвестном параметре, о представлениях других агентов и т. д.

В работе [12] в рамках вероятностной информированности (представления агентов включают в себя следующие компоненты: вероятностное распределение на множестве состояний природы; вероятностное распределение на множестве состояний природы и распределения на множестве состояний природы, характеризующих представления остальных агентов, и т. д.) было построено универсальное пространство возможных взаимных представлений (universal beliefs space). При этом игра формально сводится к некоей байесовой игре [2–5], решением которой является равновесие Байеса–Нэша, введенное Дж. Харшаньи [13].

В байесовых играх, во-первых, как правило, предполагается, что представления агентов (априорное распределение вероятностей состояний природы) являются общим знанием (возможность отказа от предположения об общем знании априорных вероятностей в байесовой игре обсуждается в работе [14]). Во-вторых, предложенная в работе [12] конструкция настолько громоздка, что найти решение “универсальной” байесовой игры в общем случае, по-видимому, невозможно (см. также работу [15]).

Поэтому целесообразно рассматривать частный случай представлений агентов — точечную структуру информированности (у агентов имеются вполне определенные представления о значении неопределенного параметра; о том, каковы представления (также вполне определенные) остальных агентов, и т. д. [16]). Для нее можно формулировать определение конечной сложности, позволяющее, в свою очередь, конструктивно определить информационное равновесие [16], являющееся обобщением равновесия Нэша, и исследовать его свойства: существование [16, 17], стабильность [18] и др., а также решить ряд прикладных задач [5, 6, 19].

## 1. СТРУКТУРА ИНФОРМИРОВАННОСТИ

Рассмотрим множество  $N = \{1, 2, \dots, n\}$  агентов. Если в ситуации присутствует неопределенный параметр  $\theta \in \Omega$  (будем считать, что множество  $\Omega$  является общим знанием), то *структура информированности*  $I_i$   $i$ -го агента включает в себя следующие элементы: представление  $i$ -го агента о параметре  $\theta$  — обозначим его  $\theta_i$ ,  $\theta_i \in \Omega$ ; представления  $i$ -го агента о представлениях других агентов о параметре  $\theta$  — обозначим их  $\theta_{ij}$ ,  $\theta_{ij} \in \Omega$ ,  $j \in N$ ; представления  $i$ -го агента о представлении  $j$ -го агента о представлении  $k$ -го агента — обозначим их  $\theta_{ijk}$ ,  $\theta_{ijk} \in \Omega$ ,  $j, k \in N$ . И так далее. В результате мы получаем иерархию представлений  $i$ -го агента.

Иначе говоря, структура информированности  $I_i$   $i$ -го агента задается набором всевозможных значений вида  $\theta_{ij_1, \dots, j_l}$ , где  $l$  пробегает множество целых неотрицательных чисел,  $j_1, \dots, j_l \in N$ , а  $\theta_{ij_1, \dots, j_l} \in \Omega$ .

Аналогично задается *структура информированности*  $I$  *игры* в целом — набором значений  $\theta_{i_1, \dots, i_l}$ , где  $l$  пробегает множество целых неотрицательных чисел,  $j_1, \dots, j_l \in N$ , а  $\theta_{i_1, \dots, i_l} \in \Omega$ . Подчеркнем, что структура информированности  $I$  “недоступна” наблюдению агентов, каждому из которых известна лишь некоторая ее часть.

Таким образом, структура информированности — бесконечное  $n$ -дерево (т. е. тип структуры постоянен и является  $n$ -деревом), вершинам которого соответствует конкретная информированность реальных и фантомных (см. ниже) агентов.

*Рефлексивной игрой*  $\Gamma_I$  назовем игру, описываемую следующим кортежем:

$$\Gamma_I = \{N, (X_i)_{i \in N}, (f_i(\cdot))_{i \in N}, I\},$$

где  $N$  — множество агентов,  $X_i$  — множество допустимых действий  $i$ -го агента,  $f_i(\cdot): \Omega \times X_1 \times \dots \times X_n \rightarrow \mathfrak{R}^1$  — его целевая функция,  $i \in N$ ,  $I$  — структура информированности.

Отметим, что термин “рефлексивные игры” был введен В.А. Лефевром в 1965 г. (см. систематическое изложение предложенного им подхода в работе [4]). Однако в упомянутой работе содержится, в основном, качественное обсуждение эффектов рефлексии во взаимодействии субъектов, и никакой общей концепции решения для этого класса игр не предлагается.

Таким образом, рефлексивная игра является обобщением понятия игры  $\Gamma_0$  в нормальной форме на случай, когда информированность агентов отражена иерархией их представлений (структурой информированности  $I$ ) о состоянии природы (остальные параметры игры являются общим знанием). В рамках принятого определения “классическая” игра в нормальной форме является частным случаем рефлексивной игры — игры с общим знанием. В “предельном” случае — когда состояние природы является общим знанием — предлагаемая в настоящей работе концепция решения рефлексивной игры (информационное равновесие — см. § 2) переходит в равновесие Нэша.

Сделаем важное замечание: в настоящей работе мы ограничимся рассмотрением *точечной* структуры информированности, компоненты которой состоят лишь из элементов множества  $\Omega$ . Более общим случаем является, например, интервальная или вероятностная информированность (о последней см. Введение).

Для формулировки некоторых определений и свойств нам понадобятся следующие обозначения:  $\Sigma_+$  — множество всевозможных конечных последовательностей индексов из  $N$ ;  $\Sigma$  — объединение множества  $\Sigma_+$  с пустой последовательностью;  $|\sigma|$  — число индексов в последовательности  $\sigma$  (для пустой последовательности принимается равным нулю).

Если  $\theta_i$  — представления  $i$ -го агента о неопределенном параметре, а  $\theta_{ii}$  — представления  $i$ -го агента о собственном представлении, то естественно считать, что  $\theta_{ii} = \theta_i$ . Иными словами,  $i$ -й агент правильно информирован о собственных представлениях, а также считает, что таковы и другие агенты и т. д. Формально это означает, что выполнена *аксиома автоинформированности*, которую далее будем предполагать имеющей место:  $\forall i \in N \forall \tau, \sigma \in \Sigma \theta_{\tau i \sigma} = \theta_{\tau i \sigma}$ .

Эта аксиома означает, в частности, что, зная  $\theta_\tau$  для всех  $\tau \in \Sigma_+$ , таких что  $|\tau| = \gamma$ , можно однозначно найти  $\theta_\tau$  для всех  $\tau \in \Sigma_+$ , таких что  $|\tau| < \gamma$ .

Наряду со структурами информированности  $I_i, i \in N$ , можно рассматривать структуры информированности  $I_j$  (структура информированности  $j$ -го агента в представлении  $i$ -го агента),  $I_{ijk}$  и т. д. отождествляя структуру информированности с характеризуемым ею агентом, можно сказать, что, наряду с  $n$  реальными агентами ( $i$ -агентами, где  $i \in N$ ) со структурами информированности  $I_i$ , в игре участвуют *фантомные агенты* ( $\tau$ -агенты, где  $\tau \in \Sigma_+, |\tau| \geq 2$ ) со структурами информированности  $I_\tau = \{\theta_{\tau\sigma}\}, \sigma \in \Sigma$ . Фантомные агенты, существуя в сознании реальных агентов, влияют на их действия, о чем пойдет речь далее.

Определим существенное для дальнейших рассуждений понятие тождественности структур информированности.

Структуры информированности  $I_\lambda$  и  $I_\mu$  ( $\lambda, \mu \in \Sigma_+$ ) называются *тождественными*, если выполнены условия:

- $\theta_{\lambda\sigma} = \theta_{\mu\sigma}$  для любого  $\sigma \in \Sigma$ ;
- последние индексы в последовательностях  $\lambda$  и  $\mu$  совпадают.

Будем обозначать тождественность структур информированности следующим образом:  $I_\lambda = I_\mu$ .

Первое из этих условий в определении тождественности структур прозрачно, второе же требует некоторых пояснений. Дело в том, что далее мы будем обсуждать действие  $\tau$ -агента в зависимости от его структуры информированности  $I_\tau$  и целевой функции  $f_i$ , которая как раз определяется последним индексом последовательности  $\tau$ . Поэтому удобно считать, что тождественность структур информированности означает в том числе и тождественность целевых функций.

**Утверждение 1.**  $I_\lambda = I_\mu \Leftrightarrow \forall \sigma \in \Sigma I_{\lambda\sigma} = I_{\mu\sigma}$

Доказательства утверждений 1–6 (см. далее) можно найти в работах [5, 16, 17].

Содержательный смысл утверждения 1 состоит в том, что тождественность двух структур информированности в точности означает тождественность всех их подструктур.

Следующее утверждение представляет собой, по сути, иную формулировку аксиомы автоинформированности.

**Утверждение 2.**  $\forall i \in N \forall \tau, \sigma \in \Sigma I_{\tau i \sigma} = I_{\tau i \sigma}$ .

Определение тождественности структур информированности (как и последующие, приводимые в настоящем параграфе) можно переформулировать так, чтобы соответствующее свойство структуры информированности выполнялось не объективно, а  $\tau$ -субъективно — в представлении  $\tau$ -агента ( $\tau \in \Sigma_+$ ): структуры информированности  $I_\lambda$  и  $I_\mu$  ( $\lambda, \mu \in \Sigma_+$ ) называются  $\tau$ -субъективно тождественными, если  $I_{\tau\lambda} = I_{\tau\mu}$ .

В дальнейшем будем формулировать определения и утверждения сразу  $\tau$ -субъективно для  $\tau \in \Sigma$ , имея в виду, что если  $\tau$  — пустая последовательность индексов, то “ $\tau$ -субъективно” означает “объективно”.

$\lambda$ -агент называется  $\tau$ -субъективно адекватно информированным о представлениях  $\mu$ -агента (или, короче, о  $\mu$ -агенте), если  $I_{\tau\lambda\mu} = I_{\tau\mu}$  ( $\lambda, \mu \in \Sigma_+, \tau \in \Sigma$ ). Будем обозначать  $\tau$ -субъективную адекватную информированность  $\lambda$ -агента о  $\mu$ -агенте следующим образом:  $I_\lambda >_\tau I_\mu$ .

**Утверждение 3.** Каждый реальный агент  $\tau$ -субъективно считает себя адекватно информированным о любом агенте, т. е.  $\forall i \in N \forall \tau \in \Sigma \forall \sigma \in \Sigma_+ I_i >_{\tau i} I_\sigma$ .

Содержательно утверждение 3 отражает тот факт, что рассматриваемая точечная структура информированности подразумевает наличие у каждого агента уверенности в своей адекватной информированности о всех элементах этой структуры.

$\lambda$ -агент и  $\mu$ -агент называются  $\tau$ -субъективно взаимно информированными, если одновременно выполнены тождества  $I_{\tau\lambda\mu} = I_{\tau\mu}$ ,  $I_{\tau\mu\lambda} = I_{\tau\lambda}$  ( $\lambda, \mu \in \Sigma_+, \tau \in \Sigma$ ).

Будем обозначать  $\tau$ -субъективную взаимную информированность  $\lambda$ -агента и  $\mu$ -агента следующим образом:  $I_\lambda ><_\tau I_\mu$ .

$\lambda$ -агент и  $\mu$ -агент называются  $\tau$ -субъективно одинаково информированными о  $\sigma$ -агенте, если  $I_{\tau\lambda\sigma} = I_{\tau\mu\sigma}$  ( $\sigma, \lambda, \mu \in \Sigma_+, \tau \in \Sigma$ ).

Будем обозначать  $\tau$ -субъективную одинаковую информированность  $\lambda$ -агента и  $\mu$ -агента о  $\sigma$ -агенте следующим образом:  $I_\lambda >_\sigma <_\tau I_\mu$ .

$\lambda$ -агент и  $\mu$ -агент называются  $\tau$ -субъективно одинаково информированными, если  $\forall i \in N I_{\tau\lambda i} = I_{\tau\mu i}$  ( $\lambda, \mu \in \Sigma_+, \tau \in \Sigma$ ).

Будем обозначать  $\tau$ -субъективную одинаковую информированность  $\lambda$ -агента и  $\mu$ -агента следующим образом:  $I_\lambda \sim_\tau I_\mu$ .

Отметим, что отношения одинаковой информированности о каком-либо агенте и одинаковой информированности являются отношениями эквивалентности (т. е. рефлексивны, симметричны и транзитивны на множестве агентов). Показем, что одинаковая информированность равносильна одинаковой информированности о любом агенте.

**Утверждение 4.**  $I_\lambda \sim_\tau I_\mu \Leftrightarrow \forall \sigma \in \Sigma_+ I_\lambda >_\sigma <_\tau I_\mu$ .

Приведенные определения показывают, что описанные ситуации в содержательных терминах адекватной,





взаимной и одинаковой информированности могут быть описаны через тождество соответствующих структур информированности. Следующее утверждение касается связи введенных понятий друг с другом.

**Утверждение 5.** Для любого  $\tau \in \Sigma$  следующие условия равносильны:

- любые два реальных агента  $\tau$ -субъективно являются взаимно информированными;
- все реальные агенты  $\tau$ -субъективно являются одинаково информированными;
- для любого  $i \in N$  структура  $I_{\sigma i}$   $\tau$ -субъективно зависит только от  $i$ .

То есть для любого  $\tau \in \Sigma$  выполнено:  $(\forall i, j \in N I_i > <_{\tau} I_j) \Leftrightarrow (I_1 \sim_{\tau} \dots \sim_{\tau} I_n) \Leftrightarrow (\forall i \in N \forall \sigma \in \Sigma I_{\sigma i} = I_{\tau i})$ .

Понятие тождественности структур информированности позволяет определить их важное свойство — сложность. Заметим, что наряду со структурой  $I$  имеется счетное множество структур  $I_{\tau}$ ,  $\tau \in \Sigma_+$ , среди которых можно при помощи отношения тождественности выделить классы попарно нетождественных структур. Число этих классов естественно считать *сложностью структуры информированности*.

Будем говорить, что структура информированности  $I$  имеет *конечную сложность*  $v = v(I)$ , если существует такой конечный набор попарно нетождественных структур  $\{I_{\tau_1}, I_{\tau_2}, \dots, I_{\tau_n}\}$ ,  $\tau_l \in \Sigma_+$ ,  $l \in \{1, \dots, n\}$ , что для любой структуры  $I_{\sigma}$ ,  $\sigma \in \Sigma_+$  найдется тождественная ей структура  $I_{\tau_l}$  из этого набора. Если такого конечного набора не существует, будем говорить, что структура  $I$  имеет бесконечную сложность:  $v(I) = \infty$ .

Структуру информированности, имеющую конечную сложность, будем называть *конечной*. В противном случае структуру информированности будем называть *бесконечной*.

Ясно, что минимально возможная сложность структуры информированности в точности равна числу участвующих в игре реальных агентов (напомним, что по определению тождественности структур информированности они попарно различаются у реальных агентов).

Любой набор (конечный или счетный) попарно нетождественных структур  $I_{\tau}$ ,  $\tau \in \Sigma_+$ , такой, что любая структура  $I_{\sigma}$ ,  $\sigma \in \Sigma_+$ , тождественна одной из них, назовем *базисом* структуры информированности  $I$ .

Если структура информированности  $I$  имеет конечную сложность, то можно определить максимальную длину последовательности индексов  $\gamma$  такую, что, зная все структуры  $I_{\tau}$ ,  $\tau \in \Sigma_+$ ,  $|\tau| = \gamma$ , можно найти и все остальные структуры. Эта длина в определенном смысле характеризует ранг рефлексии, необходимый для описания структуры информированности.

Будем говорить, что структура информированности  $I$ ,  $v(I) < \infty$ , имеет *конечную глубину*  $\gamma = \gamma(I)$ , если:

- для любой структуры  $I_{\sigma}$ ,  $\sigma \in \Sigma_+$ , найдется тождественная ей структура  $I_{\tau}$ ,  $\tau \in \Sigma_+$ ,  $|\tau| \leq \gamma$ ;
- для любого целого положительного числа  $\xi$ ,  $\xi < \gamma$ , существует структура  $I_{\sigma}$ ,  $\sigma \in \Sigma_+$ , не тождественная никакой из структур  $I_{\tau}$ ,  $\tau \in \Sigma_+$ ,  $|\tau| = \xi$ .

Если  $v(I) = \infty$ , то и глубину будем считать бесконечной:  $\gamma(I) = \infty$ .

Введенный “язык” описания структур информированности является удобным средством анализа их

свойств — одинаковой, адекватной, взаимной и другой информированности агентов. Имея описание структуры информированности, можно рассматривать процесс совместного принятия решений реальными и фантомными агентами, что приводит к понятию информационного равновесия.

## 2. ИНФОРМАЦИОННОЕ РАВНОВЕСИЕ

Если задана структура  $I$  информированности игры, то тем самым задана и структура информированности каждого из агентов (как реальных, так и фантомных). Выбор  $\tau$ -агентом своего действия  $x_{\tau}$  в рамках гипотезы рационального поведения определяется его структурой информированности  $I_{\tau}$ , поэтому, имея перед собой эту структуру, можно смоделировать его рассуждения и определить это его действие. Выбирая свое действие, агент моделирует действия других агентов (осуществляет рефлекссию). Поэтому при определении исхода игры необходимо учитывать действия как реальных, так и фантомных агентов.

Набор действий  $x_{\tau}^*$ ,  $\tau \in \Sigma_+$ , назовем *информационным равновесием*, если выполнены следующие условия:

1) структура информированности  $I$  имеет конечную сложность  $v$ ;

$$2) \forall \lambda, \mu \in \Sigma_+ I_{\lambda} = I_{\mu} \Rightarrow x_{\lambda}^* = x_{\mu}^*$$

$$3) \forall i \in N, \forall \sigma \in \Sigma$$

$$x_{\sigma i}^* \in \text{Arg max}_{x_i \in X_i} f_i(\theta_{\sigma}, x_{\sigma i 1}^*, \dots, x_{\sigma i, i-1}^*, x_i, x_{\sigma i, i+1}^*, \dots, x_{\sigma i, n}^*) \quad (1)$$

Первое условие означает, что в рефлексивной игре участвует конечное число реальных и фантомных агентов. Второе условие отражает требование того, что одинаково информированные агенты выбирают одинаковые действия. И, наконец, третье условие отражает рациональное поведение агентов — каждый из них стремится выбором собственного действия максимизировать свою целевую функцию, подставляя в нее действия других агентов, которые оказываются рациональными с точки зрения рассматриваемого агента в рамках имеющихся у него представлений о других агентах.

В соответствии с условием 2 для определения информационного равновесия требуется решить, казалось бы, бесконечное (счетное) число уравнений и получить столько же значений  $x_{\tau}^*$ . Однако оказывается, что на самом деле число уравнений и значений конечно.

**Утверждение 6.** Если информационное равновесие  $x_{\tau}^*$ ,  $\tau \in \Sigma_+$ , существует, то оно состоит из не более чем  $v$  попарно различных действий, а в системе (1) содержится не более, чем  $v$  попарно различных соотношений.

Таким образом, для нахождения информационного равновесия  $x_{\tau}^*$ ,  $\tau \in \Sigma_+$ , достаточно записать  $v$  условий (1) для каждого из  $v$  попарно различных значений  $x_{\tau}^*$ , отвечающих попарно различным структурам информированности  $I_{\tau}$ .

Если все агенты одинаково информированы, то сложность структуры информированности минимальна и равна числу агентов. В этом случае система (1) пере-

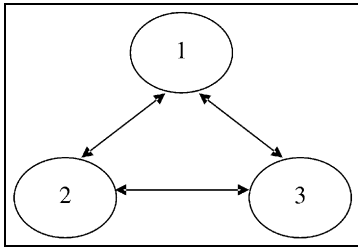


Рис. 1. Граф рефлексивной игры в примере 1 (все агенты одинаково информированы)

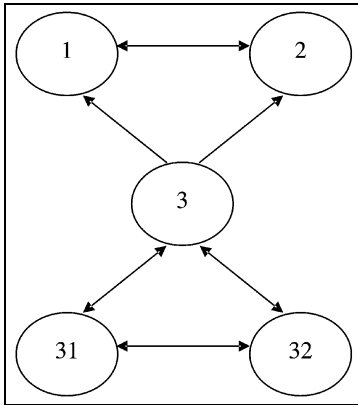


Рис. 2. Граф рефлексивной игры в примере 1 (первые два агента — одинаково информированные оптимисты, а третий — пессимист, который считает всех трех агентов одинаково информированными пессимистами; первые два агента адекватно информированы о третьем агенте)

ходит в определение равновесия Нэша, а информационное равновесие — в равновесие Нэша.

Удобным инструментом исследования информационного равновесия служит *граф рефлексивной игры* [5], в котором вершины соответствуют реальным и фантомным агентам (т. е. число вершин равно  $v$  — сложности структуры информированности), и в каждую вершину-агента входят дуги (их число на единицу меньше числа реальных агентов), идущие из вершин-агентов, от действий которых в субъективном равновесии зависит выигрыш данного агента. Граф рефлексивной игры может быть построен и без конкретизации целевых функций агентов. При этом он отражает если не количественное соотношение интересов, то качественное соотношение информированности рефлексизирующих агентов, и служит удобным и выразительным средством описания эффектов рефлексии.

**Пример 1** (олигополия Курно). Пусть имеются три агента с целевыми функциями следующего вида:

$$f_i(\theta, x_1, x_2, x_3) = (\theta - x_1 - x_2 - x_3) x_i - x_i^2/2, \text{ где } x_i \geq 0, i \in N = \{1, 2, 3\}; \theta \in \Omega = \{1, 2\}.$$

Содержательно,  $x_i$  — объем выпуска продукции  $i$ -м агентом,  $\theta$  — спрос на производимую продукцию. Тогда первое слагаемое в целевой функции может интерпретироваться как выручка от продаж (произведение цены на объем продаж), а второе слагаемое — как затраты на

производство. Для краткости будем называть агента, считающего, что спрос низкий ( $\theta = 1$ ), пессимистом, а считающего, что спрос высокий ( $\theta = 2$ ), — оптимистом.

Пусть первые два агента — оптимисты, а третий — пессимист, причем все трое одинаково информированы. Тогда в соответствии с утверждением 5 для любого  $\sigma \in \Sigma$  выполняются тождества  $I_{\sigma 1} = I_1, I_{\sigma 2} = I_2, I_{\sigma 3} = I_3$  (согласно условию 2 определения информационного равновесия, аналогичные соотношения выполняются для равновесных действий  $x_i^*$ ). Видно, что любая структура информированности тождественна одной из трех, образующих базис:  $\{I_1, I_2, I_3\}$ . Поэтому сложность данной структуры информированности равна трем, а глубина равна единице. Граф рассматриваемой рефлексивной игры приведен на рис. 1.

Действия агентов в ситуации информационного равновесия (являющегося параметрическим равновесием Нэша) будут следующими:  $x_1^* = x_2^* = 1/2, x_3^* = 0$ .

Рассмотрим другой вариант информированности: пусть первые два агента — оптимисты, а третий — пессимист, который считает всех трех агентов одинаково информированными пессимистами. Первые два агента одинаково информированы, причем оба они адекватно информированы о третьем агенте. Имеем:  $I_1 \sim I_2, I_1 > I_3, I_2 > I_3, I_1 \sim_3 I_2 \sim_3 I_3$ . Эти условия можно записать в виде следующих тождеств, имеющих место для любого  $\sigma \in \Sigma$  (воспользуемся соответствующими определениями и утверждениями 1, 2, и 5):

$$I_{12\sigma} = I_{2\sigma}, I_{13\sigma} = I_{3\sigma}, I_{21\sigma} = I_{1\sigma}, I_{23\sigma} = I_{3\sigma}, I_{3\sigma 1} = I_{31}, I_{3\sigma 2} = I_{32}, I_{3\sigma 3} = I_3.$$

(Аналогичные соотношения выполняются для равновесных действий  $x_i^*$ ). Левые части этих тождеств показывают, что любая структура  $I_\sigma$  при  $|\sigma| > 2$  тождественна некоторой структуре  $I_i, |\tau| < |\sigma|$ . Поэтому глубина структуры  $I$  не превосходит двух и, следовательно, она имеет конечную сложность. Правые части показывают, что базис образуют следующие структуры:  $\{I_1, I_2, I_3, I_{31}, I_{32}\}$  (нетрудно убедиться, что они попарно различны). Таким образом, сложность данной структуры информированности равна пяти, а глубина равна двум. Граф рассматриваемой рефлексивной игры приведен на рис. 2.

Действия реальных агентов в ситуации информационного равновесия будут следующими:  $x_1^* = x_2^* = 9/20, x_3^* = 1/5$ . Видно, что, изменив лишь представления агентов о представлениях друг друга, можно повлиять на выбираемые ими действия.

### 3. РЕГУЛЯРНЫЕ СТРУКТУРЫ ИНФОРМИРОВАННОСТИ И РЕФЛЕКСИВНЫЕ ОТОБРАЖЕНИЯ

Будем рассматривать регулярные структуры информированности [5], для задания которых введем вспомогательное понятие *регулярного конечного дерева* (РКД), которое определим рекуррентно. Пусть в игре участвуют  $n$  агентов. Если (в простейшем случае) все агенты одинаково информированы [5], то структура информированности имеет сложность  $n$  и единичную глубину. Бу-



дем представлять эту ситуацию в виде дерева, состоящего из корневой вершины,  $n$  ребер и  $n$  висячих вершин. Далее РКД может “расти” следующим образом: к каждой висячей вершине  $\tau i$ ,  $\tau \in \Sigma$ , присоединяется ровно  $(n - 1)$  ребер, при этом возникает  $(n - 1)$  висячая вершина  $\tau ij$ ,  $j = 1, \dots, i - 1, i + 1, \dots, n$ . Построенное РКД будем интерпретировать так: если имеется висячая вершина  $\tau i$ ,  $\tau \in \Sigma$ , то  $\tau i$ -агент одинаково информирован с  $\tau$ -агентом (если  $\tau$  — пустая последовательность, то  $\tau i$ -агент — реальный, и его субъективные представления совпадают с объективными).

