

ИНСТИТУТ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА РАН

Г.С.Осипов

gos@isa.ru

Структура достижимых состояний
динамических систем, основанных
на правилах



Введение

- Около 20 лет исследуются так называемые гибридные динамические системы, в которых присутствуют как непрерывная так и дискретная части: дифференциальные автоматы, модель Нерода-Кона, модель Брокета и некоторые другие.
- Поведение таких систем изучается посредством топологизации состояний и сведения задачи к методам, применяемым обычно в системах с непрерывными переменными.

Введение

Системы, которые в отличие от гибридных систем обладают более сложно устроенными состояниями чем таблица состояний «дискретной» части или вектор фазового пространства «континуальной» части гибридной системы.

Область применения - моделирование искусственных, экологических, биологических и иных систем, структура которых и состояния не имеют априорного, а законы поведения и его цели - аналитического описания.



Системы, основанные на знаниях

Известны:

- множество высказываний о значениях лингвистических или логических переменных;
- экспертные или эмпирические правила, связывающие наблюдаемые значения переменных или значения высказываний с ненаблюдаемыми или прогнозируемыми.



Системы, основанные на знаниях

Не известны:

- точные описания состояний;
- точное описание динамики системы.

ПРИМЕРЫ

- *12 мая температура воды 14 градусов*
- *12 мая течение слабое*
- *Направление течения: северо-западное*
- *Соленость воды: низкая*
- *Зоопланктон не размножается*
- *Цель: изгнание