Обозначим множество параметрических (параметр — вектор  $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n) \in \Omega^n$ ) равновесий Нэша

$$E_N(\theta) = \{ \{x_i\}_{i \in N} \in X' \mid \forall i \in N, \forall y_i \in X_i, f_i(\theta_i, x_1, \dots, x_n) \geq f_i(\theta_i, x_1, \dots, x_{i-1}, y_i, x_{i+1}, \dots, x_n) \}, \quad (2)$$

где  $X' = \prod_{i \in N} X_i$ ,

а объединение этих множеств по всевозможным представлениям о значении состояния природы обозначим

$$E_N = \bigcup_{(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n) \in \Omega^n} E_N(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n).$$

Предположим, что на нижнем уровне  $\{\theta_{\tau ij}\}_{j \in N}$  конечной регулярной структуры информированности имеет место субъективное общее знание фантомных агентов. Тогда с точки зрения  $\tau i$ -агента возможными являются равновесия их игры из множества  $E_N(\{\theta_{\tau ij}\}_{j \in N})$ . Введем множество наилучших ответов  $i$ -го агента на выбор оппонентами действий из множества  $X_{-i}$  (индекс “ $-i$ ” обозначает множество  $N \setminus \{i\}$  оппонентов  $i$ -го агента) при множестве  $\Omega$  возможных состояний природы:

$$BR_i(\Omega, X_{-i}) = \bigcup_{x_{-i} \in X_{-i}, \theta \in \Omega} \text{Arg max}_{x_i \in X_i} f_i(\theta, x_i, x_{-i}), \quad i \in N,$$

а также следующие величины и множества:  $E_N = \bigcup_{\theta \in \Omega^n} E_N(\theta)$ ,  $X_i^0 = \text{Proj}_i E_N$ ,  $i \in N$ ,  $X_{-i}^k = \prod_{j \neq i} X_j^k$ ,  $i \in N$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$ , где

$$X_i^k = BR_i(\Omega, X_{-i}^{k-1}), \quad k = 1, 2, \dots, i \in N. \quad (3)$$

Отображение  $BR_i(\cdot, \cdot): \Omega \times X_{-i} \rightarrow X_i$  называется *рефлексивным отображением*  $i$ -го агента,  $i \in N$ .

**Утверждение 7.**  $X_i^k \subseteq X_i^{k+1}$ ,  $k = 0, 1, \dots, i \in N$ , т. е. с ростом ранга рефлексии множества (3) возможных наилучших ответов агентов не сужаются.

Доказательства утверждений 7 и 8 можно найти в работе [5].

Таким образом, информационное равновесие может быть вычислено следующим образом. Если на нижнем уровне конечной регулярной структуры информированности имеет место субъективное общее знание, то исходом игры соответствующих фантомных агентов будет параметрическое равновесие Нэша (2). Обозначим это равновесие  $g$ ,  $g = (g_1, \dots, g_n) \in X'$ . Тогда агенты следующего (более высокого) уровня выберут действия, являющиеся в рамках их информированности наилучшими ответами на обстановку, соответствующую этому равно-

весию. Аналогичным образом поступят агенты следующего уровня и т. д., вплоть до реальных агентов. Поясним описанную конструкцию на примере двух агентов. Если на нижнем уровне РКД имеется равновесие  $g$ , то с точки зрения, например, первого — реального — агента он должен выбрать действие  $x_1 = BR_1(\theta_1, BR_2(\theta_{12}, \dots, BR_i(\theta_{1\tau i}, g_{-i})))$  ( $i = 1$  или  $2$  в зависимости от четности глубины РКД). В общем же случае действия реальных и фантомных агентов будут описываться системой итерированных отображений (3), начальной точкой для которых будет параметрическое равновесие Нэша  $g$ , “сложившееся” на нижнем уровне РКД.

Рассуждения о свойствах рефлексивных отображений оказываются существенными при рассмотрении задачи о *максимальном целесообразном ранге рефлексии* (ранг рефлексии агента на единицу меньше глубины структуры его информированности), в рамках которой для каждого реального агента требуется определить минимальный ранг рефлексии, при котором множество его равновесных действий охватывает все многообразие равновесных действий своих в рефлексивной игре (при различных вариантах структуры информированности). Данная задача является математической формулировкой вопроса о том, насколько сложную структуру информированности требуется сформировать управляющему органу — центру — при осуществлении *информационного управления* [5, 19] — воздействия на структуры информированности управляемых субъектов с целью добиться выбора ими требуемых действий как компонентов информационного равновесия.

Рефлексивное отображение  $i$ -го агента называется *стационарным*, если  $X_i^k = X_i^{k+1}$ ,  $k = 0, 1, \dots$

**Утверждение 8.** Если рефлексивные отображения агентов стационарны, то максимальный целесообразный ранг рефлексии равен двум и множество действий  $i$ -го агента, которые могут быть реализованы как компоненты информационного равновесия, составляет  $X_i^0$ ,  $i \in N$ . При этом множество информационных равновесий составляет  $E = \prod_{i \in N} X_i^0$ .

Таким образом, если рефлексивные отображения стационарны, то при осуществлении информационного управления увеличивать ранг рефлексии, свыше второго, не имеет смысла.

#### 4. СТАБИЛЬНОЕ ИНФОРМАЦИОННОЕ РАВНОВЕСИЕ

Одна из основных особенностей “классического” равновесия Нэша состоит в его самоподдерживающемся характере — если игра повторяется несколько раз, и все игроки, кроме  $i$ -го, выбирают одни и те же равновесные действия, то и  $i$ -му нет резона отклоняться от своего равновесного действия. Это обстоятельство очевидным образом связано с тем, что представления всех игроков о реальности адекватны.

В случае информационного равновесия ситуация, вообще говоря, может быть иной. Действительно, в результате однократного разыгрывания игры может оказаться, что какие-то из игроков (или даже все) наблюдают не тот результат, на который они рассчитывали.

$\theta = 1$	$\theta = 2$
$\begin{pmatrix} (1, 1) & (0, 0) \\ (0, 1) & (2, 0) \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} (0, 1) & (1, 2) \\ (1, 1) & (2, 2) \end{pmatrix}$

Рис. 3. Матрицы выигрышей в примере 2

Это может быть связано как с неверным представлением о состоянии природы, так и с неадекватной информированностью о представлениях оппонентов. В любом случае, самоподдерживающийся характер равновесия нарушается — если игра повторяется во второй раз, действия игроков могут измениться.

Однако в некоторых случаях самоподдерживающийся характер равновесия может иметь место и при различных (и, вообще говоря, неверных) представлениях агентов. Говоря неформально, это происходит тогда, когда каждый агент (как реальный, так и фантомный) наблюдает тот результат игры, которого ожидает. Для формального описания нам понадобится дополнить описание рефлексивной игры.

Дополним определение рефлексивной игры (см. ранее), набором функций  $w_i(\cdot): \Omega \times X' \rightarrow W_i, i \in N$ , каждая из которых отображает вектор  $(\theta, x)$  в элемент  $w_i$  некоторого множества  $W_i$ . Этот элемент  $w_i$  и есть то, что  $i$ -й агент наблюдает в результате разыгрывания игры.

Функцию  $w_i(\cdot)$  будем называть *функцией наблюдения*  $i$ -го агента. Будем считать, что функции наблюдения являются общим знанием среди агентов.

Если  $w_i(\theta, x) = (\theta, x)$ , т. е.  $W_i = \Omega \times X'$ , то  $i$ -й агент наблюдает как состояние природы, так и действия всех агентов. Если, напротив, множество  $W_i$  состоит из одного элемента, то  $i$ -й агент ничего не наблюдает.

Пусть в рефлексивной игре существует информационное равновесие  $x_\tau, \tau \in \Sigma_+$ . Зафиксируем  $i \in N$  и рассмотрим  $i$ -го агента. Он ожидает в результате игры пронаблюдать величину

$$w_i(\theta, x_{i1}, \dots, x_{i, i-1}, x_i, x_{i, i+1}, \dots, x_{in}). \quad (4)$$

На самом же деле он наблюдает величину

$$w_i(\theta, x_1, \dots, x_{i-1}, x_i, x_{i+1}, \dots, x_n). \quad (5)$$

Поэтому требование стабильности для  $i$ -агента означает совпадение величин (4) и (5) (напомним, что эти величины — элементы некоторого множества  $W_i$ ).

Пусть величины (4) и (5) равны, т. е.  $i$ -агент и после разыгрывания игры не сомневается в истинности своих представлений. Однако является ли это достаточным основанием для того, чтобы он и в следующий раз выбрал то же действие  $x_i$ ? Ясно, ответ отрицательный, что и продемонстрируем на следующем примере.

**Пример 2.** Пусть в рефлексивной биматричной игре, где  $\Omega = \{1, 2\}$ , выигрыши заданы биматрицами (агент 1 выбирает строку, агент 2 — столбец) на рис. 3, и при этом второй агент считает общим знанием  $\theta = 2$ , а первый агент знает реальное состояние природы  $\theta = 1$  и адекватно информирован о втором. Иными словами,  $\theta = \theta_1 = 1, \theta_2 = \theta_{21} = 2$ .

Пусть, далее, каждый агент наблюдает свой выигрыш (и это является общим знанием). Для рассматриваемого примера граф рефлексивной игры имеет следующий вид:  $1 \leftarrow 2 \leftrightarrow 21$ .

Ясно, что информационным равновесием является набор  $x_1 = x_2 = x_{21} = 2$ , т. е. первый и второй агенты, а также 21-агент (первый агент в представлении второго) выбирают вторые действия. Однако реальное состояние природы  $\theta = 1$  становится известным второму агенту после розыгрыша игры (и получения им выигрыша 0 вместо ожидаемого 2). Поэтому в следующий раз второй агент выберет действие  $x_2 = 1$ , что побуждает и первого агента изменить свое действие (выбрать  $x_1 = 1$ ).

Таким образом, для стабильности равновесия необходимо, чтобы и  $ij$ -агент,  $i, j \in N$ , наблюдал “нужную” величину. Он ожидает в результате игры пронаблюдать

$$w_j(\theta_{ij}, x_{ij1}, \dots, x_{ij, j-1}, x_{ij}, x_{ij, j+1}, \dots, x_{ijn}). \quad (6)$$

На самом же деле (т. е.  $i$ -субъективно, ведь  $ij$ -агент существует в сознании  $i$ -агента) он наблюдает величину

$$w_j(\theta_i, x_{i1}, \dots, x_{i, j-1}, x_{ij}, x_{i, j+1}, \dots, x_{in}). \quad (7)$$

Поэтому требование стабильности для  $ij$ -агента означает совпадение величин (6) и (7).

В общем случае, т. е. для  $\tau i$ -агента,  $\tau i \in \Sigma_+$ , условие стабильности определим следующим образом.

**О п р е д е л е н и е.** Информационное равновесие  $x_{\tau i}, \tau i \in \Sigma_+$ , будем называть *стабильным* при заданной структуре информированности  $I$ , если для любого  $\tau i \in \Sigma_+$  выполняется

$$\begin{aligned} w_i(\theta_{\tau i}, x_{\tau i1}, \dots, x_{\tau i, i-1}, x_{\tau i}, x_{\tau i, i+1}, \dots, x_{\tau in}) = \\ = w_i(\theta_{\tau}, x_{\tau 1}, \dots, x_{\tau, i-1}, x_{\tau i}, x_{\tau, i+1}, \dots, x_{\tau n}). \end{aligned} \quad (8)$$

Информационное равновесие, не являющееся стабильным, будем называть *нестабильным*. В частности, информационное равновесие в примере 2 — нестабильное.

**Утверждение 9.** Пусть структура информированности  $I$  имеет сложность  $\nu$  и существует информационное равновесие  $x_{\tau i}, \tau i \in \Sigma_+$ . Тогда система соотношений (8) содержит не более чем  $\nu$  попарно различных условий.

Доказательства утверждений 9 и 10 (см. далее) можно найти в работах [18, 19].

## 5. ИСТИННЫЕ И ЛОЖНЫЕ РАВНОВЕСИЯ

Стабильные информационные равновесия будем разделять на два класса — истинные и ложные равновесия. Определение предварим примером.

**Пример 3.** Рассмотрим игру, в которой участвуют три агента с целевыми функциями  $f_i(r_i, x_1, x_2, x_3) = x_i - x_i(x_1 + x_2 + x_3)/r_i$ , где  $x_i \geq 0, i \in N = \{1, 2, 3\}$ . Целевые функции являются общим знанием с точностью до типов агентов — параметров  $r_i > 0$ . Пусть  $r_2 = r_3 = r, r_{21} = r_{23} = r_{31} = r_{32} = c$ , при этом первый агент адекватно информирован о втором и третьем, а второй и третий считают всех трех одинаково информированными. Общим знанием является также следующее: каждый игрок знает свой тип и наблюдает сумму действий оппонентов.

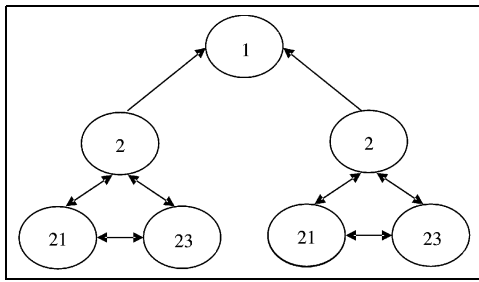


Рис. 4. Граф рефлексивной игры в примере 3

$\theta = 1$	$\theta = 2$
$\begin{pmatrix} (2, 2) & (4, 1) \\ (1, 4) & (3, 3) \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} (2, 2) & (0, 3) \\ (3, 0) & (1, 1) \end{pmatrix}$

Рис. 5. Матрицы выигрышей в примере 4

Граф соответствующей рефлексивной игры приведен на рис. 4.

Нетрудно вычислить единственное информационное равновесие этой игры:

$$x_2 = x_3 = (3r - 2c)/4, \quad (9)$$

$$x_{21} = x_{23} = x_{31} = x_{32} = (2c - r)/4,$$

$$x_1 = (2r_1 - 3r + 2c)/4.$$

Условия стабильности (8) в данном случае выглядят следующим образом:

$$x_{21} + x_{23} = x_1 + x_3, \quad x_{31} + x_{32} = x_1 + x_2. \quad (10)$$

В них входят только условия для 2- и 3-агентов, поскольку для 1-, 21-, 23-, 31-, 32-агентов они тривиальны.

Подставляя выражение (9) в условия (10), получаем, что необходимым и достаточным условием стабильности является выполнение равенства

$$2c = r_1 + r. \quad (11)$$

Пусть условие (11) выполнено. Тогда равновесные действия реальных агентов таковы:

$$x_2 = x_3 = (3r - r_1)/4, \quad x_1 = (3r_1 - 2r)/4. \quad (12)$$

Предположим теперь, что типы агентов стали общим знанием. Нетрудно убедиться, что в случае общего знания единственным равновесием будут действия (12).

Таким образом, при выполнении условия (11) имеет место несколько парадоксальная ситуация. Представления второго и третьего агентов не соответствуют действительности, однако их равновесные действия (12) в точности такие, как были бы в случае общего знания. Назовем такое стабильное информационное равновесие истинным.

**Определение.** Пусть набор действий  $x_{ti}$ ,  $ti \in \Sigma_+$ , является стабильным информационным равновесием. Будем называть его *истинным* равновесием, если набор

$(x_1, \dots, x_n)$  является равновесием в условиях общего знания о состоянии природы  $\theta$  (или о наборе типов  $(r_1, \dots, r_n)$ ).

Из приведенного определения, в частности, следует, что в условиях общего знания любое информационное равновесие является истинным. Рассмотрим еще один случай, когда этот факт имеет место.

**Утверждение 10.** Пусть целевые функции агентов имеют следующий вид:

$$f_i(r_i, x_1, \dots, x_n) = \varphi_i(r_i, x_i, w_i(x_{-i})),$$

где  $w_i$  — функция наблюдения (содержательно это означает следующее: выигрыш каждого агента зависит от его типа, его действия и функции наблюдения, зависящей от действий остальных агентов, но не от их типов). Тогда любое стабильное равновесие является истинным.

**Определение.** Стабильное информационное равновесие, не являющееся истинным, назовем *ложным*.

Таким образом, ложное равновесие — это такое стабильное информационное равновесие, которое не является равновесием в условиях общего знания.

**Пример 4.** Пусть в рефлексивной биматричной игре, где  $\Omega = \{1, 2\}$ , выигрыши заданы биматрицами (агент 1 выбирает строку, агент 2 — столбец) на рис. 5.

Пусть, далее, в реальности  $\theta = 2$ , однако оба агента считают общим знанием  $\theta = 1$ . Граф соответствующей рефлексивной игры (точнее — игры в нормальной форме, так как имеет место общее знание среди реальных агентов) имеет вид  $1 \leftrightarrow 2$ . Каждый агент наблюдает пару  $(x_1, x_2)$ , которая и есть функция наблюдения.

Информационным равновесием является выбор каждым агентом действия 1. Если бы общим знанием было реальное состояние природы, то равновесным был бы выбор каждым агентом действия 2. Таким образом, выигрыши агентов в информационном равновесии оказываются большими, чем если бы общим знанием было реальное состояние природы.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, рефлексивные игры позволяют описывать интерактивное взаимодействие агентов, принимающих решения на основе иерархии своих представлений о существенных параметрах, представлений других агентов и т. д. Ключевыми понятиями являются следующие (корректные определения см. ранее):

- фантомный агент — агент, существующий в представлении реального или другого фантомного агента и наделенный в рамках этих представлений определенной информированностью;
- информационная структура — бесконечное дерево, отражающее взаимную информированность агентов (реальных и фантомных);
- информационное равновесие — равновесие рефлексивной игры (т. е. обобщение равновесия Нэша на случай некооперативной игры реальных и фантомных агентов при заданной структуре информированности);
- стабильное информационное равновесие, в котором каждый агент (как реальный, так и фантомный) наблюдает тот результат игры, которого ожидает;

- ложное равновесие — такое стабильное информационное равновесие, которое не является равновесием в условиях общего знания;
- граф рефлексивной игры — удобный инструмент исследования свойств последней и выразительное средство описания информационной структуры и взаимодействия агентов.

В рамках описанных моделей появляется возможность исследования зависимости информационного равновесия и выигрышей агентов от их информированности (в том числе — рангов рефлексии) и, в частности, определения максимального целесообразного в той или иной ситуации ранга рефлексии.

Кроме того, имея зависимость информационного равновесия от структуры информированности, можно ставить и решать задачи рефлексивного (информационного) управления — определения той структуры информированности, при которой управляемые субъекты оказываются в требуемом равновесии.

Перечисленное относится к уже полученным результатам, которые отнюдь не следует считать исчерпывающими. В качестве перспективных направлений дальнейших исследований следует, в первую очередь, выделить изучение динамических (в том числе — в развернутой форме) и иерархических рефлексивных игр, а также рассмотрение структур информированности, в которых информация описывается или множеством возможных значений неопределенного параметра, или распределением вероятностей, или функцией принадлежности и существуют ограничения на непротиворечивые комбинации информированности агентов.

В заключение отметим, что имеющиеся на сегодня результаты теоретического исследования моделей рефлексивного принятия решений уже находят широкое применение для разработки прикладных моделей [5, 6, 19].

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Mas-Colell A., Whinston M.D., Green J.R.* Microeconomic theory. — N.-Y.: Oxford Univ. Press, 1995.
2. *Губко М.В., Новиков Д.А.* Теория игр в управлении организационными системами. — М.: СИНТЕГ, 2002.
3. *Myerson R.B.* Game theory: analysis of conflict. — London: Harvard Univ. Press, 1991.
4. *Лефевр В.А.* Конфликтующие структуры. — М.: Радио и связь, 1967.
5. *Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г.* Рефлексивные игры. — М.: СИНТЕГ, 2003.
6. *Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г.* Активный прогноз. — М.: ИПУ РАН, 2002.
7. *Aumann R.J., Heifetz A.* Incomplete information: Handbook of Game Theory. Vol. III, ch. 43. — Amsterdam: Elsevier (forthcoming).
8. *Гермейер Ю.Б.* Игры с непротивоположными интересами. — М.: Наука, 1976.
9. *Кукушкин Н.С., Морозов В.В.* Теория неантагонистических игр. — М.: МГУ, 1984.
10. *Howard N.* Theory of meta-games // General systems. — 1966. — № 11. — P. 187—200.
11. *Aumann R.J., Mashler M.* The bargaining set for cooperative games. Eds. M. Dresher, L.S. Shapley, and A.W. Tucker. Advances in Game Theory. — Princeton: Princeton University Press, 1964. — P. 443—447.
12. *Mertens J.-F., Zamir S.* Formulation of Bayesian analysis for games with incomplete information // Int. J. Game Theory. — 1985. — № 14. — P. 1—29.
13. *Harsanyi J.* Games with incomplete information played by “Bayesian” players // Management Sci. — Part I: 1967. — Vol. 14, № 3. — P. 159—182. — Part II: 1968. — Vol. 14, № 5. — P. 320—334. — Part III: 1968. — Vol. 14, — № 7. — P. 486—502.
14. *Sakovics J.* Games of incomplete information without common knowledge priors // Theory and Decision. — 2001. — № 50. — P. 347—366.
15. *Chkhartishvili A.G.* Bayes-Nash equilibrium: infinite-depth point belief structures // Automation and Remote Control. — 2003. — № 12. — P. 105—111.
16. *Чхартишвили А.Г.* Информационное равновесие // Управление большими системами: Сб. тр. / ИПУ РАН. — 2003. — Вып. 3. — С. 94—109.
17. *Novikov D.A., Chkhartishvili A.G.* Informational equilibrium: point belief structures // Automation and Remote Control. — 2003. — № 10. — P. 111—122.
18. *Novikov D.A., Chkhartishvili A.G.* Informational equilibrium stability in reflexive games // Automation and Remote Control. — 2004 (forthcoming).
19. *Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г.* Прикладные модели информационного управления. — М.: ИПУ РАН, 2004.

☎ (095) 334-90-51

E-mail: novikov@tushino.com



## ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

Журнал "ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ" входит в Перечень периодических научных изданий, рекомендуемых ВАК для публикации научных работ, отражающих основное научное содержание докторских диссертаций.



# МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ

А. В. Толстых

*Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова, г. Москва*

Рассмотрены вопросы построения моделей экономических механизмов обеспечения безопасности при техногенных и природных катастрофах. На примере линейного механизма платы за снижение риска описаны методы анализа механизмов управления безопасностью с учетом активности лиц, принимающих решения.

## ВВЕДЕНИЕ

В России наблюдается устойчивая тенденция роста числа и тяжести последствий чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и техногенного характера, масштабы которых в ряде случаев таковы, что приводят к необратимым изменениям окружающей природной среды, сказываются на экономике и безопасности государства. Суммарный экономический ущерб становится сопоставимым со среднегодовым валовым внутренним продуктом страны. Средний индивидуальный риск населения на два порядка превышает уровни, допустимые в развитых странах мира.

Учитывая возрастающие масштабы прямого ущерба от ЧС, затрат на их ликвидацию и реабилитацию пострадавшего населения и территорий, можно сделать вывод, что в ближайшей перспективе по ряду показателей экономика страны будет не в состоянии восполнять потери от ЧС. В подобной ситуации устойчивое развитие страны становится нереальным без принятия эффективных предупредительных мер, уменьшающих опасность, масштабы и последствия ЧС. Поскольку многие катастрофы и стихийные бедствия предотвратить нельзя, то решение задач уменьшения ущерба от них становится важным элементом государственной политики страны.

Фактически требуется реализация оптимальной стратегии целенаправленного воздействия на социальную систему в целом и на ее отдельные составляющие. При этом наука дает новые знания о природе опасностей, указывает пути и средства необходимого технического и технологического развития. Роль экономики и права состоит в переводе жизнедеятельности на язык установленных государством норм и требований, методов и форм управления, в совокупности представляющих собой государственную политику, осуществляемую органами государственной власти по регулированию безопасности.

Достижение целей безопасности сопряжено со значительными материальными затратами и в условиях ограниченности ресурсов возможно лишь путем научно обоснованной разработки и осуществления комплекса

взаимосвязанных правовых, экономических и политических мер.

Переход от концепции “абсолютной” безопасности к концепции “приемлемого” риска определил появление принципиально нового подхода к управлению развитием общества, состоящего в том, что удовлетворение материальных и духовных потребностей населения (качества жизни) должно осуществляться при соблюдении обязательных требований по обеспечению безопасности человека и окружающей его среды.

В решении проблем безопасности исключительно важна экономическая составляющая. И дело даже не в том, чтобы правильно посчитать или спрогнозировать ущерб от аварий и катастроф, хотя это, конечно, необходимо уметь делать. Гораздо важнее построить и ввести в действие эффективные экономические механизмы стимулирования практической деятельности по предупреждению возникновения чрезвычайных ситуаций и привлечения требующихся для этого немалых инвестиций.

## 1. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ УПРАВЛЕНИЯ УРОВНЕМ БЕЗОПАСНОСТИ

Анализ отечественного и зарубежного опыта в области разработки и применения экономических механизмов для предупреждения и ликвидации ЧС показал, что существует достаточно большое число экономических механизмов, направленных на снижение риска возникновения ЧС. Все эти механизмы поддаются естественному разделению на однородные группы [1]. Внутри каждой такой группы механизмы отличаются друг от друга лишь некоторыми модификациями, поэтому приводимое здесь описание будет отражать лишь принципиальные особенности экономических механизмов, входящих в каждую группу. Примем, что структура системы, в которой действует экономический механизм, двухуровневая. Верхний уровень занимает орган управления уровнем безопасности (природоохранный орган, орган местной или центральной власти). Кроме того, на верхнем уровне могут находиться одна или несколько страховых организаций. Нижний уровень этой системы занимают

объекты, деятельность которых несет в себе потенциальную угрозу возникновения ЧС. Выделим основные (базовые) экономические механизмы управления уровнем безопасности (обеспечения безопасности).

- *Механизмы экономической ответственности.* Эта группа механизмов включает в себя систему стандартов (норм, нормативов, квот), отклонение от которых ведет к определенным экономическим санкциям (от штрафов до остановки производства, запрещения строительства и др.). Соответствующие стандарты касаются, в первую очередь, применяемых технологий производства (или строительства), организационно-технических мер по обеспечению безопасности производства, ограничений на предельно допустимые концентрации, выбросы или сбросы. К этой же группе механизмов отнесем механизмы экспертизы (проектов, предприятий), в которых оценка уровня безопасности (риска) производится экспертной комиссией, и экономическая ответственность определяется в зависимости от результатов экспертизы.
- Важный класс составляют механизмы возмещения ущерба, в которых экономическая ответственность прямо связана с размером ущерба от возникновения ЧС.
- *Механизмы перераспределения риска.* В основном, это механизмы страхования (государственное, независимое и взаимное страхование). Главная проблема при разработке механизмов страхования — определение страховых взносов.
- *Механизмы формирования и использования бюджетных и внебюджетных фондов.* Здесь, на наш взгляд, наиболее слабое звено связано с распределением фондов. Эффективные механизмы распределения фондов должны опираться на систему комплексного оценивания уровня безопасности в регионе.
- *Механизмы стимулирования повышения уровня безопасности (снижения ожидаемого ущерба).* Сюда относятся механизмы льготного налогообложения, а также льготного кредитования мероприятий по повышению уровня безопасности (снижения риска).
- *Механизмы резервирования на случай ЧС.* Сюда относятся механизмы образования резервов трудовых ресурсов (пожарные, спасатели и др.), материальных ресурсов (запасы продовольствия, сырья, медикаментов, транспорт и др.), мощностей для быстрой организации производства продукции, необходимой для ликвидации или уменьшения потерь от ЧС.

В отличие от первых четырех групп механизмов, направленных в основном на повышение уровня безопасности или снижение риска, механизмы резервирования направлены на создание условий для скорейшей ликвидации чрезвычайной ситуации и уменьшения потерь от нее.

Инерционность действия экономических механизмов, связанная с периодом адаптации к ним, предопределяет важность предварительной оценки их эффективности. В основе такой предварительной оценки лежит прогноз поведения активных элементов системы в условиях заданной совокупности экономических механизмов [2]. Достоверность и точность такого прогноза во многом определяется точностью описания системы motivating элементов. Имея в виду хозяйственно самостоятельные организации в условиях рыночной экономики, мы вправе принять в качестве доминантной мо-

тивации такую экономическую категорию как прибыль организации за вычетом налогов, штрафов, платы за загрязнение, выбросы, сбросы и другие платежи с добавлением субсидий и прочих средств, получаемых из централизованных, общественных и других фондов. Эту прибыль назовем остаточной и примем стремление к максимизации остаточной прибыли в качестве главной цели хозяйственной организации.

Рассмотрим этапы функционирования системы управления уровнем безопасности.

*I этап.* Сбор информации. На этом этапе орган управления осуществляет сбор и обработку информации, необходимой для определения параметров системы экономических механизмов. Эта информация связана, в первую очередь, с оценкой уровня безопасности в регионе и затратами хозяйственных организаций на уменьшение их отрицательного воздействия на этот уровень. Важно отметить, что источник информации о затратах на уменьшение вредного воздействия или на уменьшение опасности возникновения ЧС есть само предприятие, т. е. источник потенциальной опасности. В силу наличия собственных экономических интересов предприятие может исказить сообщаемые данные, что приведет к ошибкам в выборе типа и параметров экономических механизмов.

*II этап.* Выбор (изменение) экономических механизмов. На этом этапе производится изменение системы экономических механизмов, что может включать в себя как существенное изменение типа применяемых механизмов (например, замена механизма платы за выбросы механизмом ограничений на выбросы), так и изменение параметров механизма без изменения его типа (изменение принципов распределения квот, платежей и т. д.).

*III этап.* Функционирование региона в условиях действия системы экономических механизмов. Исходя из своих экономических интересов на этапе функционирования предприятия выбирают ту или иную стратегию действий. При обоснованном выборе системы экономических механизмов действия предприятия будут направлены на повышение уровня безопасности производства, уменьшение его вредного воздействия на уровень безопасности региона и, как следствие, будет достигнута поставленная цель — обеспечить требуемый уровень безопасности региона, и при этом условия — высокая экономическая эффективность.

Если система экономических механизмов выбрана неудачно, то действия предприятий приведут либо к нарушению установленных норм и квот, превышению отрицательных воздействий и уменьшению уровня безопасности, либо к обеспечению требуемого уровня, но слишком дорогой ценой — путем существенного снижения уровня жизни.

Как видно из описания этапов функционирования активное поведение предприятий проявляется на первом этапе (сообщение информации) и на третьем этапе (выбор действий).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ

Для построения модели экономического механизма и анализа функционирования объекта при действии этих механизмов будем рассматривать регион, в котором функционируют  $n$  хозяйственных объектов (например, предприятий). Хозяйственная деятельность предприятий





оказывает отрицательное воздействие на уровень безопасности региона.

Обозначим через  $y_i$  уровень безопасности  $i$ -го предприятия или вероятность его безаварийного функционирования, через  $x_i$  — уровень риска — вероятность возникновения ЧС на предприятии. Очевидно,  $x_i + y_i = 1$ .

Так как в регионе могут находиться различные предприятия и от аварий на этих предприятиях могут быть различные потери, то важно учитывать не просто вероятность возникновения ЧС, а ожидаемый ущерб от этих ЧС.

Обозначим через  $U_i$  возможные потери при возникновении ЧС на  $i$ -м предприятии, тогда ожидаемый ущерб можем определить как

$$M_i = U_i x_i = U_i(1 - y_i).$$

Естественно предположить, что ожидаемый ущерб  $Y$  в регионе равен сумме ожидаемых ущербов предприятий

$$Y = \sum_{i=1}^n U_i(1 - y_i).$$

Будем считать, что обеспечение уровня безопасности  $y_i$  требует от предприятия определенных затрат  $z_i = \varphi_i(y_i)$ , где  $\varphi_i$  — возрастающая функция  $y_i$ .

Эти затраты включают в себя две составляющие. Первая связана с переходом на новый уровень безопасности (смена технологии, закупка более совершенных систем контроля, обучение персонала и др.), а вторая — с поддержанием этого уровня в течение рассматриваемого периода времени (повышенные издержки при новой более безопасной технологии, затраты на обслуживание систем контроля и др.). Очевидно, что затраты на снижение риска ухудшают финансовое положение предприятия.

В условиях крайнего дефицита средств и тяжелого экономического положения многих российских предприятий маловероятно, что угроза чрезвычайной ситуации заставит предприятие тратить деньги на снижение риска. Это подтверждается и существующей практикой.

Поэтому необходимы механизмы прямого воздействия уровня безопасности (риска) на экономику предприятия таким образом, чтобы снижение риска обеспечивало предприятию экономический эффект в рассматриваемом периоде так же, как и мероприятия, связанные с повышением эффективности производства. К таким механизмам и относятся экономические механизмы обеспечения безопасности.

В качестве примера рассмотрим линейный механизм платы за снижение риска  $S = \lambda x = \lambda(1 - y)$ . В этом случае при проведении мероприятий, обеспечивающих уровень безопасности  $y$ , предприятие получает эффект (материальную прибыль) в размере

$$f(y) = \lambda(y - y_0) - \varphi(y - y_0) = \lambda(x_0 - x) - \varphi(x_0 - x),$$

где  $y_0(x_0)$  — существующий уровень безопасности (риска).

Зададимся вопросом, какой уровень безопасности (риска) экономически выгоден для предприятия?

Предположим сначала, что в силу ограниченности собственных средств предприятие берет кредит по процентной ставке  $\rho$ . В этом случае оптимальный уровень

безопасности определяется из условия максимума величины

$$\lambda(y - y_0) - (1 + \rho) \times \varphi(y - y_0). \quad (1)$$

Если мероприятия по повышению уровня безопасности проводятся на собственные средства, то оптимальный уровень безопасности также определяется из условия максимума выражения (1), где  $\rho$  — маржинальная рентабельность мероприятий по повышению экономической эффективности производства.

Этот вывод достаточно прозрачен. Предприятие будет повышать уровень безопасности до тех пор, пока это будет давать экономический эффект (в виде снижения платы за риск) не меньший, чем мероприятия по повышению эффективности производства.

В дальнейшем для упрощения записи примем начальный уровень безопасности  $y_0 = 0$ , а функцию  $(1 + \rho) \times \varphi(y)$  будем обозначать как  $\varphi(y)$ .

Примем, что функции затрат предприятий известны органу управления (Центру) с точностью до некоторого параметра  $r_i$ , т. е.  $\varphi_i(y_i) = \varphi_i(y_i, r_i)$ . Относительно  $r_i$  Центру известен только отрезок его возможных значений  $r_i \in [d_i, D_i]$ ,  $i = 1, \dots, n$ . На этапе выбора параметров механизма платы за риск каждое предприятие сообщает Центру оценку  $s_i$  параметра  $r_i$ . Получив эту информацию, Центр решает задачу назначения требуемого уровня безопасности  $y_i$  для каждого предприятия так, чтобы

$$\sum_{i=1}^n U_i(1 - y_i) = Y \quad (2)$$

при условии, что при выбранном нормативе  $\lambda$  каждому предприятию устанавливается планируемый уровень безопасности  $y_i$ , минимизирующий сумму платы за риск и затрат на достижение уровня  $y_i$

$$\lambda(1 - y_i) + \varphi_i(y, s_i). \quad (3)$$

Далее будем предполагать, что функция  $\varphi_i$  является выпуклой, возрастающей, непрерывно дифференцируемой функцией  $y_i$ , причем  $\left. \frac{\partial \varphi_i(y_i, r_i)}{\partial y_i} \right|_{y_i=0}$  для всех  $i = 1, \dots, n$ ,

кроме того, будем считать, что возможные потери от возникновения ЧС на предприятиях региона, примерно одинаковы, т. е.  $U_1 = U_2 = \dots = U_n = U_0$ , тогда условие (2) можно переписать в виде

$$\sum_{i=1}^n y_i \geq \tilde{Y}, \quad \text{где } \tilde{Y} = n - Y/U_0.$$

В этом случае условия минимума (3) можно записать как

$$\frac{\partial \varphi_i(y_i, r_i)}{\partial y_i} = \lambda, \quad i = 1, \dots, n. \quad (4)$$

Разрешая эти уравнения относительно  $y_i$ , получим

$$y_i = \xi_i(\lambda, s_i), \quad i = 1, \dots, n.$$

А из уравнения  $\sum_{i=1}^n \xi_i(\lambda, s_i) = \tilde{Y}$  определяем норматив

$\lambda$ , обеспечивающий не превышение допустимого ущерба в регионе  $Y$ .

Заметим, что норматив  $\lambda$  определяется на основе информации, получаемой от всех предприятий. В этом случае достаточно обоснованной представляется следующая гипотеза (слабого влияния): при принятии решения о том, какую оценку сообщать, предприятия не учитывают влияния этой оценки на норматив  $\lambda$ .

В этом случае описанный механизм обладает двумя замечательными свойствами:

- каждое предприятие заинтересовано в предоставлении Центру достоверной информации о функции затрат;
- установленные плановые уровни безопасности  $\{y_i\}$  минимизируют суммарные затраты предприятий на поддержание допустимого уровня ожидаемого ущерба  $Y$ .

Докажем эти два свойства. При гипотезе слабого влияния предприятия сообщают оценку  $s_i$ , которая обеспечит им получение планового уровня  $y_i$ , минимизирующего их целевую функцию  $\lambda(1 - y_i) + \varphi_i(y_i, r_i)$ .

Условие минимума этой функции имеет вид

$$\frac{\partial \varphi_i(y_i, r_i)}{\partial y_i} = \lambda.$$

Сравнивая его с условием (4), мы видим, что, сообщая  $s_i = r_i$ , предприятие обеспечивает минимум целевой функции при любом нормативе  $\lambda_i$ . Второе свойство следует из того, что при  $s_i = r_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , условие (4) переходит в условие минимума суммы затрат предприятий на достижение требуемого уровня региональной безопасности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К настоящему времени стало очевидно, что проблема безопасности имеет не только технические, но и социальные аспекты. Разрушить окружающую среду проще, а главное, намного дешевле, чем ее восстановить [3]. Поэтому поддержание стабильности является основной задачей управления безопасностью. Моделирование и исследование экономических механизмов обеспечения безопасности позволяет сократить затраты и время на разработку эффективных предупредительных мер, уменьшающих вероятность возникновения ЧС.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бурков В. Н., Щепкин А. В. Моделирование экономических механизмов обеспечения безопасности // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. — 2000. — № 6. — С. 55–67.
2. Бурков В. Н., Грацианский Е. В., Дзюбко С. И., Щепкин А. В. Модели и механизмы управления безопасностью. — М.: СИНТЕГ-ГЕО, 2001. — С. 157.
3. Осипов В. И. Концептуальные основы экологической политики / Сб. избранных статей и докл. 2-й Междунар. конф. "Безопасность и экология горных территорий". — Владикавказ, 1995.

☎ (095) 336-69-63

E-mail: rost1@orc.ru



# V Международная конференция "ИДЕНТИФИКАЦИЯ СИСТЕМ И ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ"

Москва 30 января — 2 февраля 2006 г.

Заседания конференции будут проходить в Институте проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, по адресу: Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 65.

Председатель конференции — **И. В. Прангишвили**.

Председатель Международного программного комитета — **В. А. Лотоцкий**.

Председатель Национального Организационного комитета — **И. В. Прангишвили**.

Тематика конференции

- Общие проблемы системных методологий
- Математические проблемы теории управления
- Системы управления с идентификатором
- Параметрическая идентификация
- Непараметрическая идентификация
- Структурная идентификация и разведочный анализ данных
- Идентификация и исследование моделей процессов выбора и принятия решений
- Идентификация организационных систем
- Методы и процедуры получения и анализа экспертных оценок

- Нейронные сети и проблемы идентификации
- Теория нечетких множеств и проблемы идентификации
- Идентификация систем для целей диагностики
- Моделирование систем
- Имитационное моделирование
- Методическое и программное обеспечение идентификации и моделирования
- Верификация и проблемы качества программного обеспечения сложных систем
- Глобальные сетевые ресурсы поддержки процессов идентификации, управления и моделирования
- Методики обучения методологии и технологии идентификации
- Научно-биографические исследования
- Когнитивные аспекты идентификации

Интернет-страница: <http://www.sicpro.org>

Оргкомитет: e-mail: [sicpro@ipu.ru](mailto:sicpro@ipu.ru)

тел./ факс +7 (095) 334-89-90



# НЕЧЕТКИЕ СИСТЕМЫ ВОЛЬТЕРРА

С. Л. Блюмин, А. М. Шмырин

*Липецкий государственный технический университет*

Предложен подход к учету нечеткости окрестностей по состоянию дискретно-временных систем и рассмотрено его согласование с исследованиями дискретных систем Вольтерра и нечетких систем.

## ВВЕДЕНИЕ

Понятие нечеткой системы может быть введено уже в контексте общей теории систем [1] как нечеткое соответствие между нечеткими входным и выходным объектами, причем функционализация такой системы приводит к нечетким внутреннему объекту и реакции. В контексте аргументно-алфавитных систем [2], детализирующих общие системы, элементами объектов являются сигналы — входы, выходы и состояния, зависящие от некоторого аргумента и принимающие значения, как и параметры системы, в некоторых алфавитах, нечеткими могут быть как множество значений аргумента, так и алфавиты. Трактовка последних как нечетких множеств более популярна, так как связана с естественной нечеткостью измерений значений сигналов в системе и ее параметров (см., например, работы [3, 4]).

Представляет интерес и вопрос об учете нечеткостей, возникающих в множестве значений аргумента системы. Постановка этого вопроса естественна в классе окрестностных систем, для которых множество значений аргумента наделено некоторой окрестностной структурой. В случае дискретного аргумента, наиболее важным для большинства современных приложений, эта структура, вообще говоря, отличается от топологической. Разнообразные примеры таких структур и соответствующих систем рассматриваются в теории дискретно-аргументных систем [5–7]. Класс дискретных окрестностных систем и моделей формализован в работах [8, 9].

Во многих прикладных задачах окрестности, как подмножества множества значений аргумента, оказываются нечеткими. Уже в случае простейших дискретно-временных и близких к ним систем это приводит, вообще говоря, к необходимости [10] учета зависимости текущего состояния не стандартно от одного или фиксированного числа непосредственно предшествующих состояний, а от всей предыстории, т. е. от состояний из временного промежутка от начального до текущего мо-

мента времени, иначе говоря — к системам с нефиксированным последствием, представителями которых являются дискретные системы Вольтерра [11–14].

Нечеткие множества и системы представляют собой широкую область интенсивных исследований в рамках проблематики искусственного интеллекта, в частности, принятия решений в условиях неопределенности. Большинство из этих исследований находят отражение в публикациях журнала именно с таким названием — “Fuzzy Sets and Systems” (см., например, работы [3, 4] и наиболее “свежие” на данный момент работы [15, 16]), а также в большом числе других изданий близкой тематики, в том числе отечественных (см., например, журналы “Автоматика и телемеханика”, “Теория и системы управления” и др., библиографию в работах [17, 18]).

Цель данной работы — предложить подход к учету нечеткости окрестностей по состоянию дискретно-временных систем и согласовать этот подход как с исследованиями дискретных систем Вольтерра, так и с исследованиями нечетких систем, выполняющимися в связи с решением задач искусственного интеллекта.

## 1. ДИСКРЕТНЫЕ СИСТЕМЫ ВОЛЬТЕРРА

Приведем краткие сведения об этом классе систем, используемые в дальнейшем изложении, следуя работе [11]. Дискретная система Вольтерра описывается уравнением

$$x[t] = f(t, x[t-1], \dots, x[0]), \quad (1)$$

где  $t \in N = \{0, 1, \dots\}$  — дискретное время,  $x[t] \in R^n$  — вектор состояния системы,  $f: N \times \Xi \rightarrow R^n$  — некоторая функция,  $\Xi$  — пространство последовательностей  $\xi$ , элементами которых являются векторы из  $R^n$ . При этом для любого  $t \in N$  значение функции  $f(t; \xi)$  определяется только компонентами  $x[0], \dots, x[t-1]$  последовательности  $\xi$  и не зависит от  $x[\tau]$ ,  $\tau < 0$  и  $\tau > t-1$ . Поэтому эволюция системы (1) полностью определяется заданием

одного начального состояния  $x[0]$  или набора начальных состояний  $(x[0], x[1], \dots, x[r])$ . Часто предполагается выполненным условие  $f(t; 0, \dots, 0) \equiv 0$ . Иногда, чтобы подчеркнуть зависимость решения  $x[t]$  уравнения (1) от начальных состояний, оно обозначается  $x[t; (x[0], \dots, x[r])]$ .

В описании дискретной системы Вольтерра использована максимальная для данной ситуации окрестность  $T = MNX[t] = \{t-1, \dots, 0\}$  текущего состояния  $x[t]$ , и уравнение (1) можно записать в виде

$$x[t] = f(t; \{x[\tau], \tau \in T\}). \quad (2)$$

При стандартной окрестности  $SNX[t] = \{t-1\}$  получаем стандартную одношаговую дискретно-временную систему

$$x[t] = f(t; x[t-1]), \quad (3)$$

а при фиксированной (одно и то же  $k$  для всех  $t$ ) окрестности  $KNX[t] = \{t-1, \dots, t-k\}$  — стандартную дискретно-временную систему с  $k$ -шаговым запаздыванием

$$x[t] = f(t; \{t-1, \dots, x[t-k]\}). \quad (4)$$

В работах [11, 12] развит подход к исследованию устойчивости дискретных систем Вольтерра, предусматривающий, в отличие от систем с конечным фиксированным последствием, применение не функций Ляпунова, зависящих от конечного числа аргументов, а функционалов Ляпунова, зависящих от всей траектории процесса от начального до текущего моментов времени. Построена формальная процедура, приводящая к явной форме таких функционалов, а, следовательно, и условий устойчивости для различных подклассов дискретных систем Вольтерра. Приведем следующий простейший пример из работы [12]. Пусть

$$x[t] = \sum_{\tau=0}^{t-1} a[t; \tau]x[\tau] = \sum_{\tau \in T} a[t; \tau]x[\tau] \quad (5)$$

— скалярная линейная нестационарная дискретная система Вольтерра. Тогда условие ее устойчивости можно записать в виде  $\alpha_0 \leq 1$ , а условие асимптотической устойчивости — в виде  $\alpha_0 < 1$ , где

$$\alpha_0 = \sup_{t \geq 0} \sum_{\tau=0}^{\infty} |a[t; \tau]|.$$

Частным случаем системы (4) является простейшая линейная стационарная система

$$x[t] = ax[t-1], \quad (6)$$

для которой  $\alpha_0 = a$ .

В работе [14] показано, что дискретные системы Вольтерра допускают трактовку как динамические благодаря выполнению для них фундаментального в математической теории систем [1] полугруппового свойства или свойства композиции переходов состояний, которое в простейшем случае системы (6) является следствием соотношения  $a^{t+s} = a^t a^s$ , а в общем случае системы (1) обосновывается следующим образом. Пусть  $r < s < t$  — некоторые моменты времени; пусть задан набор  $(x[0], \dots,$

$x[r]$ ); он определяет решение дискретной системы Вольтерра на интервале  $[0, \infty)$ :

$$\varphi_{[0, \infty)}(x[0], \dots, x[r]) = (x[0], \dots, x[r]),$$

$$x[r+1] = x[r+1; (x[0], \dots, x[r])] = f(r+1; x[r], \dots, x[0]),$$

$$x[r+2] = x[r+2; (x[0], \dots, x[r])] = f(r+2; f(r+1; x[r], \dots, x[0]), x[r], \dots, x[0]), \dots,$$

$x[s] = x[s; (x[0], \dots, x[r])], \dots, x[t] = x[t; (x[0], \dots, x[r])], \dots$ , сужение которого на временные отрезки  $[0, s]$ ,  $[0, t]$  определяет отображения  $\varphi_{sr} = \varphi_{sr}(x[0], \dots, x[r])$ ,  $\varphi_{tr} = \varphi_{tr}(x[0], \dots, x[r])$ ; аналогично определяется отображение  $\varphi_{ts} = \varphi_{ts}(x[0], \dots, x[s])$ . Непосредственно проверяется, что для динамической системы с переходной функцией, заданной этим семейством отображений, выполняется свойство композиции переходов состояний в виде  $\varphi_{ts} = \varphi_{ts} \varphi_{sr}$ .

Внимание полугрупповому свойству уделено в связи с тем, что оно служит “проверочным” на право системе считаться динамической; это в полной мере относится к рассматриваемым далее нечетким системам.

## 2. НЕЧЕТКИЕ ДИСКРЕТНЫЕ СИСТЕМЫ ВОЛЬТЕРРА

Реализацию предлагаемого подхода к учету нечеткости окрестностей по состоянию начнем со следующего замечания. Используемая в системах (3) и (6) стандартная окрестность  $SNX[t]$ , как четкое подмножество максимальной окрестности  $T = MNX[t]$ , полностью описывается своей характеристической функцией  $\chi_{SNX[t]}[\tau] = 1$  при  $\tau = t-1$  и  $\chi_{SNX[t]}[\tau] = 0$  при  $\tau = t-2, \dots, 0$ , которая, благодаря принимаемому ею лишь двум значениям 0 и 1, может считаться неявно присутствующей в этих уравнениях; подобным же образом характеристическая функция  $\chi_{MNX[t]}[\tau] \equiv 1$ ,  $\tau = t-1, \dots, 0$ , неявно присутствует в уравнениях (1), (2) и (5), а характеристическая функция  $\chi_{KNX[t]}[\tau] = 1$  при  $\tau = t-1, \dots, t-k$  и  $\chi_{KNX[t]}[\tau] = 0$  при  $\tau = t-k-1, \dots, 0$  — в уравнении (4).

При переходе к нечеткому окрестностному аналогу системы (6) представляется естественным вместо неявно входящих в уравнение системы характеристических функций четких окрестностей явно ввести в это уравнение функции принадлежности нечетких окрестностей, значения которых принадлежат не множеству  $\{0, 1\}$ , а промежутку  $[0, 1]$ . При этом следует учитывать, что сама максимальная окрестность текущего состояния  $x[t]$  может быть нечеткой, обозначаемой  $FMNX[t]$ , с функцией принадлежности  $\mu_{FMNX[t]}[\tau] \in [0, 1]$ ,  $\tau \in MNX[t]$ ; нечеткая стандартная окрестность  $FSNX[t]$ , как нечеткое подмножество максимальной  $FMNX[t]$ , описывается функцией принадлежности  $\mu_{FSNX[t]}[\tau] \in \mu_{FMNX[t]}[\tau] \in [0, 1]$ , причем в общем случае  $\mu_{FSNX[t]}[\tau] \leq \mu_{FMNX[t]}[\tau]$  для всех  $\tau \in MNX[t]$ . То же относится и к другим нечетким подмножествам максимальной окрестности: их функции принадлежности в общем случае заданы на всем множестве  $FMNX[t]$  и в общем случае не превосходят его функцию принадлежности. Введем в явном виде такую функцию принад-



лежности в (для простоты скалярные) уравнения (1) и (2), обозначив ее для краткости через  $\mu[t; \tau]$ ,  $\tau = t - 1, \dots, 0$ . Получим уравнение скалярной нечеткой нелинейной дискретной системы Вольтерра [19]

$$x[t] = f(t; x[t-1], \mu[t; t-1]; \dots; x[1], \mu[t; 1]; x[0], \mu[t; 0]).$$

Применение к его правой части разложения в дискретный функциональный ряд Вольтерра [20] до членов второй суммарной степени по  $x$  и  $\mu$  включительно приводит к описанию так введенной скалярной нечеткой нелинейной дискретной системы Вольтерра в виде

$$x[t] = a_0[t] + \left( \sum_{\tau \in T} a_{1x}[t; \tau]x[\tau] + \sum_{\tau \in T} a_{1\mu}[t; \tau]\mu[\tau] \right) + \\ + \left( \sum_{\tau_1 \in T} \sum_{\tau_2 \in T} a_{2xx}[t; \tau_1, \tau_2]x[\tau_1]x[\tau_2] + \right. \\ \left. + \sum_{\tau_1 \in T} \sum_{\tau_2 \in T} a_{2\mu\mu}[t; \tau_1, \tau_2]\mu[\tau_1]\mu[\tau_2] + \right. \\ \left. + \left\{ \sum_{\tau_1 \in T} \sum_{\tau_2 \in T} a_{2\mu x}[t; \tau_1, \tau_2]\mu[\tau_1]x[\tau_2] \right\} \right) + \dots$$

В работе [10] рассмотрен простейший модельный пример скалярной нечеткой линейной по состояниям дискретной системы Вольтерра, уравнение которой является весьма специальным случаем полученного выше описания, а именно — диагональным членом двойной суммы в фигурных скобках. При этом значения функции принадлежности естественным образом входят в коэффициенты уравнения. Для концентрации в дальнейшем изложении внимания на основном рассматриваемом здесь вопросе — учете нечеткости окрестностей по состоянию дискретно-временных систем — положим  $a_{2\mu x}[t; \tau_1, \tau_2] = 1$ . Тогда скалярная нечеткая линейная по состояниям дискретная система типа Вольтерра описывается уравнением

$$x[t] = \sum_{\tau=0}^{t-1} \mu[t; \tau]x[\tau] = \sum_{\tau \in T} \mu[t; \tau]x[\tau], \quad (7)$$

вполне сопоставимым с уравнением (5) скалярной линейной нестационарной дискретной системы Вольтерра.

Таким образом, учет нечеткости окрестностей по состоянию даже стандартных одношаговых дискретно-временных систем приводит к системам типа Вольтерра, т. е. с нефиксированным последствием. Как только что показано, в случае линейных систем возможный естественный подход к учету указанной нечеткости состоит во введении функций принадлежности непосредственно в коэффициенты уравнения системы. Полученная система линейна по состояниям, но билинейна по совокупности состояний и функций принадлежности; это подчеркивается в связи с тем, что в некоторых приложениях функции принадлежности допускают трактовку как входные воздействия системы, что может представлять интерес при решении проблем управления нечеткими системами, а также при исследовании выполнимости для них полугруппового свойства. Отметим, что дискретные системы Вольтерра (1) рассматриваются в ра-

ботах [11—14] как автономные, т. е. без учета входных воздействий.

В описании (7) нечеткая линейная дискретная система типа Вольтерра, как и система (5), удовлетворяет полугрупповому свойству, установленному в работе [14] для более общей системы (1). В то же время из содержательного смысла систем (7) как нечетких окрестностных следует, что выполнение для них полугруппового свойства может потребовать подчинения функций принадлежности определенным условиям. Так, расчет реакции системы (7) уже на втором шаге приводит к соотношению вида (приняты более подробные обозначения функций принадлежности)  $\mu_{FSNX[0, 2]}[0] + \mu_{FSNX[0, 2]}[1]\mu_{FSNX[0, 1]}[0] = \mu_{FSNX[1, 2]}[1]\mu_{FSNX[0, 1]}[0]$ ; одноточечные множества естественно рассматривать как четкие; тогда условие, которому должна подчиняться функция принадлежности двухточечного множества, принимает вид, достаточно естественно интерпретируемый как с точки зрения теории систем, так и с точки зрения теории нечетких множеств:  $\mu_{FSNX[0, 2]}[0] + \mu_{FSNX[0, 2]}[1] = 1$ . Дальнейший расчет реакции системы приводит к разветвляющейся совокупности условий подобного рода и к нетрадиционной трактовке нечеткой динамики.

Объяснение особенности, проиллюстрированной приведенным примером, состоит в том, что характеристика дискретных систем Вольтерра как систем с нефиксированным последствием (в отличие от стандартных систем с конечным фиксированным последствием) позволяет расширить класс этих систем до более общего, чем в работах [13, 14], класса систем с изменяющейся структурой, текущее состояние которых зависит не стандартно от одного или фиксированного числа непосредственно предшествующих состояний, но и не от всей предыстории, т. е. не от всех состояний из временного промежутка от начального до текущего момента времени, а лишь от некоторого подмножества этих состояний, определяемого, вообще говоря, текущим состоянием, причем в общем случае неоднозначно. Некоторые условия выполнимости полугруппового свойства для этого более общего класса систем представлены в работе [21].

Обоснованное в работе [14] выполнение полугруппового свойства для рассмотренных там четких систем с изменяющейся структурой связано, среди прочего, с тем, что при замене функций принадлежности нечетких множеств характеристическими функциями четких последние при увеличении  $t$  наращиваются без изменения их структуры. Функции же принадлежности могут изменять структуру при изменении  $t$ , что в общем случае приводит к системам с “более сильно” изменяющейся структурой, чем у рассмотренных в работах [13, 14], вследствие чего полугрупповое свойство для нечетких систем может нарушаться, если функции принадлежности не подчинить дополнительным требованиям, пример которых приведен ранее.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ранее неоднократно упоминалось имя итальянского математика Вито Вольтерра (1860—1940 гг.). Оно хоро-

шо известно специалистам не только в фундаментальной математике, но и во многих прикладных областях [20]. В. Вольтерра является одним из создателей математической экологии. Широко известная математическая модель совместного существования двух биологических видов (популяций) — экосистемы “хищник — жертва”, называемая моделью Вольтерра — Лотки, заложила фундамент математической теории биологических сообществ [22].

Дискретные аналоги первоначально непрерывных моделей, разрабатывавшихся Вольтерра, с появлением современных информационных технологий находят, подчас неожиданные, приложения в самых разнообразных областях. Ярким примером может служить исследование дискретных моделей Вольтерра—Лотки в связи с проблемами нелинейной динамики, синергетики, фракталов и хаоса [23]. Данная работа служит примером еще одного подтверждения сказанному.

Различные области применения четких дискретных систем Вольтерра указаны в работах [11—14]. В частности, в работе [13] показано, как с их помощью могут моделироваться вычислительные процессы. В этом смысле нечеткие дискретные системы типа Вольтерра могут применяться как модели “мягких” вычислительных процессов, оперирующих с нечеткими данными, которыми, как сейчас уже хорошо и широко понято, изобилуют техника, технологии, экономика, экология и другие прикладные области.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Месарович М., Такахара Я. Общая теория систем: математические основы. — М.: Мир, 1978.
2. Blyumin S. Generalized argument-alphabet signal processing // Proc. 3rd Int. Conf. On Signal Processing. — Beijing, 1996. — P. 753 — 756.
3. Fernandez F., Gutierrez J. A Takagi-Sugeno model with fuzzy inputs viewed from multidimensional interval analysis // Fuzzy Sets and Systems. — 2003. — Vol. 135, No. 1. — P. 39 — 61.
4. Bondia J., Pico J. Analysis of linear systems with fuzzy parametric uncertainty // Fuzzy Sets and Systems. — 2003. — Vol. 135, No. 1. — P. 81—121.
5. Блюмин С.Л. Соотношения типа Кэли-Гамильтона в теории дискретно-аргументных систем // Автоматика и телемеханика. — 1981. — № 9. — С. 133—142.
6. Блюмин С. Л., Фараджев Р. Г. Линейные клеточные машины: подход пространства состояний (обзор) // Там же. — 1982. — № 2. — С. 125—163.
7. Блюмин С. Л., Корнеев А. М. Дискретно-аргументное моделирование систем обработки информации и управления. — Липецк: ЛГТУ, 1993.
8. Блюмин С. Л., Шмырин А. М. От систем на графах к окрестностным системам // Тр. Всеросс. конф. “Математическое моделирование систем. Методы, приложения и средства”. — Воронеж: ВГУ, 1998. — С. 33—41.
9. Блюмин С. Л., Шмырин А. М., Шмырин Д.А. Новое направление в моделировании систем: окрестностные модели // Докл. Междунар. науч.-тех. конф. “Программное обеспечение автоматизированных систем управления”. — Липецк: ЛГТУ, 2000. — С. 15—19.
10. Блюмин С. Л., Шмырин А. М. Нечеткие окрестностные системы: модельный пример // Современные проблемы информатизации в непроизводственной сфере и экономике: Сб. тр. — Воронеж: ВГТУ, 2003. — Вып. 8. — С. 93—94.
11. Колмановский В. Б., Родионов А. М. Об устойчивости некоторых дискретных процессов Вольтерра // Автоматика и телемеханика. — 1995. — № 2. — С. 3—13.
12. Колмановский В.Б. О применении второго метода Ляпунова к разностным уравнениям Вольтерра // Там же. — 1995. — № 11. — С. 50—64.
13. Гайшун И. В. Дискретные уравнения с изменяющейся структурой и устойчивость их решений // Дифференциальные уравнения. — 1997. — Т. 33, № 12. — С. 1607—1614.
14. Борухов В. Т., Гайшун И.В. Вложимость нелинейных дискретных уравнений с изменяющейся структурой в линейные системы // Там же. — 1999. — Т. 35, № 9. — С. 1207—1215.
15. Klement E., Mesiar R., Pap E. Measure-based aggregation operators // Fuzzy Sets and Systems. — 2004. — Vol. 142, No. 1. — P. 3—14.
16. Calvo T., Pradera A. Double aggregation operators // Ibid. — 2004. — Vol. 142, No. 1. — P. 15—33.
17. Блюмин С. Л., Шуйкова И. А. Модели и методы принятия решений в условиях неопределенности. — Липецк: ЛЭГИ, 2001. — 139 с.
18. Блюмин С. Л., Шуйкова И. А., Сараев П. В., Черпаков И. В. Нечеткая логика: алгебраические основы и приложения. — Липецк: ЛЭГИ, 2002. — 111 с.
19. Блюмин С. Л., Шмырин А. М. Нечеткие окрестностные конечные системы // Современные методы теории краевых задач: Матер. Воронежской весенней математической школы “Понtryгинские чтения — XIV”. — Воронеж: ВГУ, 2003. — С. 26.
20. Блюмин С. Л., Шмырин А. М. Дискретные математические модели Вольтерра в экологии и других областях // Экология ЦЧО РФ. — 2003. — № 2 (11). — С. 16—18.
21. Блюмин С. Л. Свойство композиции переходов состояний для специального класса дискретных систем // Современные методы теории краевых задач: Матер. Воронежской весенней математической школы “Понtryгинские чтения — XIV”. — Воронеж: ВГУ, 2003. — С. 25—26.
22. Вольтерра В. Математическая теория борьбы за существование. — М.: Наука, 1976. — 345 с.
23. Дискретная система Вольтерра — Лотки // В кн.: Пайтген Х.-О., Рихтер П.Х. Красота фракталов. — М.: Мир, 1993. — 176 с.

☎ (0742) 32-81-33

E-mail: amsh@lipetsk.ru





# ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВХОДЯЩИМ ПОТОКОМ НАГРУЗКИ В СИСТЕМАХ С ПОВТОРАМИ ПЕРЕДАЧ

В. А. Жевнеров

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва

Предложена методика оптимального управления потоком нагрузки для систем с повторами передач. Приведен пример для системы с наиболее распространённым видом множественного доступа ALOHA.

Рассматривается задача определения значения  $\lambda^0$  интенсивности входящего потока, обеспечивающего оптимальное значение целевой функции  $W_n$ , т. е.  $W_n(\lambda^0) = \text{extr } W_n(\lambda)$ .

Так как для потоковых систем целевая функция обычно представляется в виде  $W_n(\lambda) = \lambda W(\lambda)$ , где  $W(\lambda)$  — значение критерия качества обработки (передачи) единицы потока нагрузки, то задача может быть представлена в виде

$$\text{extr } \lambda W(\lambda) = \lambda^0 W(\lambda^0). \quad (1)$$

Для обеспечения оптимального значения  $\lambda = \lambda^0$  должно выполняться следующее необходимое условие

$$[\lambda W(\lambda)]'_\lambda \Big|_{\lambda = \lambda^0} = \lambda^0 W'_\lambda(\lambda^0) + W(\lambda^0) = 0,$$

откуда следует

$$\lambda^0 = -W(\lambda^0) / W'_\lambda(\lambda^0). \quad (2)$$

Уравнение (2) позволяет определить значения  $\lambda = \lambda^0$ , обеспечивающие экстремальные значения  $W(\lambda)$  за исключением случаев, когда решения находятся на границах области определения  $\lambda$ . Обычно такие случаи хорошо известны. Решения уравнения (2) удобно находить методом последовательных приближений, используя в качестве начального приближения минимальное значение  $\lambda$ .

В задаче (1) рассматривается случай изменения интенсивности входящего в некоторый узел системы внешнего потока. В действительности суммарный поток, входящий в этот узел, может быть увеличен путем дополнительного поступления потоков, приходящих по ветвям от других узлов системы, т. е. благодаря обратным связям. Учёт такого влияния показан ниже на примере однофазовой

системы с обратной связью для наиболее общего случая зависимости вероятности  $p_{oc}$  обратной связи от суммарной интенсивности потока. Структурная схема рассматриваемой системы показана на рис. 1, где  $\lambda$  — интенсивность внешнего входящего потока;  $\lambda^-$  — интенсивность выходящего потока;  $\tilde{\lambda}$  — суммарная интенсивность потока, поступающего на вход системы.

Поток на выходе системы с вероятностью  $p_n$  получает полную обработку в приборе и с вероятностью  $q_n = 1 - p_n$  нуждается в повторной обработке. Величина  $p_n$  может трактоваться как надёжность процесса обработки собственно в приборе. Кроме того, поток на выходе прибора с вероятностью  $p_{oc}(\tilde{\lambda})$  отправляется повторно на вход системы, а с вероятностью  $p_c(\tilde{\lambda}) = 1 - p_{oc}(\tilde{\lambda})$  покидает систему. Величина  $p_c(\tilde{\lambda})$  может трактоваться как готовность прибора к обработке потока. Вероятности  $p_n$  и  $p_c(\tilde{\lambda})$

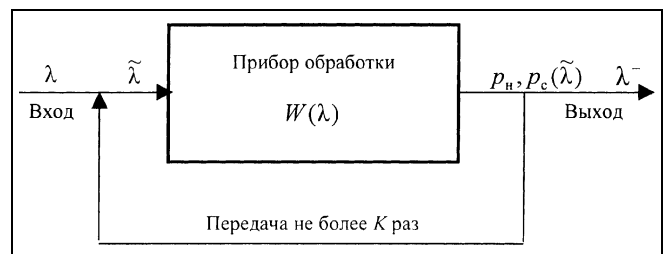
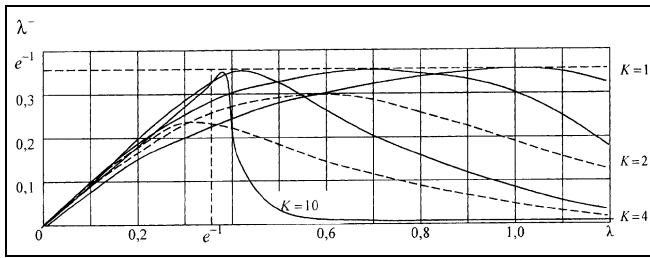


Рис. 1. Структурная схема однофазовой системы с обратной связью



**Рис. 2.** Зависимости интенсивности выходящего потока от интенсивности внешнего входящего потока

полагаются взаимно независимыми. Максимальное число повторных передач ограничено числом  $K - 1$ .

Для рассматриваемой системы справедливы следующие уравнения связи между значениями интенсивностей потоков:

$$\lambda^- = p_n p_c(\tilde{\lambda}) \tilde{\lambda}, \quad (3)$$

$$\lambda^- = [1 - (1 - p_n p_c(\tilde{\lambda}))^K] \lambda.$$

Значение целевой функции на выходе системы определяется как  $W_n = \lambda^- W(\lambda)$ .

Из условия обеспечения равенства  $\partial W_n / \partial \lambda = 0$  в соответствии с уравнением (3) имеем:

$$\tilde{\lambda}^* = -p_c(\tilde{\lambda}) W(\tilde{\lambda}) / \left. \frac{\partial [p_c(\tilde{\lambda}) W(\tilde{\lambda})]}{\partial \tilde{\lambda}} \right|_{\tilde{\lambda} = \tilde{\lambda}^*}, \quad (4)$$

где  $\tilde{\lambda}^*$  — критическое значение  $\tilde{\lambda}$ , обеспечивающее наибольшее значение  $\lambda^-$ . Нетрудно убедиться, что, как правило, для реальных систем уравнение (4) имеет единственное устойчивое решение, поскольку по физическому смыслу  $p_c(\tilde{\lambda}) W(\tilde{\lambda})$  является монотонной выпуклой или вогнутой функцией. Заметим, что величина  $\tilde{\lambda}^*$  не зависит от значений  $p_n$  и  $K$ .

В соответствии с изложенным оптимальное управление доступом потоков сообщений сводится к следующему.

1. Определяется значение  $\lambda^*$ , соответствующее значениям  $\tilde{\lambda}^*$  и  $K \rightarrow \infty$ , удовлетворяющее соотношению  $\lambda^* = p_n p_c(\tilde{\lambda}^*) \tilde{\lambda}^*$ .

2. Если  $\lambda < \lambda^*$ , то система при любых  $K$  в область насыщения не попадает, т. е. значение  $K$  в этом случае необходимо выбирать как можно большим. Ограничениями сверху могут быть либо требование достижения определённого значения вероятности доставки, либо среднего времени доставки сообщений.

3. Если  $\lambda^* < \lambda < \tilde{\lambda}^*$ , то при больших  $K$  система переходит в неустойчивый режим работы, что приводит к катастрофическому росту среднего времени доставки сообщений. В этой ситуации значение  $K$  необходимо устанавливать таким образом, чтобы выполнялось условие  $\tilde{\lambda} = \tilde{\lambda}^*$ . Расчёт требуемого числа повторений производится по следующему соотношению:

$$K = \ln \left[ \frac{1 - p_n p_c(\tilde{\lambda}^*) \tilde{\lambda}^*}{\lambda} \right] / \ln [1 - p_n p_c(\tilde{\lambda}^*)].$$

Очевидно, что при  $\tilde{\lambda} = \tilde{\lambda}^*$   $K = 1$ .

4. Если  $\lambda > \tilde{\lambda}^*$ , то полагается  $K = 1$ , и часть входящего потока должна получать отказ в передаче. Вероятность отказа  $p_{\text{отк}}$  определяется из условия обеспечения равенства  $\tilde{\lambda} = \tilde{\lambda}^*$ , откуда  $p_{\text{отк}} = 1 - \tilde{\lambda}^* / \lambda$ .

Для простоты изложения примера ниже рассматривается случай требования обеспечения максимального значения интенсивности выходящего потока  $\lambda^-$  для системы множественного доступа ALOHA [1–3], когда  $W(\lambda) = 1$  и при любом наложении все сообщения считаются потерянными.

Зависимости  $\lambda^-(\lambda)$  при передаче сообщений одинаковой длительности  $T$  в канале с синхронной системой ALOHA не более  $K$  раз (сплошные линии) и ровно  $K$  раз (пунктирные линии) представлены на рис. 2. Зависимости построены на основе соотношения из работы [2]  $p_c = \exp(-\lambda T)$ .

При обязательной передаче каждого сообщения ровно  $K$  раз значение  $\lambda^*$ :  $\tilde{\lambda}^* = \tilde{\lambda}(\lambda^*)$  определяется следующим соотношением:

$$\lambda^* = - \frac{1 - [1 - p_c(\tilde{\lambda}^* K) p_n]^K}{K p_n [1 - p_c(\tilde{\lambda}^* K) p_n]^{K-1} \partial p_c(\tilde{\lambda}^* K) / \partial \lambda}.$$

Для “чистой” системы ALOHA масштаб значений  $\lambda^-$  и  $\lambda$  на рис. 2 нужно уменьшить в два раза, т. е.  $\lambda^- \rightarrow 2\lambda^-$  и  $\lambda \rightarrow 2\lambda$ .

Аналогичный подход применяется при оптимизации систем с обратной связью общего вида.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бердсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных. — М.: Мир, 1989.
2. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. — М.: Мир, 1979.
3. Кустов Н. Т., Сущенко С. П. О пропускной способности метода случайного множественного доступа // Автоматика и телемеханика. — 2001. — № 1. — С. 91–101.

☎ (095) 334-85-79

E-mail: zhevn@ipu.ru

□



УДК 561.2.011.56

# ИНФОРМАЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ: ИНФОРМАЦИОННЫЕ АКЦИИ В ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОЛЯХ

Д. А. Кононов, В. В. Кульба, А. Н. Шубин

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова, г. Москва

Представлены результаты формализации ряда информационных акций, характерных для информационного управления. Предложены постановки задач информационного управления, указаны пути их эффективного решения.

## ВВЕДЕНИЕ

В наших предыдущих работах [1, 2] была введена исходная понятийная база и дано описание результатов структурного анализа основных элементов и существующих способов информационного управления в социально-экономических системах (СЭС). Были рассмотрены:

- информационные элементы понятийной базы — элемент данных, способ описания объекта Природы, информационная совокупность, информационная связь, информационный потенциал, информационное поле;
- элементы понятийной базы процесса управления в СЭС — объект управления, социальный субъект действия, информационное состояние социального субъекта действия, механизм управления, информационное управление;
- модели описания неопределенности поведения элементов СЭС с точки зрения введенных определений.

Настоящая работа посвящена формализованному обобщению вербальных постановок задач исследования информационных воздействий.

Предлагаемая модель информационного воздействия и взаимодействия основана на определении *обобщенного информационного поля* **FI**nt (total information field), создаваемого средствами внутри- и межсистемного информационного общения [1, 2].

Информационные действия в социальных системах весьма разнообразны, поскольку связаны с наличием активных системных элементов — субъектов действия (СД), обладающих самостоятельной волей. Адекватное описание их поведения представляет собой задачу значительной трудности, так как требует привлечения меж-

дисциплинарного подхода к моделированию. Для определения и изучения информационных влияний следует:

- классифицировать системные элементы СЭС;
- структурировать объект воздействия и субъект влияния;
- выделить наборы информационных действий субъектов действия.

## 1. СИСТЕМНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СЭС

Системная методология [3, 4] требует строгого описания предметной области, в которой разворачивается сеть наблюдаемых и варьируемых событий. Для системы  $\tilde{S}(\Pi^{(S)})$ , где  $\Pi^{(S)}$  — ее концепт, следует четко разграничить внутренние системные элементы  $A_S$ , связанные условиями  $(R_S, Pr_S)$ , принципы их построения, а также для каждого элемента  $A_S$  соответствующее ему окружение  $E^{(X)}(A_S)$  при выявленных отношениях  $R_0^{(A, X)}$  со свойствами  $Pr_0^{(A, X)}$ . Особо должны быть выделены описания структуры и концепции, объединяющие элементы  $A_S$  и отношения  $R_S$  со свойствами  $Pr_S$  в систему  $\tilde{S}(\Pi^{(S)})$ . Таким образом, система  $\tilde{S}(\Pi^{(S)})$  характеризуется множеством расширенных состояний  $S(\Pi^{(S)})$ , формируемых по правилу

$$S(\Pi^{(S)}) = \mathbf{X}(\tilde{S}) \times \mathbf{Y}(\tilde{S}),$$

где множество  $\mathbf{X}(\tilde{S})$  задает наборы параметров с  $\chi \in (\tilde{S})$ , соответствующие внешним условиям функционирова-

ния, а  $Y(\tilde{S})$  — множество всех гипотетически реализуемых внутренних состояний  $v \in Y(\tilde{S})$ , так что  $\eta = (\chi, v) \in S(\Pi^{(S)})$  — множество расширенных состояний.

В соответствии с концептом  $\Pi^{(S)}$  системы  $\tilde{S}(\Pi^{(S)})$  введем на множестве  $S(\Pi^{(S)})$  отношение предпочтения  $\tau^{(pref)}(\tilde{S}(\Pi^{(S)}))$ : расширенное состояние  $\eta_1$  “предпочтительнее расширенного состояния”  $\eta_2$ , если  $\eta_1 \tau^{(pref)}(\tilde{S}(\Pi^{(S)})) \eta_2$ . Тогда основная задача выбора режима функционирования системы  $\tilde{S}(\Pi^{(S)})$  заключается в поиске максимальных элементов в множестве  $S(\Pi^{(S)})$  в смысле предпочтения  $\tau^{(pref)}$ . Такой режим будем называть *целевым режимом функционирования* (ЦРФ) системы  $\tilde{S}(\Pi^{(S)})$ .

Изучение системных элементов в их взаимосвязи, описание процесса функционирования и анализ возможных состояний СЭС в будущем — основные предпосылки осуществления эффективного планирования, управления и, в конечном счете, улучшения реальной жизни людей.

Под системными элементами СЭС подразумеваются те существенные составляющие общественного устройства, которые следует учитывать при информационном управлении с целью синтеза качественных сценариев ее информационного поведения.

Рассмотренные в работе [2] механизмы управления СЭС позволяют выделить системные элементы:

- социальные информационные объекты;
- социальные информационные структуры;
- общественные информационные процессы.

### 1.1 Социальные информационные объекты

Наиболее существенными социальными информационными объектами в СЭС являются *информационные субъекты действия*: именно они представляют собой ту реальную силу, посредством которой *подготавливаются и реализуются* все принимаемые и исполняемые решения. Соотношение влияний каждого информационного СД в информационном поле фактически определяет ту интеллектуальную, морально-нравственную и эмоциональную атмосферу, которая либо оказывает поддержку, либо, наоборот, противодействует заданной политике осуществления режима функционирования системы.

Каждый системный элемент  $E^{(A)}(B, r, p)$  также может характеризоваться множеством  $SE^{(A)}(B, r, p)$  расширенных состояний  $\eta E = (\chi E, v E)$ , согласуемых с элементами множества  $S(\Pi^{(S)})$ . Однако для концептов  $p$  системных элементов и концепта  $\Pi^{(S)}$  системы последнее априори не предполагается, так что отношения предпочтения  $\tau^{(pref)}(E^{(A)}(B, r, p))$  системного элемента  $E^{(A)}(B, r, p)$  могут “сильно отличаться” от общесистемного предпочтения  $\tau^{(pref)}(\tilde{S}(\Pi^{(S)}))$ . Следовательно, будут отличаться и целевые режимы их функционирования. Именно исследование таких отличий как с точки зрения проведения внутренней информационной политики, так и осуществления

внешних воздействий представляет собой важнейший предмет анализа поведения различных системных элементов СЭС.

### 1.2. Социальные информационные структуры

Отношения между выделенными объектами определяют структуру внутренних информационных влияний СЭС. Структура системы определяет отношения, в которых находятся системные элементы. При изучении конфликтов выделяют различные группы субъектов действия. Так, в теории игр выделяют коалиции интересов, персонифицируя каждого ее участника с точки зрения его целей, и *коалиции действия*  $Co^{(A)}$  с точки зрения его возможных влияний на ситуацию.

Выделим информационные структуры существенные при исследовании СЭС.

*Информационно обеспечивающие организационные структуры* определяют отношения иерархии (каналы следования информационных потоков, действий и др.) между пассивными и активными системными элементами (СЭ). К ним относятся:

- информационно-производственные структуры — структуры производства информационных совокупностей элементов СЭС;
- информационные структуры внешних связей — отношения между внутренними и внешними элементами, описываемых в моделях объекта и его окружения;
- информационно-целевая структура — отношения между концептами субъектов действия.

*Информационно обеспечивающие функциональные структуры* — структуры модели поведения СЭ (набор действий и порядок их выполнения в организационных структурах), в том числе:

- информационные структуры взаимодействия — отношения между моделями поведения СЭ;
- информационные структуры измерений — отношения по поводу процессов измерений данных и информационных совокупностей (система мониторинга);
- информационно обеспечивающие структуры выбора — отношения по поводу процессов выбора альтернативных информационных решений субъектами действия (модель принятия решений).

Оперирование с указанными структурами может приводить к структурам более сложного вида. Так, коалиции действия представляют собой либо совокупность элементов информационно обеспечивающей функциональной структуры, либо информационно обеспечивающей структуры взаимодействия. Коалиции интересов — совокупность элементов пересечения информационно обеспечивающей структуры выбора и информационно-целевой структуры.

### 1.3. Социальные информационные процессы

Социальные процессы соединяют воедино социальные объекты и созданные структуры, осуществляя переход социальной системы из одного состояния в другое. Каждый из них обеспечивается сложным (составным) информационным процессом, требующим создания, преобразования и потребления определенных информационных совокупностей (информационного оборота).



Основой информационного оборота в СЭС являются следующие *основные процессы*:

- информационное производство — процесс создания информационных совокупностей;
- информационное распределение — процесс обеспечения доступа к информационным совокупностям (информационным ресурсам);
- информационное потребление — процесс использования информационных совокупностей;
- информационный обмен — процесс обмена информационными совокупностями или их частями, т. е. передачи информационных совокупностей между субъектами действия.

В основе эффективного осуществления указанных процессов лежат отношения собственности на информационные совокупности, а также отношения собственности в области доступа к средствам создания и каналам распространения информации (информационной инфраструктуры). Права собственности на информационные ресурсы и инфраструктуру принадлежат субъектам действия. Они реализуются посредством информационных структур. При этом основные процессы можно разложить на подпроцессы, которые, в свою очередь, являются *информационными бизнес-процессами*. На их основе могут быть созданы *информационные бизнес-структуры*.

Важнейшими процессами в СЭС являются также процессы преобразования информационных совокупностей в рамках гражданских субъектов действия, в частности, конкретного индивида. Такие процессы объединим в группу *социально-психологических информационных процессов*. Протекание таких процессов существенно зависит от культурных, культурологических, эмоциональных, психических и других особенностей личности и требует специального подхода к их изучению [2, 3].

Важнейшим системным элементом СЭС является *процесс информационного управления*, т. е. процесс регулирования совместных информационных действий социальных системных элементов, обеспечивающих заданные цели ее функционирования.

## 2. ПОНЯТИЕ И ТИПЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ АКЦИЙ

Пусть в описании общего информационного поля **FIInf** выделены СД  $Act_i$ ,  $i = \overline{1, N} = \widehat{N}$  (участники информационного общения), каждый из которых является социально-экономической системой  $\tilde{S}^{(i)}(\Pi^{(S^{(i)})})$  и представлен описанием своего информационного поля **FIInf**<sup>(i)</sup>.

Для каждого СД в соответствии с концептом  $\Pi^{(S^{(i)})}$  системы  $\tilde{S}^{(i)}$  на множестве расширенных фазовых состояний  $S^{(i)}(\Pi^{(S^{(i)})}) = X_i(\tilde{S}^{(i)}) \times Y_i(\tilde{S}^{(i)})$  будем рассматривать отношение предпочтения  $\tau^{(pref, i)}$ : состояние  $\eta_1$  “предпочтительнее состояния”  $\eta_2$ , если  $\eta_1 \tau^{(pref, i)} \eta_2$ . Следовательно, основная задача выбора режима функционирования системы  $\tilde{S}^{(i)}(\Pi^{(S^{(i)})})$  заключается в поиске

максимальных элементов в множестве  $S^{(i)}(\Pi^{(S^{(i)})})$  в смысле предпочтения  $\tau^{(pref, i)}$ . Такой режим назовем *целевым режимом функционирования системы*  $\tilde{S}^{(i)}(\Pi^{(S^{(i)})})$ .

Заданный концептом  $\Pi^{(S^{(i)})}$  режим функционирования системы  $\tilde{S}^{(i)}$  обеспечивается информационной поддержкой, осуществляемой каждым субъектом действия  $Act_i$ ,  $i \in \widehat{N}$ . Эффективность такой поддержки определяется наличием и эффективным использованием информационных совокупностей **FIInf**<sup>(i)</sup>, которые могут распространяться в общем информационном поле **FIInf**.

**Определение 1.** Совокупность действий субъекта  $Act_i$ , приводящая к изменению информационного поля **FIInf**, называется *информационной акцией*.

Информационная акция, предпринятая в информационном поле **FIInf**<sup>(i)</sup> субъектом действия  $Act_i$ , называется *внутренней информационной акцией*. Информационная акция, предпринятая субъектом действия  $Act_i$  в информационном поле **FIInf**\b>FIInf<sup>(i)</sup>, называется *внешней информационной акцией*.

Информационные акции могут быть целевые и нецелевые. Целевые акции, как правило, можно интерпретировать как стратегии поведения субъектов действия в обобщенном информационном поле. Цели информационных акций могут быть различными и зависеть как от концептов (целей), так и от состояния сторон, действующих в общем информационном поле.

Информационная акция, предпринятая субъектом действия  $Act_i$  в общем информационном поле **FIInf** с целью обеспечить эффективную информационную поддержку ЦРФ системы  $\tilde{S}^{(i)}$ , называется *информационным управлением*.

Информационную акцию, предпринятую субъектом действия  $Act_i$  во внутреннем информационном поле **FIInf**<sup>(i)</sup> с целью обеспечить эффективную информационную поддержку ЦРФ системы  $\tilde{S}^{(i)}$ , являющуюся внутренней информационной акцией, назовем *акцией информационной поддержки*. Информационную акцию, предпринятую в общем информационном поле **FIInf** с целью воздействия на выбранный его системный элемент, называется *акцией информационного воздействия*. Информационную акцию, предпринятую в общем информационном поле **FIInf** с целью обеспечить эффективную информационную поддержку ЦРФ системного элемента  $\tilde{S}^{(i, k)}$  системы  $\tilde{S}^{(i)}$ , назовем *акцией информационной защиты элемента*  $\tilde{S}^{(i, k)}$ .

Среди различного рода информационных акций выделим информационный прессинг — резкое увеличение интенсивности применения информационного воздействия и информационную агрессию — крупномасштабное и многоаспектное информационное воздействие.

Проведение информационных акций субъектом действия  $Act_i$  требует наличия информационных ресурсов,

в качестве которых выступают информационные совокупности  $\mathbf{Inf}^{(i)}$ .

Пусть указана структура внутреннего информационного поля  $\mathbf{FInf}^{(i)}$  субъекта действия  $Act_i$  в виде подсистем  $S^{(i,k)}$ ,  $k = \overline{1, N^{(i)}} = \widehat{N}^{(i)}$  — генераторов информационных совокупностей  $\mathbf{Inf}^{(i)}$  (подсистема  $S^{(i,k)}$  генерирует информационную совокупность  $Inf_k^{(i)}$ ,  $k \in \widehat{N}^{(i)}$ ).

Осуществляя внутреннюю информационную акцию в объеме  $f^{(i,k)}$ , каждая из подсистем  $S^{(i,k)}$  косвенно оказывает информационное влияние, характеризваемое “объемом информационного воздействия”  $f_j^{(i,k)} \in R^1$  по отношению к подсистеме  $S^{(i,j)}$ ,  $j \in \widehat{N}^{(i)}$ , на внутреннем информационном поле  $\mathbf{FInf}^{(i)}$  и “потенциальной силой информационного влияния”  $g_j^{inf\ in(i,k)} \in R^1$  по отношению к подсистеме  $S^{(i,k)}$  на внутреннем информационном поле  $\mathbf{FInf}^{(i)}$ .

Применение подсистемой  $S^{(i,k)}$  “силы информационного влияния”  $g_j^{inf\ in(i,k)} \in R_+^1$  по отношению к другим подсистемам на своем внутреннем информационном поле  $\mathbf{FInf}^{(i)}$  характеризует тенденцию обеспечения эффективной информационной поддержки для осуществления ЦРФ, заданного концептом  $\Pi^{(S^{(i)})}$ , и при каждом  $i \in \widehat{N}$  и  $k \in \widehat{N}^{(i)}$  вектор  $\mathbf{g}^{inf\ in(i,k)} = \{g_j^{inf\ in(i,k)}, j \in \widehat{N}^{(i)}\}$  представляет собой вектор потенциального информационного управления подсистемы  $S^{(i,k)}$ .

Реальную силу информационного влияния  $u_j^{inf\ in(i,k)} \in R^1$  по отношению к подсистеме  $S^{(i,j)}$  на внутреннем информационном поле  $\mathbf{FInf}^{(i)}$  определим как реализованную часть “потенциальной силы информационного влияния”  $g_j^{(i,k)}$  по отношению к другим подсистемам на внутреннем информационном поле  $\mathbf{FInf}^{(i)}$ :  $\mathbf{u}^{inf\ in(i,k)} = \{u_j^{inf\ in(i,k)}, j \in \widehat{N}^{(i)}\}$ ,  $i \in \widehat{N}$ ,  $k \in \widehat{N}^{(i)}$ .

В ряде случаев применение подсистемой  $S^{(i,k)}$  “силы информационного влияния”  $g_j^{inf\ in(i,k)} \in R_-^1$  по отношению к другим подсистемам на своем внутреннем информационном поле  $\mathbf{FInf}^{(i)}$  направлено на обеспечение противодействия информационной поддержке для осуществления ЦРФ  $\tilde{S}^{(i)}$ , заданного концептом  $\Pi^{(S^{(i)})}$  (эффект “пятой колонны”).

Предположим, что подсистема  $S^{(i,k)}$ , используя средства межсистемного информационного общения, может осуществлять информационные акции на чужих информационных полях, применяя “силу информационного влияния”  $u^{inf\ out(i,k)}$ . Значение “силы информационного влияния” подсистемы  $S^{(i,k)}$ , примененную по отношению

к подсистеме  $S^{(j,p)}$ , обозначим  $u_{jp}^{inf\ out(i,k)}$ , так что при каждом  $i \in \widehat{N}$  и  $k \in \widehat{N}^{(i)}$  матрица  $U^{inf\ out(i,k)} = \{u_{jp}^{inf\ out(i,k)}, p \in \widehat{N}^{(j)}, j \in \widehat{N}^{(i)}\}$  представляет собой матрицу внешней информационной акции подсистемы  $S^{(i,k)}$ .

В целом информационную акцию субъекта действия  $Act_i$  будем представлять кортежем информационных совокупностей:  $IA^{(i)} = \{Inf(Act_i), Inf(\Pi^{(i)}), Inf(\mathbf{Mn}_\lambda), \text{ при } \lambda \in \Lambda\}$ , где  $Inf$  — оператор образования информационной совокупности,  $Act_i$  — субъект действия,  $\Pi^{(i)}$  — совокупность целей проведения информационной акции субъектом действия  $Act_i$ ,  $\mathbf{Mn}_\lambda$ ,  $\lambda \in \Lambda$  — совокупность способов проведения информационной акции субъектом действия  $Act_i$ . Таким образом,  $Inf(Act_i)$  — набор данных, первичных и вторичных информационных совокупностей, которые являются исходными для изучения информационной акции с точки зрения описания субъекта, ее осуществляющего;  $Inf(\Pi^{(i)})$  — набор данных, первичных и вторичных информационных совокупностей о целевых установках субъекта действия  $Act_i$  при проведении им информационной акции;  $Inf(\mathbf{Mn}_\lambda)$  — набор данных, первичных и вторичных информационных совокупностей о способах проведения акции субъектом действия  $Act_i$ , который включает в себя технологию описания обстановки, номенклатуру и способы использования ресурсов, ожидаемые результаты и т. п.

В зависимости от типа информационной акции и применяемых моделей анализа структуризация выделенных элементов кортежа будет варьироваться, а следовательно, и описание их структуры.

### 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ И ЭФФЕКТИВНЫЙ СИНТЕЗ АКЦИЙ ИНФОРМАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ

Для описания и реализации механизма информационного воздействия (управления)  $\mathbf{Mu}(O^{(u)}, I)$  необходимо выделить объект воздействия  $O^{(u)}$  и обстоятельства  $I$  применения механизма  $\mathbf{Mu}$ . Определение  $I$  фиксирует объект информационного управления:  $O^{(u)} = \mathbf{FInf}^{(i)}$ , т. е. внутреннее информационное поле субъекта действия  $Act_i$ ,  $i \in \widehat{N}$ , а при более детальной структуризации — выделенные его системные элементы.

В то же время совокупность обстоятельств  $I$  зависит от цели и предполагаемых способов воздействия. В любом случае необходимым условием осуществления процесса информационного воздействия является его ресурсное обеспечение и, в первую очередь, информационное.

Наличие информационных совокупностей  $\mathbf{Inf}^{(i)}$  подсистем  $S^{(i,k)}$ ,  $k \in \widehat{N}^{(i)}$ , субъекта действия  $Act_i$ ,  $i \in \widehat{N}$ , обеспечивается осуществлением процессов производства и потребления информации.

Информационно-производственная структура внутреннего информационного поля характеризуется струк-



турой непосредственных информационно-производственных связей  $D^{(i)}$  ( $N^{(i)} \times N^{(i)}$  матрицей смежности). При этом условие  $d_{kj}^{(i)} = 1$  фиксирует факт сложившейся технологической связи генерации информационной совокупности подсистемы-генератора  $S^{(i,j)}$  на основе информационной совокупности подсистемы-генератора  $S^{(i,k)}$  во внутреннем информационном поле  $\mathbf{FInf}^{(i)}$ , условие  $d_{kj}^{(i)} = 0$  — отсутствие такой связи.

Объем производства информационных совокупностей  $Inf_k^{(i)}$  как информационного ресурса, генерируемого подсистемой  $S^{(i,k)}$  ( $k$ -го информационного ресурса) в единицу времени при сложившейся технологии, обозначим  $x^{(i,k)}$ .

Величина  $k$ -го свободного информационного ресурса, который может быть использован для осуществления информационных акций, определяется из выражения:

$$c^{(i,k)} = x^{(i,k)} - \sum_{j=1}^{N^{(i)}} x_j^{(i,k)} \quad i \in \widehat{N}, \quad k \in \widehat{N}^{(i)}. \quad (1)$$

Положительное значение  $c^{(i,k)}$  означает, что информационная совокупность подсистемы-генератора  $S^{(i,k)}$  может быть использована для обеспечения эффективной информационной поддержки, чтобы осуществить

ЦРФ системы  $\tilde{S}^{(i)}$ , заданного концептом  $\Pi^{(S^{(i)})}$ . Отрицательное значение означает невозможность такой поддержки без привлечения дополнительных положительных внешних информационных ресурсов. Вектор  $\mathbf{c}^{(i)} = \{c^{(i,k)} \mid k \in \widehat{N}^{(i)}\}$ ,  $i \in \widehat{N}$ , представляет собой *вектор свободных информационных ресурсов* субъекта действия  $Act_i$ . Они могут быть им использованы на проведение различных информационных акций.

**Определение 2.** Подсистема  $S^{(i,k)}$  называется *потенциально информационно управляемой* в информационном поле  $\mathbf{FInf}^{(i)}$ , если  $c^{(i,k)} \geq 0$ ,  $k \in \widehat{N}^{(i)}$ .

Поскольку производство  $k$ -го информационного ресурса сосредоточено в подсистеме-генераторе  $S^{(i,k)}$ , то при  $c^{(i,k)} > 0$  можно говорить об управляемости по направлению  $e_k$  информационного поля  $\mathbf{FInf}^{(i)}$ , погруженного в евклидово пространство  $E^{N^{(i)}}$ . Тогда СД  $Act_i$  рассматривается как центр, управляющий подсистемой  $S^{(i,k)}$  по направлению  $k$ .

**Определение 3.** Информационное поле  $\mathbf{FInf}^{(i)}$  называется *потенциально информационно управляемым* субъектом действия  $Act_i$ , если  $c^{(i,k)} \geq 0$  для всех  $k \in \widehat{N}^{(i)}$ .

Пусть задан вектор свободных информационных ресурсов  $\mathbf{c}^{(i)}$  с условием

$$\mathbf{c}^{(i)} \geq 0, \quad i \in \widehat{N}. \quad (2)$$

Задача обеспечения информационной управляемости собственной СЭС (ОИУ-задача) в широком смысле за-

ключается в поиске набора величин  $Pr^{(i)} = \{x^{(i,k)}, x_j^{(i,k)}\}$ ,  $i \in \widehat{N}$ ,  $j, k \in \widehat{N}^{(i)}$ , удовлетворяющих вместе с вектором  $\mathbf{c}^{(i)}$  уравнению (1) и условию (2).

**Определение 4.** Совокупность величин  $P^{(pr,i)}$ , являющаяся решением ОИУ-задачи, называется *внутренней стратегией обеспечения информационной управляемости субъекта действия  $Act_i$  во внутреннем информационном поле  $\mathbf{FInf}^{(i)}$* .

Информационная совокупность  $IA^{(pr,i)}$ , описывающая процесс информационного производства как информационную акцию  $IA^{(ag,i)}$  обеспечения информационной управляемости субъекта действия  $Act_i$ , содержит компоненты  $IA^{(pr,i)} = \{Inf^{prc}(Act_i), Inf^{prc}(\Pi^{(pr,i)}), Inf^{prc}(\mathbf{Mn}_\lambda \text{ при } \lambda \in \Lambda^{pr})\}$ , где  $Inf^{prc}(Act_i) = \{Act_i\}$ ,  $Inf^{prc}(\Pi^{(pr,i)}) = \{\mathbf{c}^{(i)} \geq 0\}$ ,  $Inf^{prc}(\mathbf{Mn}_\lambda \text{ при } \lambda \in \Lambda^{pr}) = \{N^{(i)}, S^{(i,k)}, D^{(i)}, Pr^{(i)}, \widehat{Pr}^{(i)}\}$ , а  $\widehat{Pr}^{(i)}$  — множество ограничений на выбор величин  $Pr^{(i)}$ , т. е.

$$Pr^{(i)} \in \widehat{Pr}^{(i)}. \quad (3)$$

Реализация внутренней стратегии информационной управляемости может быть рассчитана на единовременный либо многошаговый процесс; соответствующие стратегии называют одно- и многошаговыми.

Свободные информационные ресурсы можно рассматривать как элементы поля информационного управления  $\mathbf{FInfC}^{(i)}$  субъекта действия  $Act_i$ . Это поле погружено в информационное поле  $\mathbf{FInf}^{(i)}$  и является одним из его элементов.

Охарактеризуем состояние внутреннего информационного поля управления  $\mathbf{FInfC}^{(i)}$  с точки зрения отношения предпочтения  $\tau^{(pref,i)}$ . Применение  $k$ -го информационного ресурса для обеспечения информационной поддержки ЦРФ системы характеризуется:

- вектором  $\mathbf{Es}^{(i)} = \{Es_k^{(i)}, k \in \widehat{N}^{(i)}\}$  коэффициентов ожидаемой поддержки ЦРФ, так что сила потенциального информационного влияния  $g_j^{inf in(i,k)} = Es_k^{(i)} c_j^{(i,k)}$ ,  $i \in \widehat{N}$ ,  $j, k \in \widehat{N}^{(i)}$ ;
- функцией  $\varphi_j^{(i,k)}(g^{inf in(i,k)})$  реальной поддержки ЦРФ системы, так что сила реального информационного влияния  $u_j^{inf in(i,k)} = \varphi_j^{(i,k)}(g^{inf in(i,k)})$ ,  $i \in \widehat{N}$ ,  $k \in \widehat{N}^{(i)}$ ;
- уровнем информационного влияния LI, необходимого для поддержания статус-кво ЦРФ.

Таким образом, интегральная оценка ожидаемой поддержки ЦРФ субъекта действия  $Act_i$  при применении в объеме  $\mathbf{c}^{(i)}$  информационного управления  $IEs^{(i)}(\mathbf{c}^{(i)}) =$

$$= \sum_{k,j=1}^{N^{(i)}} \varphi_j^{(i,k)}(g^{inf in(i,k)}), \quad i \in \widehat{N},$$

дает обобщенную характеристику эффективности использования (в смысле ожидаемой поддержки) производимых информационных

ресурсов для информационной поддержки с точки зрения субъекта действия  $Act_i$ . В этом случае отношения предпочтения  $\tau^{(pref, i)} = \tau_{es}^{(pref, i)}$  задаются условиями:

$$\mathbf{c}^{(i, 1)} \tau_{es}^{(pref, i)} \mathbf{c}^{(i, 2)},$$

когда

$$IEf^{(i)}(\mathbf{c}^{(i, 1)}) \geq LI \text{ и } LI > IEf^{(i)}(\mathbf{c}^{(i, 2)}). \quad (4)$$

В силу условий (4) задача оптимального производства свободного информационного ресурса по ожидаемой поддержке ЦРФ с заданным уровнем информационного влияния субъектом действия  $Act_i$ ,  $i \in \widehat{N}$ , во внутреннем информационном поле  $\mathbf{FInf}^{(i)}$  заключается в поиске решения следующей математической задачи (*задачи LI-управляемости*):

найти набор величин  $Pr^{(i)}$ , для которого интегральная оценка ожидаемой информационной поддержки ЦРФ  $IEf^{(i)}(\mathbf{c}^{(i)})$  достигает необходимой величины уровня информационного влияния  $LI$ , т. е.  $IEf^{(i)} \geq LI$  при условиях (1) и информационно производственных ограничениях (3).

**Определение 5.** Совокупность величин  $Pr^{(i)}(LI)$ , являющаяся решением задачи LI-управляемости, называется одношаговой внутренней стратегией информационной LI-управляемости субъекта действия  $Act_i$  во внутреннем информационном поле  $\mathbf{FInf}^{(i)}$ .

**Определение 6.** Информационное поле  $FInf^{(i)}$  называется LI-информационно управляемым субъектом действия  $Act_i$ , если задача LI-управляемости имеет решение.

Следовательно, информационная совокупность  $IA^{(pr, i)}$ , описывающая процесс информационного производства как информационную акцию  $IA^{(pr, i)}(LI)$  LI-управляемости субъекта действия  $Act_i$ , содержит компоненты  $IA^{(pr, i)}(LI) = \{Inf^{pr}(Act_i), Inf^{pr}(\Pi^{(pr, i)}), Inf^{pr}(\mathbf{Mn}_\lambda \text{ при } \lambda \in \Lambda^{pr})\}$ , где  $Inf^{pr}(Act_i) = Act_i$ ,  $Inf^{pr}(\Pi^{(pr, i)}) = \{\mathbf{c}^{(i)}, \tau_{es}^{(pref, i)}\} = \{\mathbf{c}^{(i)}, \mathbf{Es}^{(i)}, \varphi_j^{(i, k)}, LI\}$ ,  $Inf^{pr}(\mathbf{Mn}_\lambda \text{ при } \lambda \in \Lambda^{pr}) = \{N^{(i)}, S^{(i, k)}, D^{(i)}, Pr^{(i)}, \widehat{Pr}^{(i)}\}$ , а  $\widehat{Pr}^{(i)}$  — множество ограничений для величин  $Pr^{(i)}$ .

Пусть  $\mathbf{IC}^{(i)}(B^{(i)}, R^{(i)}, P^{(i)})$  — системный элемент, основная функция которого заключается в осуществлении процесса информационного воздействия субъекта действия  $Act_i$ . Положим

$B^{(i)} = \{Act_i, \mathbf{FInf}^{(i)}, \mathbf{FInfC}^{(i)}, N^{(i)}, S^{(i, k)}, Inf_k^{(i)} \text{ } k \in \widehat{N}^{(i)}\}$  — множество первичных элементов (субстрат СЭ  $\mathbf{IC}^{(i)}(B^{(i)}, R^{(i)}, P^{(i)})$ ),

$R^{(i)} = \{D^{(i)}, Inf_k^{(j)}, Pr^{(i)}, \widehat{Pr}^{(i)}, f^{(i, k)}, g_j^{inf \text{ in}(i, k)}, \mathbf{u}^{inf \text{ in}(i, k)}, \mathbf{c}^{(i)}, \mathbf{Es}^{(i)}, \varphi_j^{(i, k)}, LI, IEs^{(i)}, IEf^{(i)},$

$k, j \in \widehat{N}^{(i)}\}$  — набор отношений на субстрате  $B^{(i)}$  (структура СЭ  $\mathbf{IC}^{(i)}(B^{(i)}, R^{(i)}, P^{(i)})$ ),

$P^{(i)} = \{\tau^{(pref, i)}, \tau_{es}^{(pref, i)}\}$  — набор свойств отношений на субстрате  $B^{(i)}$  (концепт СЭ  $\mathbf{IC}^{(i)}(B^{(i)}, R^{(i)}, P^{(i)})$ ).

Различные варианты квазиинформационных гипотез о технологии информационного производства ( $\mathbf{Mn}_\lambda$ ) и концепциях эффективности  $\Pi^{(pr, i)}$  приводят к постановке различных математических задач и многообразие сценариев информационного развития системы  $\tilde{S}^{(i)}$  [3].

Так, пусть применение  $k$ -го информационного ресурса для обеспечения информационной поддержки ЦРФ системы определяется для субъекта действия  $Act_i$  вектором  $\mathbf{Ef}^{(i)} = \{Ef_k^{(i)}, k \in \widehat{N}^{(i)}\}$  коэффициентов эффективности реальной поддержки (ЭРП) целевого режима функционирования.

Тогда интегральная оценка эффективности ожидаемой поддержки  $IEf^{(i)}(\mathbf{c}^{(i)}) = \sum_{k=1}^{N^{(i)}} Ef_k^{(i)} \mathbf{c}^{(i, k)} = \langle \mathbf{Ef}^{(i)}, \mathbf{c}^{(i)} \rangle$ ,

$i \in \widehat{N}$ , дает обобщенную характеристику эффективности использования производимых информационных ресурсов для информационного управления с точки зрения субъекта действия  $Act_i$ . Отношения предпочтения по оценке эффективности ожидаемой поддержки  $\tau_{ef}^{(pref, i)}$  задаются условиями:

$$\mathbf{c}^{(i, 1)} \tau_{ef}^{(pref, i)} \mathbf{c}^{(i, 2)} \text{ тогда и только тогда,}$$

$$\text{когда } IEf^{(i)}(\mathbf{c}^{(i, 1)}) \geq IEf^{(i)}(\mathbf{c}^{(i, 2)}).$$

В силу условий (4) задача оптимального производства свободного информационного ресурса по эффективности информационного управления субъектом действия  $Act_i$ ,  $i \in \widehat{N}$ , заключается в поиске решения следующей математической задачи (*ЭРП-задачи*):

найти такой набор величин  $Pr^{(i)}$ , для которых интегральная оценка эффективности реальной информационной поддержки ЦРФ  $IEf^{(i)}(\mathbf{c}^{(i)})$  достигает максимального значения, т. е.  $L^{(ef, i)} = \sup_{P^{(i)} \in \tilde{P}^{(i)}} IEf^{(i)}$ , где

$L^{(ef, i)}$  — максимальный эффект внутреннего информационного управления как стратегии проведения информационных акций в общем информационном поле  $\mathbf{FInf}$ .

**Определение 7.** Информационное поле  $FInf^{(i)}$  называется потенциально эффективно информационно управляемым субъектом действия  $Act_i$ , если ЭРП-задача имеет решение.

Таким образом, акция информационного воздействия субъекта действия  $Act_i$  с доктриной отсутствия внешних информационных воздействий (ДОВВ-акция) определяется кортежем  $IA^{(ДОВВ, i)} = \{Inf^{pr}(Act_i), Inf^{pr}(\Pi^{(pr, i)}), Inf^{pr}(\mathbf{Mn}_\lambda \text{ при } \lambda \in \Lambda^{pr})\}$ , где  $Inf^{pr}(Act_i) = Act_i$ ,  $Inf^{pr}(\Pi^{(pr, i)}) = \{\mathbf{c}^{(i)}, \tau_{es}^{(pref, i)}\} = \{\mathbf{c}^{(i)}, \mathbf{Es}^{(i)}, \mathbf{Ef}^{(i)}, \alpha_j^{inf \text{ n}(i, k)}\}$ ,  $Inf^{pr}(\mathbf{Mn}_\lambda$



при  $\lambda \in \Lambda^{pr} = \{N^{(i)}, S^{(i,k)}, D^{(i)}, \mathbf{Pr}^{(i)}, \widehat{\mathbf{Pr}}^{(i)}\}$ , а  $\widehat{\mathbf{Pr}}^{(i)}$  — компакт евклидова пространства. Последнее означает ограниченность ресурсных возможностей информационного производства.

**Теорема.** Если множество  $\widehat{\mathbf{Pr}}^{(i)}$  — компакт и для некоторого  $LI > 0$  информационное поле  $\mathbf{FInf}^{(i)}$   $LI$ -информационно управляемо, то оно эффективно информационно управляемо.

Обратное, вообще говоря, неверно. Если максимально достижимый в ДОВВ-акции эффект  $L^{(ef,i)}$  достаточно низок, то при достаточно большом  $LI$  будет наблюдаться отсутствие  $LI$ -управляемости.

Таким образом, каждая информационная акция может рассматриваться как стратегия информационного поведения СД  $Act_i$  в общем информационном поле, реализуемая для решения поставленной им общей задачи наиболее эффективного осуществления концепта  $\Pi^{(i)}$ .

Отметим, что достаточный объем свободного информационного ресурса  $\mathbf{c}^{(i)}$ , специально создаваемый соответствующими органами и организациями РФ, мог бы дать возможность проводить внешние информационные акции (атаки). Цели проведения таких акций зависят от декомпозиции концепта  $\Pi^{(i)}$ , все компоненты которого являются подцелями глобальной цели — укрепление позиций страны на мировой арене. Таким образом, формально, использование объема  $u^{(i,k)}$  части ресурса  $\mathbf{c}^{(i)}$  на организацию внешнего влияния при  $u^{(i,k)} \geq 0$  характеризует желание СД  $Act_i$  снизить потенциал СЭС страны-противника посредством  $k$ -го информационного ресурса, созданного подсистемой  $S^{(i,k)}$ . При этом объектами воздействия информационного управления могут быть социальные информационные объекты-субъекты действия, структуры и процессы.

Воздействия осуществляются в целях изменения состояния или характера поведения социального информационного объекта-субъекта действия, изменения ха-

рактера взаимодействия между системными элементами социальной информационной структуры и изменения хода социального информационного процесса в желательном для проводящего акцию СД направлении.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные методы исследования проблем информационного управления в социально-экономических системах представляются достаточно перспективными, поскольку дают возможность применения известных схем прикладного моделирования на основе аксиоматического построения концепции информационного управления.

Реализация предлагаемых принципов моделирования на основе системного, междисциплинарного и сценарного подхода открывает путь для формирования сценариев информационного взаимодействия социальных субъектов действия в информационных полях, что позволит приступить к систематическому изучению процессов, происходящих в информационном обществе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кононов Д. А., Кульба В. В., Шубин А. Н. Информационное управление: формализованное описание информационных элементов // Проблемы управления. — 2004. — № 2. — С. 45—51.
2. Кононов Д. А., Кульба В. В., Шубин А. Н. Информационное управление: элементы управления и способы информационного воздействия // Там же. — № 3. — С. 25—33.
3. Кульба В. В., Кононов Д. А., Косяченко С. А., Шубин А. Н. Методы формирования сценариев развития социально-экономических систем. — М.: СИНТЕГ, 2004. — 296 с.
4. Логика и методология системных исследований. — Киев—Одесса: Вища школа, 1977.

☎ (095) 334-90-09

E-mail: kulba@ipu.ru



## Новая книга

**Цыганов В.В., Бородин В.А., Шишкин Г.Б. Интеллектуальное предприятие: механизмы овладения капиталом и властью (теория и практика управления эволюцией организации). — М.: Университетская книга, 2004. — 770 с.**

Изложены основы теории управления эволюцией организации и описаны ее практические применения. Разработана система прогрессивных адаптивных механизмов и их упрощенных моделей — архетипов овладения капиталом и властью. Комбинации этих механизмов и архетипов применяются для анализа и проектирования комплексных систем управления эволюцией социально-экономических систем разной природы и масштаба — от предприятия и корпорации до государства и мирового сообщества. Проанализированы архетипы и механизмы глобализации и российской эволюции. Развита концепция интеллектуального предприятия как центра капитала, основанного на самоорганизации и адаптации. Разработаны адаптивные механизмы функционирования цикла "исследование — производство", самоорганизации бизнеса, логистики, управления качеством и корпоративного управления.

Владимир Викторович Цыганов — д-р техн. наук, автор более 200 научных работ, сотрудник РАН. Результаты его исследований и разработок успешно внедрены в системах управления эволюцией организаций разной природы и масштаба — от промышленного предприятия и банка до отраслей промышленности, силовых структур, национальной экономики и мирового сообщества.

Владимир Алексеевич Бородин — д-р техн. наук, генеральный директор Экспериментального завода научного приборостроения РАН (ЭЗАН). Автор более 130 научных работ и изобретений. Заведующий лабораторией Института физики твердого тела РАН.

Геннадий Борисович Шишкин — канд. техн. наук, заместитель генерального директора ЭЗАН. Окончил экономический факультет МГУ, автор более 20 научных работ в области организации, планирования и управления производством.

# КАК УВЕЛИЧИТЬ ПОДПИСКУ И ПРИБЫЛЬНОСТЬ НАУЧНОГО ЖУРНАЛА: ИНФОРМАЦИОННО- ПОИСКОВЫЙ СБОРНИК АННОТАЦИЙ

В. Л. Эпштейн

*Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова, г. Москва*

Предложено создавать и применять в качестве нового инструмента маркетинговых коммуникаций на рынке научных журналов информационно-поисковые сборники аннотаций на CD-ROM и на серверах Интернет. Утверждается, что они увеличивают подписку, прибыльность, потребительскую ценность и импакт-фактор журнала; могут явиться катализатором инноваций и научно-технических коммуникаций в целевой аудитории журнала; могут продаваться на рынке научной информации в качестве нового информационного продукта.

## ВВЕДЕНИЕ

Многие научные журналы<sup>1</sup> (НЖ) переживают не лучшие времена. «В последние годы многие научные журналы теряют в среднем 3–5 % подписчиков ежегодно и считаются успешными при тираже более 300 экз. При таких темпах по прошествии 14–24 лет они потеряют половину подписчиков. Более того, сегодня уже нет сомнений, что в предвидимом будущем многие печатаемые на бумаге научные журналы перестанут существовать» [1].

Так это или нет, покажет будущее, но факт есть факт: в огромном потоке мировой литературы, посвященной *журнальному кризису*, можно найти немало аналогичных наблюдений и прогнозов. Масштабы этого потока впечатляют. Достаточно сказать, что за первое полугодие 2004 г. в информационную базу Google поступило свыше 64 тыс. работ, идентифицируемых ключевыми словами «STM Journal Crisis». Корни этого явления многообразны. К ним относятся бурное развитие, дифференциация и специализация наук; стагнация бюджетов библиотек; становление экономики знаний, развитие Веб и др.

<sup>1</sup> Термин «научный журнал» используется для обозначения рецензируемых научных, технических и медицинских журналов. Это соответствует англоязычному STM (Science, Technical, Medical) Journals. См. также ГОСТ 7.83–2001.

Данная работа основана на представлении о том, что подписка на НЖ является товаром повышенного покупательского риска: подписываясь на Журнал<sup>2</sup>, подписчик платит деньги за еще не созданную вещь.

Как убедить его, что вещь того стоит? Каким образом подписчик может убедиться, что реклама не слишком преувеличивает достоинства Журнала?

Казалось бы, сделать это возможно только единственным способом: взять комплект выпусков Журнала за один или несколько лет издания, просмотреть их и экстраполировать в предположении, что Редакционная коллегия будет работать, в будущем году, по меньшей мере, не хуже, чем в предыдущие годы.

Очевидно, однако, что это «невозможная возможность»: ни один подписчик не будет тратить время на изучение годового комплекта Журнала, не говоря уже о том, что в библиотеку он не поедет, а рекламные агенты не принесут их ему и не заставят изучать.

Предлагаемое решение состоит в следующем. Соберем аннотации всех статей, опубликованных в Журнале, и запишем их в электронный файл вместе с программой для броузинга и поиска информации по ключевым словам. Получим Информационно-Поисковый Сборник Аннотаций (ИПСА), который можно будет записать на CD-ROM и поместить на сервер Интернет.

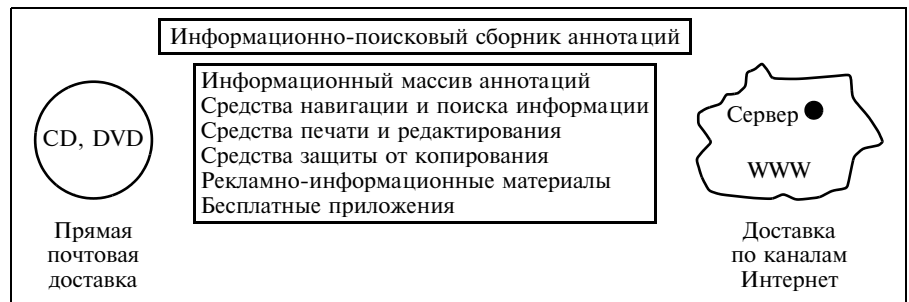
<sup>2</sup> Здесь и дальше слово «Журнал» с прописной буквы означает «данный конкретный научный журнал».





**Рис. 1. Информационно-Поисковый Сборник Аннотаций (ИПСА):**

а) новый инструмент маркетинга, рекламы и продвижения научных журналов; б) новый товарный продукт на рынке научной информации; в) новое средство научных коммуникаций и распространения знаний



Теперь каждый подписчик и пользователь может загрузить ИПСА в компьютер, быстро просмотреть его и оценить, в какой мере Журнал отвечает его интересам. Кроме того, он может пользоваться ИПСА в своей профессиональной работе для быстрого поиска информации по интересующим его проблемам.

В статье рассматриваются выгоды, которые дают ИПСА подписчикам (предприятиям, организациям), конечным пользователям (ученым, инженерам, экономистам и др.), библиотекам, авторам, издательствам и редакциям, дистрибьюторам и рекламным агентам; рассматриваются вопросы о потребительской ценности Журнала и о том, почему идею ИПСА предлагается реализовать в виде самостоятельного электронного продукта, а не на сайте Журнала в Интернет; в заключение предлагается создавать мульти-ИПСА на CD-ROM, которые могут быть полезны различным категориям “работников знания” (“knowledge workers”<sup>3</sup>) для расширения кругозора и в качестве источника инновационных идей.

## 1. АРХИТЕКТУРА ИПСА

Информационно-поисковый сборник аннотаций осуществляется в специальном цифровом формате и содержится (рис. 1):

- массив аннотаций статей, опубликованных в Журнале за годы издания;
- поисковую программу, позволяющую пользователю мгновенно узнать — публиковались ли в Журнале и в каких выпусках статьи, посвященные интересующим его вопросам;
- приложения, увеличивающие рекламную и потребительскую ценность Журнала.

Он может тиражироваться на оптических (CD, DVD) дисках<sup>4</sup> и публиковаться на серверах Интернет, откуда его могут скачивать, на тех или иных условиях, заинтересованные лица.

Он может распространяться бесплатно в интересах маркетинга Журнала и (или) продаваться как информационный продукт, имеющий собственную товарную ценность (см. дальше).

<sup>3</sup> *knowledge workers (KW)* — новая социальная группа в постиндустриальных странах, для обозначения которой в русском языке еще нет общепринятого названия. Численность KW составляет более 70 % в совокупной рабочей силе США, в то время как численность фабрично-производственного персонала снизилась до 12 % [2].

<sup>4</sup> Компьютер сегодня есть почти у каждого, в то время как далеко не каждый имеет на своем рабочем месте прямой и надежный доступ в Интернет.

## 2. ЧТО ДАЕТ ИПСА

### 2.1. Выгоды для конечного пользователя

Конечному пользователю ИПСА (исследователю, конструктору технологу, экономисту, преподавателю, студенту и др.) не нужно больше тратить рабочее (или свободное!) время на посещение библиотек, поиск в каталоге, оформление заказа и просмотр полученных номеров (далеко не всегда полного комплекта) Журнала.

Достаточно включить компьютер, запустить файл ИПСА, просмотреть его по быстродействующим гипертекстовым связям или задать ключевые слова, чтобы практически мгновенно найти статьи по интересующим пользователя вопросам. Экономится время и труд на поиск и получение информации о новых фактах, идеях и достижениях в предметной области Журнала; увеличивается вероятность того, что имеющаяся в Журнале полезная информация не останется незамеченной.

Информационно-поисковый сборник аннотаций позволяет распечатывать названия и аннотации статей. Это удобно для литературной работы и для заказа нужных номеров журнала. Если библиотека, обслуживающая конечного пользователя, не получает данный журнал, то заказ можно отправить по межбиблиотечному абонементу или обратиться в редакцию журнала с просьбой выслать нужные номера или копии статей. Для этого в ИПСА предусматривается необходимый сервис: пользователь может вызвать программу электронной почты, вставить в окно сообщения названия статей и отправить заказ по предустановленному адресу редакции.

Такая услуга может быть платной или бесплатной (в интересах продвижения Журнала в целевой аудитории).

### 2.2. Выгоды для библиотеки

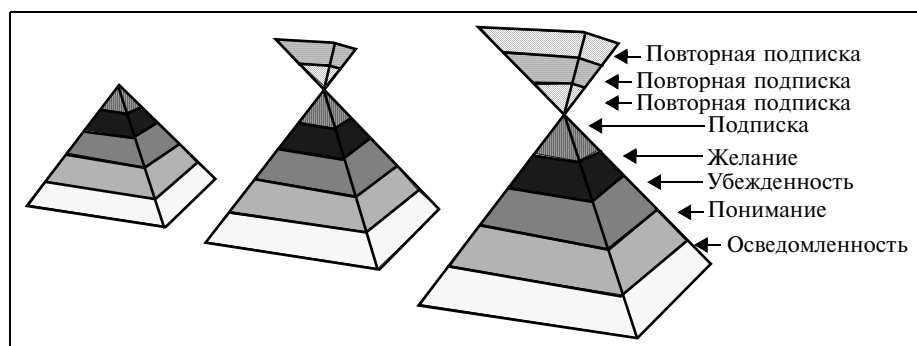
Библиотеке, ориентированной на инновации, приобретение ИПСА на CD-ROM (в нескольких экземплярах) позволяет:

- улучшить обслуживание абонентов, в том числе путем лучшего использования межбиблиотечного абонемента;
- оптимизировать использование бюджета;
- улучшить сохранность журналов;
- сократить расходы труда и времени на эксплуатацию журналов.

### 2.3. Выгоды для Подписчика (предприятия, организации)

Повышается квалификация и кругозор персонала, интенсифицируется инновационная деятельность.

Известно, что большинство сотрудников не выписывают профессиональные журналы, не посещают биб-



**Рис. 2.** По мере распространения рекламы и по мере увеличения числа подписчиков, подписывающихся один или несколько раз, первоначальная пирамида приобретает новые уровни, пристраиваемые сверху

лиотеки и не следят за научными и техническими достижениями, публикуемыми в научных журналах. Это противоречит интересам жизнедеятельности в условиях рыночной экономики.

Небольшая стоимость ИПСА позволяет предприятиям и организациям приобретать их в большом количестве экземпляров, способствуя, тем самым, распространению и использованию передовых знаний, публикуемых в НЖ [3, 4].

Увеличивается эффективность использования фонда рабочего времени: однократное посещение библиотеки одним сотрудником обходится предприятию (организации) дороже, чем приобретение одного экземпляра ИПСА, которым можно пользоваться многократно.

#### 2.4. Выгоды для авторов

Каждый автор заинтересован в том, чтобы его статьи привлекали внимание возможно более широкого круга лиц. От этого зависит не только его академическая карьера<sup>5</sup>, но и вероятность получения грантов и венчурных инвестиций.

Статью данного автора читатели Журнала видят только, когда они просматривают свежий номер. После того, как этот номер поступает на библиотечную полку для хранения, вероятность того, что данная статья попадет на глаза сколько-нибудь значительному числу лиц, которых она могла бы заинтересовать, приближается к нулю.

В отличие от этого, она будет постоянно попадаться на глаза каждому пользователю ИПСА, просматривающему раздел, в котором содержатся аннотации всех статей данной тематики за все годы издания Журнала.

#### 2.5. Выгоды для Издателя и Редакционной коллегии

Широкое распространение ИПСА в виде CD-ROM и через Интернет (для чего могут быть предприняты специальные меры) способствует росту известности Журнала. Известность привлекает и подписчиков, и авторов. Чем больше статей поступает в Редакцию, тем больше возможностей выбора рукописей из поступающего потока имеет Редакционная коллегия. Возникает сумма взаимосвязанных эффектов: возрастает потребительская ценность, авторитетность и брэнд Журнала, увеличиваются число подписчиков, прибыльность и индекс цити-

рования публикуемых в нем статей. Последнее особенно важно для каждого автора, знающего, что от цитируемости публикаций зависят его научный рейтинг и материальное положение.

Что касается брэнда, то для Издателя этот показатель не менее, а более важный, чем текущая подписка. Парадоксально, но в сегодняшнем мире стоимость брэнда (нематериального актива) может значительно превосходить стоимость всех материальных активов компаний<sup>6</sup>.

#### 2.6. Выгоды для дистрибьюторов и рекламных агентов

На рис. 2 показана так называемая рекламная пирамида. Задача, которую приходится решать дистрибьюторам и рекламным агентам, состоит в том, чтобы *осведомить* возможно большее число потенциальных подписчиков о существовании Журнала (они могут об этом и не знать); *добиться понимания* (потребительской ценности Журнала); *убедить*, что Журнал стоит денег, которые нужно потратить на подписку; вызвать *желание* подписаться и добиться *действия* — оформления подписки.

Далее показаны выгоды применения ИПСА в комплексе маркетинговых коммуникаций.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ

#### 3.1. Потребительская ценность

Основной закон маркетинга можно сформулировать так: люди покупают только две вещи в мире — решения своих проблем и приятные ощущения [6].

Автор широко известного труда по теории маркетинга [7] пишет: «Продавцы часто путают потребности с нуждами. Производитель буровых коронок может считать, что потребителю нужна его коронка, в то время как потребителю на самом деле нужна скважина. При появлении другого товара, который сможет пробурить скважину лучше и дешевле, у клиента появится новая потребность (в товаре — новинке), хотя нужда и останется прежней — скважина».

Перефразируя, можно сказать: Издатель и Редакционная коллегия научного журнала могут считать, что подписчикам нужен Журнал, в то время как подписчикам на самом деле нужен источник информация о том,

<sup>5</sup> Более 30 лет тому назад Ю. Гарфилд установил явную корреляцию между цитируемостью работ автора и такими формами признания научных заслуг, как присуждение почетных премий, включая Нобелевскую [5].

<sup>6</sup> По данным на июль 2003 г. стоимость брэнда Microsoft оценивается в \$65 млрд., в то время как все, что можно оценить стандартными методами, — финансовые ресурсы, кредиты, вся инфраструктура, включая мебель в офисе, — составляет \$14 млрд. [[http://www.internet-business.ru/articles/personal\\_brand.htm](http://www.internet-business.ru/articles/personal_brand.htm)].



Применение ИПСА	Выгоды
Реклама	Позволяет при минимальных затратах осведомить, проинформировать и убедить предельно широкую целевую аудиторию. Максимизирует эффективность рекламной кампании по критерию количество новых подписчиков/затраты
Продвижение	Минимизирует затраты на рекламно-оформительские материалы для экспозиций, демонстраций, выставок, профессиональных встреч и может содержать ценные “подарки”-бонусы
Пропаганда	Позволяет построить систему “вирусного маркетинга” и распространения бесплатных образцов
Личная коммуникация	ИПСА на CD-ROM позволяет использовать силу прямого личного воздействия на лиц, принимающих решения*

\*Хороший охотник целится в птицу, а не в стаю птиц” (амер. пословица).

как решать их текущие и предвидимые проблемы. При появлении другого источника (например, ИПСА), который поможет найти нужную информацию *быстрее и дешевле*, у клиента появится новая потребность (в товаре — новинке), хотя нужда и остается прежней — информация, способствующая решению актуальных проблем.

Таким образом, можно сказать, что *потребительская ценность Журнала* для каждого подписчика определяется числом адекватных его интересам публикуемых статей, и тем, как быстро он может их обнаружить.

Журнал, агрегированный с ИПСА (дешевым и удобным поисковым инструментом) приобретает дополнительную потребительскую ценность и позиционируется как новый продукт на целевом рынке.

Подписка на журнал будет тем больше, чем больше людей узнают и будут убеждены, что, подписавшись на Журнал, они будут получать оперативную и ретроспективную информацию, которая может оказаться ценной для решения имеющихся или возникающих у них проблем.

### 3.2. ИПСА на CD-ROM и Веб-сайт журнала

Некоторые журналы публикуют на своих Интернет-сайтах содержания журналов и аннотации опубликованных статей, предусматривают возможности поиска по сайту и электронной подписки на журнал.

Нужен ли таким журналам ИПСА на CD-ROM?

Для ответа на этот вопрос следует принять во внимание следующие обстоятельства.

- Компьютер сегодня есть почти у всех, но отнюдь не каждый, особенно за пределами больших городов, имеет прямой и надежный доступ в Интернет.
- В одной из последних книг по Интернет-маркетингу [8] находим: “Выложить информацию на Web-сайт вовсе не означает, что ее увидят. Если Вы бросите свою визитную карточку на тротуаре в центре Нью-Йорка, информация на этой карточке мгновенно станет потенциально доступной сотням и тысячам людей, которые ежедневно ходят по этому тротуару. Но шанс, что кто-то из них Вам позвонит, исчезающе мал. Поэтому к заявлениям энтузиастов Web-маркетинга следует относиться с долей здорового скепсиса. Вероятность того, что нужный вам пользователь наткнется именно на ваш маленький сайт, оказывается поразительно малой. Web-сайт редко порождает аудиторию сам по себе. Ни один пользователь не увидит маркетингового послания, воплощенного на вашем Веб-сайте, если Вы сначала не при-

ведете его туда. Вам придется тратить маркетинговые средства и другие ресурсы, чтобы получить трафик, необходимый для успеха Веб-сайта”.

- В отличие от этого ИПСА на CD-ROM может рассылаться на имя руководителя предприятия или организации с сопроводительным письмом, подписанным главным редактором Журнала. Такая “посылка” не останется незамеченной.
- Руководители привыкли “реагировать”. Каждый из них передаст компакт-диск своим сотрудникам. Получив поручение от начальства, сотрудник отнесется к ИПСА внимательно, увидит, что Журнал — это “не кот в мешке”, а полезный источник информации и, в большом числе случаев, доложит о том, что на Журнал стоит подписаться. Разумеется, так отреагируют не все, но многие<sup>7</sup>.

### 3.3. О мульти-ИПСА

На одном оптическом (CD, DVD) диске могут быть записаны аннотации десятков журналов за несколько лет издания, что превращает такой диск в многоаспектный мульти-ИПСА — новый, мощный ресурс оперативной информационной поддержки процессов приобретения и использования знаний всеми, так или иначе причастными к целевой аудитории журнала (см. сноску 3 во Введении).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Информационно-поисковый сборник аннотаций (ИПСА) — это дешевый, компактный и быстродействующий источник информации о новых фактах, идеях, достижениях и предложениях ученых и практиков, работающих в предметной области журнала; и, одновременно с этим, новый маркетинговый инструмент для продвижения Журнала и новый источник получения прибыли за счет использования его в качестве новой рекламной площадки для рекламодателей, заинтересованных в продвижении своих товаров и услуг в целевой аудитории Журнала.

<sup>7</sup> Вот что по схожему поводу говорит председатель совета директоров ОАО “Мультиплаз” А. Мелентьев: “Если бы ко мне пришел человек и показал, что можно подписаться на полезные для моего бизнеса журналы, я сделал бы это, не задумываясь о цене” [resume-bank.ru/content/articles/article535.html].

Если Издатель и Редакционная коллегия считают, что Журнал имеет меньше подписчиков, чем он того заслуживает, то это может означать только одно: потенциальная целевая аудитория недостаточно осведомлена или не убеждена в пользе, которую можно получить, подписавшись на Журнал. Это может быть как следствием недостаточного финансирования рекламных и маркетинговых мероприятий, так и просчетов в проведении маркетинговых коммуникаций. В любом случае ИПСА может оказаться полезным.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Odlyzko A.* Tragic loss or good riddance? The impeding demise of traditional scholarly journals // AT&T Labs — Research. <http://www.research.att.com/~amo>

2. *Новая* постиндустриальная волна на Западе / Под ред. В. Л. Иноземцева. — М.: Academia, 1999.
3. *Эпштейн В. Л.* Антропоцентрическое информационное взаимодействие (вопросы терминологии) // Проблемы управления. — 2003. — № 1. — С. 28—33. <http://www.ipu.ru/period/pu>
4. *Эпштейн В. Л.* Предвидимое будущее научных журналов // Там же. — № 1. — С. 2 — 15. <http://www.ipu.ru/period/pu>
5. *Маркусова В. А.* Импакт-фактор российских журналов. <http://www.ng.ru/science>
6. *Рысев Н.* Как завоевать клиента. — СПб.: Питер, 2003.
7. *Котлер Ф.* Основы маркетинга. — М.: Прогресс, 1991.
8. *Кеглер Т., Доулинг П., Тейлор Б., Тестерман Д.* Реклама и маркетинг в Интернете. — М.: Альпина Паблишер, 2003.

☎ (095) 334-89-80

E-mail: [epstein@ipu.rssi.ru](mailto:epstein@ipu.rssi.ru)



УДК 334.7:62-529

# ЭЛЕКТРОННАЯ ПЛОЩАДКА — ЭФФЕКТИВНОЕ СРЕДСТВО РАЗВИТИЯ МЕЖОТРАСЛЕВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ХОЗЯЙСТВУЮЩИХ СУБЪЕКТОВ В РОССИИ

А. А. Ищенко

*Российская академия предпринимательства, г. Москва*

Рассмотрены перспективы межотраслевого взаимодействия хозяйствующих субъектов в России. Выделена как объект исследования электронная межотраслевая площадка. Описаны схема организации такого взаимодействия и основные его участники. Отмечены сложности, препятствующие расширению межотраслевого взаимодействия хозяйствующих субъектов в российских условиях.

Перспективы развития межотраслевого взаимодействия хозяйствующих субъектов в России главным образом связаны с возможностью дальнейшего улучшения макроэкономической ситуации в стране [1, 2]. По прогнозу исследовательской компании “Jupiter” (США), общий объём продаж в рамках межотраслевого взаимодействия к 2005 г. в мире составит 6 трлн. долл. США, причем организация значительной его части предполагает применение Интернет-технологий [3]. Процесс интеграции деятельности различных предприятий с применением Интернет занимает все большее место [4]. Эти тенденции охватывают методы закупок, продаж и дистрибуции продукции компании, а вслед за этим — способы взаимодействия между компаниями. В частности, особенно сильно модернизируются способы взаимодей-

ствия с существующими и потенциальными поставщиками, и способы приобретения необходимых товаров и услуг. Специфические особенности Интернет-технологий [2] предоставляют компаниям возможность перейти от фиксированного ценообразования к динамической модели ценообразования. Это позволяет компаниям-покупателям значительно снизить издержки на покупку, уменьшить уровень запасов на складе и обеспечить своевременную доставку продукции.

Понимание руководителями компаний происходящих изменений привело к возникновению многочисленных проектов межотраслевого взаимодействия в форме межотраслевых электронных площадок, которые обеспечивают деловое взаимодействие продавцов и покупателей товаров с помощью информационных Интер-

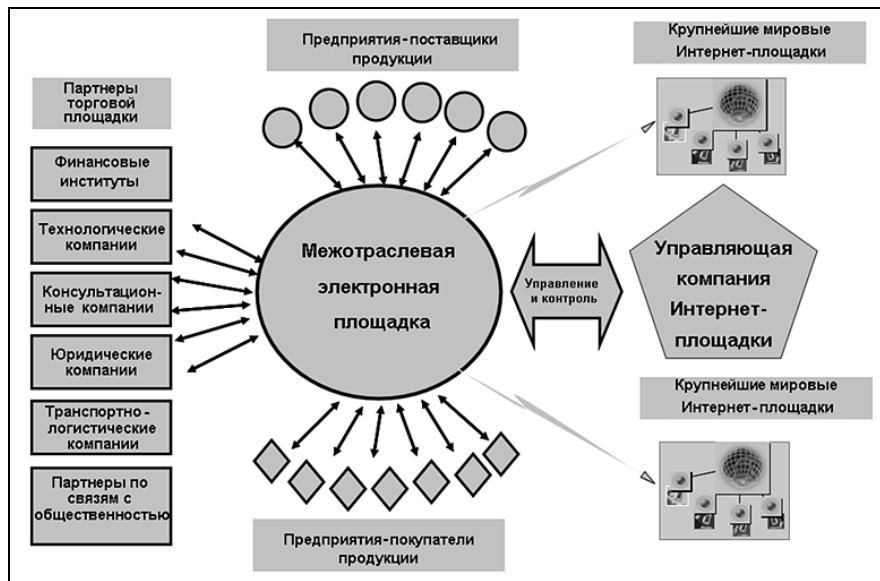


Рис. 1. Принципиальная организационная схема проекта создания межотраслевой электронной площадки

нет-технологий в одном рыночном пространстве и позволяют им покупать друг у друга или продавать друг другу по динамически изменяемым во времени ценам, определяемым рыночными механизмами [5]. О перспективах создания такого рода межотраслевого взаимодействия и будет идти дальше речь. Для более четкого понимания сложности подготовки и реализации подобного межотраслевого взаимодействия хозяйствующих субъектов выделим далее в качестве самостоятельного объекта исследования проект создания межотраслевой электронной площадки.

Проект создания межотраслевой электронной площадки предусматривает комплекс мероприятий и управленческих решений, изменяющих состояние отдельной системы и позволяющих достичь поставленные цели в условиях регулирования всей гаммы отношений, с учетом специфики законодательной базы в области российской электронной коммерции (рис. 1).

Площадка как организационно-технологическое решение представляет собой интернетовский сайт-портал [6], в совокупности своей организованный как системное многоуровневое объединение различных ресурсов и сервисов, имеющих определенный набор документов, представленных в электронной форме и расположенный по определенному электронному адресу на определенном компьютере, подключенном к Интернету и принадлежащем юридическому лицу. Образно портал еще можно представить в виде электронной библиотеки, организованной по иерархическому принципу и разделенной на различные тематические разделы, включающие в себя количественные и качественные данные, анализы, графики и др. Ключевым является тот факт, что все ресурсы портала обновляются в режиме реального времени, где электронные представители продавцов и покупателей также взаимодействуют друг с другом в реальном времени. Основные функции современных порталов — это упрощение поиска данных, общение, новости и межотраслевая деятельность. Коммерческая привлекательность межотраслевых площадок состоит в том, что они позво-

ляют максимально приблизить бизнес к клиентам, партнерам и поставщикам, обеспечить пользователям персонализацию, многоуровневую интеграцию информационной сущности компании и возможность устанавливать отношения внутри рабочих, информационных и продуктовых групп. По мнению многих аналитиков коммерческих [7, 8] и государственных структур такие порталы станут стандартным интерфейсом для новых приложений и услуг электронного бизнеса.

Рассмотрим основные особенности межотраслевого взаимодействия хозяйствующих субъектов.

*Заданная цель.* Учредители площадки могут ориентироваться на две принципиально разные цели. Специфика этих целей заключается в том, что одни направлены на повышение прибыльности и вывод акций предприятия на финансовые рынки как вновь созданной компании, а другие — на уменьшение расходов своих закупочных процессов существующего предприятия-покупателя. Упрощая, можно сказать, что в обоих случаях и те, и другие хотят иметь прибыльный бизнес, только одни делают это за счет экономии издержек, а другие — за счет увеличения доходов от предоставления различных услуг.

*Организационно-правовая форма управления.* Основой для разработки и реализации проекта является учреждение отдельного юридического лица в виде Управляющей компании межотраслевой электронной площадки, которая управляет полным жизненным циклом проекта с момента возникновения идеи такого проекта, сопровождая его на пилотных проектах, проверяющих работу и основную функциональность площадки, и до момента завершения полномасштабного внедрения всего спектра функций площадки. Впоследствии Управляющая компания фокусируется на развитии функциональности площадки, предоставлении новых услуг существующим клиентам, поиске и привлечении новых участников межотраслевой деятельности площадки.

*Число участников проекта.* Проекты создания такого рода площадок отличаются большим числом участников, которое динамически изменяется на каждой фазе



Рис. 2. Основные участники межотраслевой электронной площадки

жизненного цикла площадки. Общее планирование, координация и управление работами участников осуществляет Управляющая компания площадки.

**Организация схемы финансирования проекта.** Значительная финансовая емкость проекта и наличие большого числа участников проекта создания межотраслевой электронной площадки предусматривают наличие расширенных функций Управляющей компании в области организации схемы многоканального проектного финансирования, реализация которых обеспечит поток необходимых и достаточных инвестиций и доходов от работы площадки, которые позволят совершенствовать технологию реализации финансовых отношений между всеми участниками проекта.

**Продолжительность проекта.** Жизненный цикл проекта разбивается на следующие составляющие — реализация пилотного проекта со стандартной функциональностью площадки в течение 7...12 мес., реализация полномасштабного внедрения в течение 12...24 мес. после окончания пилотного проекта и эксплуатация.

Понимание перечисленных особенностей проектов создания торгово-закупочных площадок находит свое выражение в построении системы управления подобными проектами и критически важно для успешной реализации в российских условиях.

Управление таким межотраслевым взаимодействием представляет собой сложную систему [9], которую следует рассматривать как совокупность элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, образующих целостное состояние проекта, который постоянно подвержен разнообразным воздействиям как внутренней, так и внешней среды. Другими словами, система управления проектом создания межотраслевой электронной площадки представляет собой комбинацию различных звеньев, связанных между собой по функциям, полномочиям и ответственности.

Управление системой разработки и реализации межотраслевого взаимодействия как проекта создаваемого в

виде нового юридического лица в рамках Управляющей компании представляет собой единство управленческих задач, решаемых человеческими ресурсами, организации, техники и средств, направленных на достижение равновесного состояния проекта как системы.

Всех участников межотраслевого взаимодействия можно разбить на три группы (рис. 2) — учредители и менеджмент площадки, партнеры площадки, клиенты (поставщики и покупатели) площадки.

Учредителями площадки являются юридические или физические лица, которые создают новое юридическое лицо в форме Управляющей компании и вносят необходимые средства в различных формах в ее уставной капитал в соответствии с их совместной договоренностью. Управляющая компания — основной контролирующий орган площадки — получает доход от различных видов услуг, предоставляемых на межотраслевой электронной площадке, и несет полную ответственность за ее работоспособность. Зачастую учредители площадки классифицируются в зависимости от той модели работы площадки, которая будет там существовать. Им приходится выбирать одну из двух целей — площадка служит как новый бизнес для:

- зарабатывания денег;
- экономии денег на различных этапах закупки товара для предприятия.

Партнеры площадки (юридические лица) предлагают с согласия учредителей ее клиентам определенный, достаточно востребованный клиентами спектр товаров и услуг. Ниже приводится перечень возможных типов партнеров площадки, которые могут привлекаться на различных этапах развития площадки, а именно:

- индустриальные (отраслевые) партнеры;
- инвестиционные партнеры;
- финансовые партнеры;
- страховые компании;
- консультационные партнеры;
- транспортно-логистические компании;
- компании по предоставлению услуг безопасности;
- технологические партнеры;
- партнеры по связям с общественностью.

Отметим, что на Западе часто выделяют стратегических партнеров. С ними заключаются долгосрочные договоры о сотрудничестве, они являются уже основной опорой в предлагаемой области сотрудничества.

Кратко охарактеризуем основные типы партнеров межотраслевой электронной площадки.

**Индустриальные (отраслевые) партнеры** — представляют собой крупное промышленное предприятие, которое осуществляет на постоянной основе закупки материально-технических ресурсов (МТР) для производства своей продукции. Основная роль данного партнера сводится к потреблению предлагаемых на площадке товаров и услуг.

**Финансовые партнеры** — оказывают клиентам площадки полный спектр финансовых услуг, включая расчетно-кассовое обслуживание клиентов, организацию депонентов для гарантии оплаты сделки между ее участниками, доверительное управление собственностью, исполнение согласованных обязательств сторон и др.

**Страховая компания** — предоставляет услуги по страхованию сделок на площадке, включая и страхование товаров в пути, купленных на площадке.



Консультационная компания — предоставляет различные услуги участникам площадки, включая разработку стратегии организации закупочной деятельности и снабжения на предприятии, услуги по оптимизации закупочных бизнес-процессов поставщиков и покупателей МТР и другие услуги.

Транспортно-логистические компании — консультируют по вопросам построения оптимальных логистических схем транспортировки и страхования грузоперевозок, управлению логистикой поставок, услуги по выбору наиболее выгодных для клиентов площадки маршрутов доставки МТР, а также осуществляют перевозку товаров, купленных на площадке. При этом перевозка охватывает оформление необходимых транспортных документов, выпуск подтверждающих оплату телеграмм и сообщений, слежение за перемещением товаров и другие транспортно-логистические и экспедиторские услуги.

*Технологические партнеры или сервис-партнеры* — предоставляют для юридических и физических лиц определенную услугу, базирующуюся на применении Интернет-технологий.

Различают следующие основные виды технологических партнеров:

- Интернет-провайдер — предоставляет в качестве основной услуги для других предприятий и физических лиц доступ по определенным каналам связи в Интернет;
- веб-агентство — обеспечивает дизайн, верстку и изготовление “под ключ” Интернет-сайтов, порталов, веб-представительств компаний и другие Интернет-и дизайнерские услуги;
- контент-провайдер — представляет различного рода информационные услуги (рассылку новостей, подготовку периодических аналитических отчетов о результатах анализа рынка и ситуации в отрасли, доступ к информационной базе данных, анонс появления на рынке новых продуктов и др.);
- агрегатор каталогов — обеспечивает приведение информации о продукции различных поставщиков и покупателей к единому стандарту с целью возможности сравнения предлагаемой продукции по различным критериям (цена, качество, специфические требования к структуре материалов и др.);
- системный интегратор — предоставляет весь спектр услуг по созданию, сопровождению и развитию информационно-технологической инфраструктуры предприятия, помогает клиентам площадки выбрать правильный программный продукт, скорректировать бизнес-процессы, составить план внедрения системы, внедрить систему и интегрировать ее в межотраслевую электронную площадку;
- поставщик программного продукта, использующего Интернет-технологии;
- поставщики платформенных решений — предлагают свои платформенные разработки для применения на площадке (например, очень популярны платформенные решения компаний SAP и “Microsoft”).

Клиенты площадки — юридические компании, которые осуществляют на ней межотраслевое взаимодействие и потребляют набор услуг, предоставляемый партнерами площадки. Всех клиентов межотраслевой электронной площадки можно условно разделить на продающих свой товар или поставщиков МТР и покупающих необходимый товар или потребителей МТР.

В настоящий момент на Западе эффективность программных решений для управления межотраслевым взаимодействием хозяйствующих субъектов достаточно низка. Это, прежде всего, связано с:

— ограниченной и часто неподтвержденной информацией о спросе на продукцию, о пожеланиях клиентов, что не способствует правильному прогнозированию спроса на продукцию; соответственно, отсутствует понимание необходимости производства востребованной рынком продукции;

— низким уровнем визуализации процессов, происходящих по всей длине цепочки поставок, что значительно затягивает процесс прохождения информации о поставке;

— отсутствием автоматизированного процесса обмена информацией между участниками цепочки поставок;

— долгим процессом выбора потенциальных клиентов.

Тенденции к созданию межотраслевого взаимодействия хозяйствующих субъектов были вызваны необходимостью повышения эффективности бизнеса. Несмотря на большое количество декларируемых проектов создания межотраслевых электронных площадок в России, число площадок, функционирующих и способных предложить покупателям и поставщикам реальную возможность заключения сделок по купле-продаже товаров и услуг посредством Интернета, сегодня крайне незначительно. Большая часть стартовавших в начале 2000-го года площадок лишь анонсируют свои функциональные возможности, связанные непосредственно с заключением сделок, ограничиваясь при этом информационно-справочными и посредническими услугами.

Одновременно с этим, несмотря на наличие на рынке достаточно большого количества площадок, подавляющее большинство возможных крупных участников не вовлечены в участие в работе площадок. Среди недостатков представленных на российском рынке площадок и бизнес-порталов можно отметить два основных момента — в подавляющем большинстве площадок применяются “облегченные” и слабо масштабируемые технологические решения, не учитывающие мировой опыт. Второй негативный момент состоит в отсутствии на таких площадках “крупных игроков”, способных гарантировать необходимые объемы операций.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Абалкин Л. И.* Россия-2015: оптимистический сценарий. — М.: Экономика, 1999.
2. *Балабанов И.* Электронная коммерция. — М.: Питер, 2001.
3. *Research report “Net Markets”.* — “Jupiter”, 2000.
4. *Львов Д. С.* Экономика развития. — М.: Экзамен, 2002.
5. *Кастельс М.* Информационная эпоха. Экономика, общество и культура. — М.: ГУ Высшая школа экономики, 2000.
6. *Bussler C.* B2B Integration. — Springer Verlag, 2003.
7. *Research report “Online and Onland”.* — “Arthur D. Little”, 2000.
8. *Research report “Selecting a Successful B2B Partner”.* — IDC, 2002.
9. *Бурков В. Н.* Большие системы. Моделирование организационных механизмов. — М.: Наука, 1989.

☎ (095) 796-45-94

E-mail: aischenko@mail.ru



## III Международная конференция “ИДЕНТИФИКАЦИЯ СИСТЕМ И ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ”

*Профессия ученого обладает одной завораживающей особенностью — возможностью незримого присутствия мыслью, идеями в представлениях и рассуждениях будущих ученых. Чаще всего это происходит в форме внутреннего собеседника, коллеги, достойного уважения и подражания в определенных аспектах своей творческой деятельности.*

*У каждого достойного ученого есть нечто, воспринимаемое на бессознательном уровне, но ощущаемое и переживаемое как реальность в определенных проблемных ситуациях. Это нечто — дух творческой личности, концентрированное мышление, простирающееся сквозь традиционную форму научных произведений.*

*Все достойное не забудется, останется в памяти и мышлении науки, неизбежно отразится в человеческой культуре. Интеллектуальное движение — трудный процесс; нам постоянно приходится искать опору, основание для своих идей в прошлой и настоящей деятельности науки; мы неизменно возвращаемся к истокам, которые богаче мыслью, оттенками, чем их дальнейшее развитие. Современная наука развивается объединенными усилиями настоящих и прошлых поколений ученых, и так будет всегда.*

*Подобными утешениями можно только приглушить боль от утраты реального общения с покинувшими нас учителями, друзьями, коллегами. Особенно невыразимо жаль рано ушедших талантливых ученых, к числу которых, несомненно, принадлежали члены программного комитета SICPRO д-ра физ.-мат. наук Николай Антонович Бобылёв и Евгений Георгиевич Сухов.*

*Светлая им память.*

### ВВЕДЕНИЕ

В Российской академии наук теоретические основы идентификации традиционно развиваются научным направлением “Идентификация систем”, в создании которого активное участие принимали научные школы академика Я.З. Цыпкина и профессора Н.С. Райбмана. В научно-организационном плане лидирующая роль в создании, развитии и поддержке данного направления принадлежит Институту проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. За время рыночных реформ кадровое обеспечение научного направления “Идентификация систем” существенно изменилось по возрастному составу и уменьшилось численно. Отсутствие необходимых кадров уже не позволяет проводить фундаментальные исследования по многим актуальным темам идентификации. В этих условиях особенно важна координация и синхронизация научных исследований, а также правильный выбор направлений “главного прорыва” в разработке средств идентификации. Координацию и синхронизацию научных исследований трудно осуществить без определенного административного воздействия. Максимум, что можно сделать при отсутствии подобного ресурса, — это организовать международную конференцию по проблемам идентификации с активным воздействием на научную среду с помощью обзора наиболее важных событий и тем конференции, опубликованном в престижном научном журнале. Данная цель была реализована при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) организацией конференций “Идентификация систем и задачи управления” — SICPRO (System Identification and Control Problems).

Главная цель конференций SICPRO — создание теоретических предпосылок объединения различных научных направлений РАН для разработки наукоемких ме-

тодологий поиска решений актуальных практических задач. Предложение в первую очередь сконцентрировать интеллектуальные человеческие и глобальные сетевые ресурсы на создании методологий поиска решений практических задач не означает, что в рамках конференций SICPRO развитию фундаментальных основ придается второстепенное значение. В современных условиях разработка конкурентоспособных в рыночной среде наукоемких методологий мирового уровня всегда связана с развитием фундаментальных основ науки.

III Международная конференция “Идентификация систем и задачи управления” SICPRO’04 состоялась 28—30 января 2004 г. в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. В организации SICPRO’04 участвовали Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Российский Национальный комитет по автоматическому управлению, РФФИ (проект РФФИ 04-01-10017), Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН. В Программу конференции были включены четыре пленарных и 158 секционных докладов. Полные тексты всех докладов опубликованы в Трудах конференции, изданных на компакт-диске (ISBN 5-201-14966-9) объемом 2232 с. тиражом 1000 экз. Отдельно изданы Сборник пленарных докладов (ISBN 5-201-14965-2) объемом 128 с. тиражом 250 экз. и Программа конференции с аннотациями докладов объемом 124 с. тиражом 250 экз. Проведены три пленарных и 18 секционных заседаний, на которых представлены и обсуждены 136 докладов.

Основные темы конференции:

- общие проблемы системных методологий;
- структурная и параметрическая идентификации;
- непараметрическая идентификация;
- математические проблемы теории управления;
- идентификация медико-биологических систем;
- идентификация и управление организационными системами;





- построение и исследование систем;
- промышленные и аэрокосмические приложения;

Все сказанное означает, что идея создания новой постоянно действующей конференции оказалась состоятельной как организационное мероприятие, имеющее значительный отклик в научной среде. Такие конференции стали ежегодными. Проведение IV Международной конференции “Идентификация систем и задачи управления” SICPRO’05 намечено на 25—28 января 2005 г.

В настоящем кратком сообщении ограничимся рассмотрением только пленарных докладов.

### ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

В исследовании *Б.Т. Поляка и П.С. Щербакова* (Москва) “Возможные подходы к решению трудных задач линейной теории управления” рассмотрены некоторые традиционные задачи стабилизации систем и оптимального управления, относящиеся как к классической теории линейных систем, так и к ее робастному обобщению. Показано, что если изменить математические формулировки стандартных задач так, чтобы отразить инженерные требования к сложности реальных регуляторов, то полученные в результате неклассические задачи являются трудными с математической точки зрения. Более того, как утверждают докладчики, для неклассических задач неизвестны эффективные методы отыскания решения. Эффективным называется такой способ поиска решения, который «гарантированно приводит к точному решению (если оно существует) за “разумное” время».

Обратим внимание на следующий факт. Кардинальная перемена сложности задачи произошла из-за того, что в ее математической формулировке появилось требование синтезировать регулятор заданного типа (по терминологии докладчиков, заданной структуры), или, иными словами, отыскать решение в заданном семействе регуляторов. Какова же будет сложность неклассических задач, если при их создании мы попытаемся учесть значительную часть инженерных требований к качеству реальных систем управления? Например, вместо квадратичного показателя качества возьмем характеристики, сформулированные непосредственно “в терминах простых свойств желаемой системы, таких как перерегулирование, время установления, степень устойчивости, колебательность процесса и т. д. ”. Нужно ли стремиться к такой степени адекватности между математической и практической задачей, если эффективные методы решения неклассических задач, как правило, отсутствуют и вряд ли могут быть сконструированы? Методологические исследования, основанные на анализе всего жизненного цикла реальных систем, должны формировать возможные ответы на подобные вопросы; создавать представление о цели для фундаментальных математических исследований в области теории управления.

Анализируя неклассические задачи, докладчики приходят к выводу, что их полное математическое исследование возможно в рамках 12 трудных задач линейной теории управления, которые они именуют Проблемами. Задачи называются трудными “в том смысле, что эффективных способов их решения нет и быть не может”; основными препятствиями на пути создания подобных методов считаются невыпуклость и *NP*-сложность. Значительная часть доклада посвящена обсуждению различных методов, которые могут быть задействованы в

процессе поиска решения Проблем. Предлагаемые и анализируемые методы “либо исходят из достаточных условий, либо имеют численную природу; так или иначе, решение не может быть гарантировано, даже если оно и существует; или же получаемое решение далеко от оптимального...”. Возможные подходы к решению Проблем разделены на четыре группы. В первую входят методы *D*-разбиения, во вторую — методы, основанные на построении квадратичной функции Ляпунова для системы или общей квадратичной функции Ляпунова для семейства систем; в третью — методы, опирающиеся на понятие сверхустойчивости; в четвертую — численные методы. Утверждается, что “идеи, заложенные в предлагаемых методах, и техника получения результатов плодотворны для широкого круга задач, и на практике эти методы ведут себя вполне удовлетворительно...”

В чем роль серьезных математических исследований в рамках теории автоматического управления? По-видимому, их основное назначение в:

- исследовании математического базиса инженерных методов и технологий;
- выявлении математических проблем и основных направлений совершенствования математических основ дисциплины;
- разработке математического аппарата, позволяющего создавать более эффективные, чем существующие, инженерные методы и технологии.

Образно говоря, математические методы являются своего рода “заготовками” для создания инженерных методов. При этом, чем меньше интеллектуальных усилий требуется для переработки теоретических методов в инженерные, тем шире область их практического применения. Поэтому так трудоемки математические исследования в рамках теории автоматического управления, что они, с одной стороны, должны соответствовать стандартам математики, с другой — быть хорошей основой для изготовления инженерных методов. Представляется, что доклад Б.Т. Поляка и П.С. Щербакова обладает всеми перечисленными свойствами: содержит математические формулировки фундаментальных проблем, предлагает и анализирует практически все математические подходы к решению сформулированных проблем, подводит к осознанию новых направлений развития теории автоматического управления.

В пленарном докладе *В. Н. Букова, В. Н. Рябченко и В. В. Косьянчука* (Москва) “Основы технологии вложения систем” утверждается, что:

- технология вложения систем возникла как следствие применения современных результатов алгебры матричных частных в задачах анализа и синтеза многосвязных динамических систем; полученные на основе этой технологии результаты безукоризненны в математическом отношении;
- проблема, с которой помогает бороться технология вложения систем, заключается в том, что матричное уравнение модели системы, полученное из физических или других принципов функционирования системы, зачастую относится к плохо изученному в математике типу уравнений;
- технология вложения систем позволяет эквивалентно преобразовать записанную в произвольной форме систему матричных уравнений решаемой задачи в некоторую универсальную форму, содержащую толь-

ко линейные и (или) билинейные матричные уравнения.

Технология вложения систем состоит из трех этапов:

- на первом этапе из исходных матричных уравнений, составляющих модель исследуемой системы, конструируется проматрица (проблемная матрица) решаемой задачи;
- на втором этапе формируется тождество вложения, которое формализует цели задачи;
- на третьем этапе осуществляется разрешение тождества вложения посредством перехода к линейным или билинейным матричным уравнениям, осуществляемого путем выполнения факторизации — разложения определенного вида всех четырех матриц, входящих в тождество вложения.

Для эффективного решения линейных и билинейных уравнений разработана специальная процедура, названная методом канонизации. Изложенный авторами подход к решению задач синтеза систем несомненно (по новизне и универсальности метода) является новым научным направлением в теории линейных динамических систем.

По-видимому, существует определенная закономерность в чередовании этапов человеческой деятельности по разрешению проблем управления. Здесь и далее слово “проблема” понимается в первоначальном греческом смысле, т. е. как трудность, преграда. Проблема управления (т. е. трудность, затруднение в управлении) на уровне практики обычно состоит в том, что технологи не знают, как создать систему управления, обладающую желательными свойствами. На уровне теории это затруднение традиционно отражается в трудностях придумывания параметрических математических задач, решение которых облегчает создание желательных систем; термин “параметр” здесь понимается в широком смысле.

Сначала проблема осознается на уровне практики. Затем специалисты по теории управления создают первые постановки практических задач, в рамках которых возникает указанная проблема. Если проблема актуальна для теории и практики управления, постепенно возникает теория, например, теория линейных динамических систем, состоящая из большого числа изолированных задач и методов их решения. На третьем этапе кто-то из действующих ученых осознает, что можно разработать единый метод решения всех известных задач теории, если воспользоваться фундаментальными результатами определенного раздела математики, например современными результатами алгебры матричных частных. Результаты третьего этапа применительно к теории линейных динамических систем изложены в докладе В.Н. Букова, В.Н. Рябченко и В.В. Косьянчука. На четвертом этапе на основе разработанного метода создаются более эффективные инженерные технологии. Изобретение единого математического метода полезно еще и тем, что оно позволяет переключить внимание теоретиков на мало исследованные аспекты проблемы или на новые проблемы. Если проблема и на четвертом этапе продолжает оставаться актуальной для теории и практики управления, то на этом этапе могут возникнуть новые нетрадиционные математические задачи. То, что подобное возможно, показано на примере линейной теории управления в пленарном докладе Б.Т. Поляка и П.С. Щербакова.

*В. И. Уткин (США)* в своем пленарном докладе “Sliding mode control for automobile applications” рассказал о некоторых практических применениях теории управления на скользящих режимах, основы которой были заложены три с лишним десятилетия назад при его непосредственном участии. Объектами иллюстрации практических возможностей управления на скользящих режимах, ставшего уже классикой теории управления, выбраны различные узлы и агрегаты автомобиля.

После краткого напоминания теоретических основ разработок последовало подробное изложение прикладных задач, сопровождаемое богатым экспериментальным материалом. Применение скользящих режимов как мощного инструмента управления техническими системами продемонстрировано на пяти примерах:

- управление автомобильными генераторами трехфазного тока;
- контроль и управление соотношением “воздух — топливо” для двигателей внутреннего сгорания;
- управление содержанием оксидов азота в выхлопе дизельных двигателей;
- управление антиблокировочными тормозными системами;
- управление индукционными электродвигателями.

В каждой из задач математическая модель объекта управления, достаточно компактная и в то же время адекватная, увязывалась с общей схемой скользящего управления, и затем приводились подробные данные экспериментов на реальных объектах (в докладе речь шла о продукции компании “Ford”).

Роль человеческого фактора (в методологиях практического применения математического аппарата) существенно возрастает при переходе от решения задач проектирования реальных автоматических систем к поиску решения задач создания, реформирования и управления сложными социально-экономическими системами. В рамках процесса создания, реформирования и управления “человеконаполненными” системами экспертизы разного типа играют исключительно важную роль. Они могут применяться как средство для получения первичных данных, построения новых моделей, прогнозирования неизмеряемых характеристик, выбора основных вариантов управленческих действий. В пленарном докладе *А.А. Дорофеева (Москва)* “Экспертно-классификационные методы идентификации социально-экономических систем управления” предложен единый метод организации коллективных экспертиз, названный методологией коллективной многовариантной экспертизы. На содержательном уровне эта методология выражается с помощью пяти естественных принципов:

- экспертиза проводится в экспертных комиссиях, число которых не меньше числа различных точек зрения на исследуемую проблему;
- в одну и ту же комиссию включаются эксперты, имеющие близкие точки зрения на проблему (т. е. предмет) экспертизы;
- в каждой комиссии работают эксперты, не имеющие конфликтных взаимоотношений;
- для экспертизы отбираются условно компетентные эксперты;
- организация и проведение экспертизы, обработка экспертных оценок, формирование результатов экспертизы должны проводиться специальной консал-



тинговой группой, независимой и не заинтересованной в результатах экспертизы.

Однако реализация этих принципов потребовала создания системы взаимосвязанных формальных и неформальных методов формирования экспертных комиссий, организации сценариев их работы, классификационного (структурного) анализа данных, включающего в себя алгоритм многомерной автоматической классификации, алгоритм автоматического выбора начальных условий, человеко-машинную процедуру нахождения оптимального числа классов. Представляется, что содержащаяся в докладе А. А. Дорофеева методология является средством эффективной информационной поддержки руководящего персонала любого крупномасштабного инновационного проекта. В частности, она успешно применялась в таких сложных проектах, как развитие системы регионального здравоохранения, анализ и реформирование системы регионального пассажирского автотранспорта, совершенствование системы межбюджетных отношений федерального центра и бюджетов РФ, совершенствование налоговой политики и системы сбора налогов, совершенствование системы оплаты труда в бюджетной сфере, анализ и совершенствование системы управления ряда крупных предприятий и организаций.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Организация конференций по проблемам идентификации позволяет лишь частично скомпенсировать влияние факторов, обусловленных постоянным ухудшением кадрового обеспечения научного направления, принципиально не устраняет основную причину кризиса — крайне низкую оплату фундаментальных исследований, которая не стимулирует приток молодых специалистов в российскую науку, более того, способствует оттоку продуктивных ученых из данной сферы деятельности. Можно ли изменить ситуацию? Конечно, если признать, что базовое бюджетное финансирование и средства федерального бюджета, полученные от сдачи помещений в аренду, выделяются институтам РАН для финансирования фундаментальных исследований и условий, обеспечивающих их нормальное проведение. К числу этих условий относятся, по нашему мнению, не только традиционные компоненты (помещения, научное оборудование, административно-управленческий персонал), но и научно-практическая и чисто практическая инновационная деятельность сотрудников институтов РАН в рамках заключенных хозяйственных договоров. Данную деятельность предлагается поддерживать за счет средств федерального бюджета только путем предоставления помещений и научного оборудования. Выделение институтам РАН средств на предлагаемые ими фундаментальные темы должно, по-видимому, соответствовать (в определенном смысле) практике выделения средств под проекты, которой придерживается РФФИ. Последнее означает, что каждое отделение РАН должно включать в себя подразделение, в определенном смысле напоминающее РФФИ. Естественно, для институтов РАН должна быть выбрана более «мягкая» конкурсная система, чем у РФФИ. Необходимо также разрешить институтам РАН в плане официально утвержденных работ иметь не только фундаментальные, но и прикладные инновационные темы. Отличие прикладной темы от

фундаментальной, на наш взгляд, состоит в том, что фундаментальная тема финансируется РАН, а прикладная — из источников, которые обязан изыскать руководитель данной темы. В результате сотрудник института РАН может быть исполнителем фундаментальной или прикладной инновационной темы, исполнителем обеих тем, или даже исполнителем нескольких фундаментальных тем (научных проектов). Если сотрудник является участником нескольких фундаментальных тем, оплата его научной деятельности определяется поступлениями по каждому выполняемому проекту и может быть значительно больше, чем должностной оклад, который, по-видимому, следует рассматривать как минимальный размер оплаты деятельности в рамках одной фундаментальной темы. Возможность сотрудника академического института не быть занятым в выполнении работ по фундаментальной теме может быть обоснована необходимостью его участия в создании эталонных приложений фундаментальной науки.

Теория идентификации как научная дисциплина, в которой порождается и концентрируется рациональное знание о механизмах идентификации, прежде всего, технологических процессов, может в силу своей уникальной проблематики всегда рассматриваться в качестве базисного направления современной науки. Однако постоянный общественный интерес к любому направлению человеческой мысли определяется не только прошлыми заслугами и объявленными целями, но и содержанием текущих научных исследований: насколько хорошо в этих исследованиях отражаются актуальные проблемы и темы текущего периода развития науки и практики. И в этом отношении теория идентификации сталкивается с существенными трудностями. В первую очередь, как уже отмечалось, они обусловлены разрушением кадрового обеспечения научного направления в связи с недостаточным финансированием фундаментальных исследований. Вторая проблема, органично связанная с первой, вызвана быстрым развитием некоторых дисциплин, которые входят в фундаментальный базис теории идентификации, в частности математической теории систем, теории принятия решений, когнитивной психологии и методологии науки. Это развитие находит слабое выражение на теоретическом уровне направления ввиду крайне недостаточного для нормального развития научного направления количества молодых ученых, которым обычно свойственна особая чувствительность к осознанию и использованию нового знания.

Аналогичные трудности возникли, на наш взгляд, во многих научных направлениях Российской академии наук. Эти проблемы не могут быть разрешены разрозненными усилиями отдельных ученых; необходимы скоординированные коллективные действия всего научного сообщества по оптимизации своей структуры и деятельности. Историческая роль действующего сейчас поколения пятидесяти-шестидесятилетних ученых (элиты научных направлений), по-видимому, состоит в том, чтобы подготовить и осуществить адаптацию Российской академии наук к условиям существующей и будущей рыночной среды; сохранить традиционные российские научные центры фундаментальных исследований.

*К.С. Гинсберг*

☎ (095) 334-87-59

E-mail: makfone@ipu.ru



## Указатель статей, опубликованных в журнале "Проблемы управления" в 2004 г.

- Агеев И. А., Гурлев И. В., Цыганов В. В.** Механизмы манипулирования корпорацией. № 3.
- Агеев И. А., Ермошкин А. И., Цыганов В. В.** Механизмы технократического управления эволюцией организации. № 2.
- Анисимов П. А., Поздеева О. В.** Организационные системы и модели знаний. № 2.
- Асратян Р. Э., Козлов А. Д., Лебедев В. Н., Мараканов И. Н.** Распределенная интегрированная информационная система поддержки принятия решений. № 2.
- Бабаян Р. Р., Морозов В. П.** Надо ли возрождать аналоговую технику? № 1.
- Блачев Р. Н.** Выбор некоторых параметров займа при реализации инвестиционных проектов. № 2.
- Блюмин С. Л., Шмырин А. М.** Нечеткие системы Вольтерра. № 4.
- Бутов А. А., Волков М. А.** Оптимальное управление параметрами разладки в задаче максимизации энергопродуктивности и результирующая гетерогенность популяции. № 4.
- Ведешенков В. А.** Самодиагностирование возникающих отказов и их устранение в цифровых системах с реконфигурацией. № 3.
- Владислав Юльевич Рутковский** (к 75-летию со дня рождения). № 2.
- Выступление к тематической подборке статей.** № 4.
- Вывоуванец В. С., Малюгин В. Д.** Мультипликативная алгебра и ее применение в логической обработке данных. № 3.
- Гребенюк Е. А.** Мониторинг нестационарных процессов: анализ и исследование изменений свойств стационарности. № 3.
- Евгений Александрович Федосов** (к 75-летию со дня рождения). № 3.
- Жевнеров В. А.** Модификация симплекс-метода на основе принципа эволюции. № 1.
- Жевнеров В. А.** Применение балансных уравнений в задачах описания стохастических сетей. № 2.
- Жевнеров В. А.** Оптимальное управление входящим потоком нагрузки в системах с повторами передач. № 4.
- Ивашкин Ю. А.** Структурно-параметрическое моделирование и идентификация аномальных ситуаций в сложных технологических системах. № 3.
- Ищенко А. А.** Электронная площадка — эффективное средство развития межотраслевого взаимодействия хозяйствующих субъектов в России. № 4.
- Кольтовер В. К.** Надежность электронного транспорта в биологических системах и роль свободных радикалов кислорода в старении. № 4.
- Кононов Д. А., Кульба В. В., Шубин А. Н.** Информационное управление в социально-экономических системах: формализованное описание информационных элементов. № 2.
- Кононов Д. А., Кульба В. В., Шубин А. Н.** Информационное управление в социально-экономических системах: элементы управления и способы информационного воздействия. № 3.
- Кононов Д. А., Кульба В. В., Шубин А. Н.** Информационное управление в социально-экономических системах: информационные акции в информационных полях. № 4.
- Кудинов Ю. И., Дорохов И. Н., Пашенко Ф. Ф.** Нечеткие регуляторы и системы управления. № 3.
- Кузнецов Л. А.** Модель динамики финансовой системы субъекта хозяйствования. № 2.
- Кузнецов Л. А., Домашнев П. А.** Нейросетевые модели для описания сложных технологических процессов. № 1.
- Кульба В. В., Темкин В. М., Рывкин Д. Б.** Технологии обработки данных в системах производственно-экологической безопасности предприятий нефтегазовой промышленности с применением геоинформационно-моделирующих комплексов. № 1.
- Лебедев В. Г.** Принципы построения интеллектуального интерфейса пользователя для систем поддержки принятия решений оператором. № 3.
- Лебедев В. Н., Москальков Д. В., Орлов В. Л.** Управление синхронизацией распределенных баз данных на основе организации трехэлементных очередей. № 1.
- Мероприятия IFAC.** № 1.
- Механизмы управления процессами старения и продолжительностью жизни** (тематическая подборка). № 4.
- Микрин Е. А., Суханов Н. А., Платонов В. Н.** и др. Принципы построения бортовых комплексов управления автоматических космических аппаратов. № 3.
- Михальский А. И., Яшин А. И.** Управление старением и продолжительностью жизни. № 4.
- Мокров Д. В., Бахтадзе Н. Н.** Перспективы применения виртуальных анализаторов в системах управления ресурсами производства. № 1.
- Нижегородцев Р. М.** Логистическое моделирование экономической динамики. Ч. I. № 1.
- Нижегородцев Р. М.** Логистическое моделирование экономической динамики. Ч. II. № 2.
- Новиков Д. А., Чхартишвили А. Г.** Модели рефлексивного принятия решений. № 4.
- Новосельцев В. Н., Аркинг Р., Новосельцева Ж. А., Яшин А. И.** междисциплинарное моделирование системных механизмов управления репродукцией и старением. № 4.
- XI Международная конференция** "Проблемы управления безопасностью сложных систем". № 1.
- Прангишвили И. В., Иванус А. И.** Системная закономерность золотого сечения и системная устойчивость и гармония. № 2.
- Прангишвили И. В., Логоцкий В. А., Гинсберг К. С., Смоляников В. В.** Идентификация систем и задачи управления: на пути к современному системному методологии. № 4.
- Рыков А. С., Исходжанов Р. Р.** Многокритериальная оптимизация портфеля инвестиций. Детерминированный случай. № 3.
- Рыков А. А., Рыков А. С.** Многокритериальная оценка качества информационных систем при неопределенности. № 2.
- Станислав Васильевич Емельянов** (к 75-летию со дня рождения). № 3.
- Степанов М. Ф.** Нейронные сети для планирования решения задач теории автоматического управления. № 2.
- Стецюра Г. Г.** Работа локальных комплексов GRID в режиме жесткого реального времени. № 3.
- Толстых А. В.** Моделирование механизмов управления безопасностью. № 4.
- Тополя И. В.** Экономическая теория и модели целевой функции фирмы. № 1.
- III Международная конференция** "Идентификация систем и задачи управления". № 4.
- III Международная конференция** "Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций" CASC'2003. № 1.
- Указатель статей, опубликованных в журнале** "Проблемы управления" в 2004 г. № 4.
- Халявкин А. В., Яшин А. И.** Нормальное старение как следствие реакции управляющих систем организма на внешние сигналы, не способствующие его полному самоподдержанию. I. Биологические предпосылки. № 4.
- 65 лет** Институту проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. № 2.
- Эпштейн В. Л.** Как увеличить подписку и прибыльность научного журнала: информационно-поисковый сборник аннотаций. № 4.
- Эпштейн В. Л.** Предвидимое будущее научных журналов. № 1.
- Яшин А. И., Украинцева С. В.** Новые идеи, методы и проблемы в моделировании демографических и эпидемиологических проявлений старения. № 4.



# Index of papers published in 2004

- Agheev I. A., Ermoshkin A. I., Tsyganov V. V.** The mechanisms of technocratic management of organization's evolution. N 2.
- Agheev I. A., Gurlev I. V., Tsyganov V. V.** Corporation manipulating mechanism. N 3.
- Anisimov P. A., Pozdeeva O. V.** Organizational systems and knowledge models. N 2.
- Asratian R. E., Kozlov A. D., Lebedev V. N., Marakanov I. N.** A distributed integrated information system for decision-making support. N 2.
- Babayan R. R., Morozov V. P.** Is it necessary to revive analog computation? N 1.
- Blachev R. N.** Selecting some loan parameters for investment projects implementation. N 2.
- Blyumin S. L., Shmyrin A. M.** Fuzzy volterra systems. N 4.
- Butov A. A., Volkov M. A.** optimal control in the change-point problem as a model of energy production optimization in aging. N 4.
- CASC'2003** – The 3<sup>rd</sup> international conference on cognitive analysis and situations development control. N 1.
- Contents** and abstracts. N 1, 2, 3, 4.
- E. A. Fedosov** (to the 75-th anniversary). N 3.
- Epstein V. L.** forekno.wn future of scientific journals. N 1.
- Epstein V. L.** How to increase the audience and profitability of a scientific journal. N 4.
- Grebenyuk E. A.** Nonstationary process monitoring: analysis and investigation of steady state changes. N 3.
- IFAC Events.** N 1.
- Index** of papers published in 2004. N 4.
- Ishchenko A. A.** Electronic site – an effective tool for developing interindustry cooperation of businesses in rusiia. N 4.
- Khalyavkin A. V., Yashin A. I.** Normal aging as a consequent of organism's control systems response to environmental signals which do not contribute to its full self-maintenance. Part I. Biological background. N 4.
- Koltover V. K.** Reliability of electron transport in biological systems and the role of the oxygen free radicals in aging. N 4.
- Kononov D. A., Kulba V. V., Shubin A. N.** Informational management in socio-economic systems: formalized description of informational elements. N 2.
- Kononov D. A., Kulba V. V., Shubin A. N.** Informational management in socio-economic systems: control elements and the ways of informational influence. N 3.
- Kononov D. A., Kulba V. V., Shubin A. N.** Informational management in socio-economic systems: information actions in information fields. N 4.
- Kudinov Yu. I., Dorokhov I. N., Pashchenko F. F.** Fuzzy controllers and control systems. N 3.
- Kulba V. V., Temkin V. M., Ryvkin D. B.** Data processing technology based on geoinformation and simulation complexes in environmental safety systems of hydrocarbon industry. N 1.
- Kuznetsov L. A.** A model for management agent's financial system dynamics. N 2.
- Kuznetsov L. A., Domashnev P. A.** Neuronet models for complex process description. N 1.
- Lebedev V. G.** Design concepts of intelligent user interface for operator support systems. N 3.
- Lebedev V. N., Moskalkov D. V., Orlov V. L.** Synchronization management of the distributed heterogeneous databases on the basis of a three-element order. N 1.
- Michalski A. I., Yashin A. I.** senescence and longevity control. N 4.
- Mikrin E. A., Sukhanov N. A., Platonov V. N., et al.** Design concepts of onboard control complexes for automatic spacecrafts. N 3.
- Mokrov D. V., Bakhtadze N. N.** An outlook for soft sensor applications in erp systems. N 1.
- Nizhegorodtsev R. M.** Logostic modeling of economic dynamics. Part I. N 1.
- Nizhegorodtsev R. M.** Logistic modeling of economic dynamics. Part II. N 2.
- Novoseltsev V. N.** Introduction into thematic set of papes. N 4.
- Novoseltsev V. N., Arking R., Novoseltseva J. A., Yashin A. I.** Interdisciplinary modelling of systemic mechanisms which control the reproduction and ageing. N 4.
- Novikov D. A., Chkhartishvili A. G.** Reflexive models of decision-making. N 4.
- Pranghishvili I. V., Ivanus A. I.** System regularity of the golden section and system stability and harmony. N 2.
- Pranghishvili I. V., Lototsky V. A., Ghinsberg K. S., Smolyaninov V. V.** System identification and control problems: on the way to modern system methodologies. N 4.
- Processes** of aging and longevity control mechanisms (thematic set of papers). N 4.
- Rykov A. A., Rykov A. S.** A multicriterion performance estimate for information systems under uncertainty. N 2.
- Rykov A. S., Iskhodjanov R. R.** Multi-objective investment portfolio optimization. The deterministic case. N 3.
- S. V. Yemelyanov** (to the 75-th anniversary). N 3.
- Stepanov M. F.** Neuron networks for planning the solution of automatic control theory problems. N 2.
- Stetsyura G. G.** Hard realtime operation of local grid systems. N 3.
- The III<sup>th</sup> international** conference "System identification and control problems". N 4.
- The 11<sup>th</sup> international** conference on control problems of complex systems safety. N 1.
- Tolstykh A. V.** Modeling of mechanisms of management of safety. N 4.
- Topolya I. V.** Economic theory and corporate objective function models. N 1.
- V.A. Trapeznikov** institute of control sciences of russian academy of sciences is 65. N 2.
- V.Yu. Rutkovsky** (to the 75-th anniversary). N 2.
- Vedeshenkov V. A.** System-level self-diagnosis of arising faults and their elimination in reconfigurable systems. N 3.
- Vykhovanets V. S., Malyughin V. D.** Multiplicative algebra and its application in logical data processing. N 3.
- Yashin A. I., Ukraintseva S. V.** New ideas, techniques and problems in modelling. demographic and epidemiological manifestation of aging. N 4.
- Zhevnerov V. A.** A modification of simplex-method based on the evolution principle. N 1.
- Zhevnerov V. A.** Application of balance equations in stochastic network description problems. N 2.
- Zhevnerov V. A.** Optimal control of input load flow. N 4.



# CONTENTS & ABSTRACTS

## SYSTEM IDENTIFICATION AND CONTROL PROBLEMS: ON THE WAY TO MODERN SYSTEM METHODOLOGIES. . . . . 2

**Pranghishvili I. V., Lototsky V. A., Ghinsberg K. S., Smolyaninov V. V.**

An analytic review of identification research papers published in the Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference "System Identification and Control Problems" is offered. The basic concept is formulated as follows: identification problems should be studied in the context of human activities aimed at looking for the solutions to practical control tasks. The paper indicates the need in science-intensive methodologies for the initial phases of solving sophisticated non-standard problems with weakly formalizable conditions and stringent requirements to control performance (estimation and prediction).

## PROCESSES OF AGING AND LONGEVITY CONTROL MECHANISMS. . . . . 16 (thematic set of papers)

## NEW IDEAS, TECHNIQUES AND PROBLEMS IN MODELLING DEMOGRAPHIC AND EPIDEMIOLOGICAL MANIFESTATION OF AGEING. . . . . 18

**Yashin A. I., Ukraintseva S. V.**

Traditional demographic techniques of morbidity and mortality analysis in human and animal populations do not pay attention to the two important properties related to the interaction between the population and its environment. The first one is concerned with differing the chances for individuals to fall sick and to die. The second deals with the dependencies between the vitally important biologic characteristics (life span, the age of illness onset, etc.) of genetic relatives as well as of individuals sharing similar cultural and other living standards. The paper discusses the approaches to ageing and survival modeling where these properties are reflected in population dynamics. It also formulates several unsolved problems related to modeling and control under incomplete information. Finally, it discusses some promising biological hypotheses that can be studied with the help of novel models.

## INTERDISCIPLINARY MODELLING OF SYSTEMIC MECHANISMS WHICH CONTROL THE REPRODUCTION AND AGEING. . . . . 27

**Novoseltsev V. N., Arking R., Novoseltseva J. A., Yashin A. I.**

Interdisciplinary modeling and simulation of ageing and reproduction is presented. The paper describes a model where the individual ageing rate is proportional to the organism's oxygen consumption rate and its oxidative vulnerability. Ageing is understood as age-related decrease of the organism's ability to convert the substances got from ambient into energy. The models of oxidative stress and senescence-caused death allow constructing the general scheme simulating organism's life cycle. This scheme was used to analyze systemic mechanisms of reproduction and ageing in *Drosophila* and *Medfly* fruit flies.

## RELIABILITY OF ELECTRON TRANSPORT IN BIOLOGICAL SYSTEMS AND THE ROLE OF THE OXYGEN FREE RADICALS IN AGING. . . . . 40

**Koltover V. K.**

Despite the phenotypic variety, the aging of all organisms follows rather simple universal quantitative laws. First, each species is characterized by the species-specific maximal life-span potential, which is inversely related to the basal oxygen consumption (the so-called "Rubner scaling relation"). Second, the growth of mortality rate with age follows the extremes statistics. Usually, it is the so-called Gompertz law of mortality that has been confirmed both for people and for other mammals, flies, mollusks, etc. Free-radical hypothesis of aging explains the Rubner relation but it cannot explain the exponential growth of mortality with age. Against this background, the paper offers a framework of a universal aging theory based on the concept that all biological structures perform their functions with genetically limited reliability. It shows that the theory is, generally, capable to piece together and explain all quantitative mechanisms of aging.

## SENESCENCE AND LONGEVITY CONTROL. . . . . 46

**Michalski A. I., Yashin A. I.**

The paper notes that the available data about the factors affecting senescence and longevity processes enable to formulate the problem of controlling these processes at different levels: cells, organs, organism, population. The knowledge absorbed in biology, medicine, gerontology and demography should be generalized in a way to take into account the common features of the processes running in various-type systems. The paper analyzes the results of longevity experiments with *C.elegans* worms together with the data about human disability at advanced ages. Based on the results obtained, it offers potential ways to slow the aging and to increase the longevity.

## OPTIMAL CONTROL IN THE CHANGE-POINT PROBLEM AS A MODEL OF ENERGY PRODUCTION OPTIMIZATION IN AGING. . . . . 54

**Butov A. A., Volkov M. A.**

Optimal control in the change-point problem as a model of energy production optimization in aging is discussed. The paper shows the multimodality of the objective function under some assumptions that causes the heterogeneity of the population in aging. Biological application of the model includes the analysis of distribution functions of stress times in aging.

## NORMAL AGING AS A CONSEQUENT OF ORGANISM'S CONTROL SYSTEMS RESPONSE TO ENVIRONMENTAL SIGNALS WHICH DO NOT CONTRIBUTE TO ITS FULL SELF-MAINTENANCE. PART I. BIOLOGICAL BACKGROUND. . . . . 57

**Khalyavkin A. V., Yashin A. I.**

Recent findings prove that anti-aging processes in cells can successfully counteract cellular deterioration. Some researchers agree with the view that the aging of the multicellular organism is rather a function of breakdown in integrative mechanisms than of fatal changes in individual cells. Why, in this case, does an organism composed of potentially ageless cells age? The answer may be found by taking into account the influence of all external factors that induce organisms to function in one physiological regimen or another. The paper shows that the effectiveness of the control systems to self-maintenance may depend not only on organism's structural or functional features but also indirectly on the external conditions in which it exists. It describes some facts that agree with the approach proposed.

## REFLEXIVE MODELS OF DECISION-MAKING. . . . . 62

**Novikov D. A., Chkhartishvili A. G.**

The paper reviews the game-theoretical models of reflexive decision-making. Most of equilibrium concepts used in the game theory require game parameters to be common knowledge, i.e. that all agents know it, all agents know that all agents know it, and so on ad infinitum. In the general case, the agents have different beliefs about beliefs of other agents; thus an infinite (reflexive) belief structure appears. For this case, the concept of informational equilibrium looks rational. The paper formulates the reflexive model and the conditions of the reflexive equilibrium existence and stability. It offers a solution to the reflexivity depth problem for some cases and adduces some examples.

## MODELING OF SAFETY MECHANISMS CONTROL. . . . . 71

**Tolstykh A.V.**

The paper discusses the problems of building the models of economic mechanisms of accident prevention in man-caused and natural disasters. The methods of safety control mechanisms analysis subject to decision-makers activities are described with the example of a linear mechanism of risk decrease fee.

## FUZZY VOLTERRA SYSTEMS. . . . . 75

**Blyumin S. L., Shmyrin A. M.**

The paper offers an approach to accounting the fuzziness of the state neighbourhoods of time-discrete systems and discusses how it agrees with the study of discrete Volterra and fuzzy systems.

## OPTIMAL CONTROL OF INPUT LOAD FLOW. . . . . 79

**Zhevnerov V. A.**

An optimal load flow control procedure for the systems with repeated transmissions is offered. An example of ALOHA system with the most prevalent type of multiple access is adduced.

## INFORMATIONAL MANAGEMENT IN SOCIO-ECONOMIC SYSTEMS: INFORMATION ACTIONS IN INFORMATION FIELDS. . . . . 81

**Kononov D. A., Kulba V. V., Shubin A. N.**

The final part of the paper presents the results of formalizing some information actions typical for informational management. It offers some problem statements and discusses ways of their effective solution.

## HOW TO INCREASE THE AUDIENCE AND PROFITABILITY OF A SCIENTIFIC JOURNAL. . . . . 88

**Epstein V. L.**

The paper offers to create information retrieval abstracts digests on CDs in Web and to use them as a new communication tool on scientific journals market. Such digests help to expand the journal's readers community, improve its value and impact factor and can serve as promoter of innovations and scientific and technical communications in the target audience. They can be also sold at the scientific information market as a new information product.

## ELECTRONIC SITE – AN EFFECTIVE TOOL FOR DEVELOPING INTERINDUSTRY COOPERATION OF BUSINESSES IN RUSIIA. . . 92

**Ishchenko A. A.**

The paper outlines the prospect of interindustry cooperation of businesses in Russia. An electronic interindustry site is singled out as research object. The organization of such interaction and its main participants are described. The difficulties that hamper the expanding of interindustry business cooperation in Russia are discussed.

## THE III<sup>TH</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE "SYSTEM IDENTIFICATION AND CONTROL PROBLEMS". . . . . 96

## INDEX OF PAPERS PUBLISHED IN 2004. . . . . 101

## CONTENTS & ABSTRACTS. . . . . 102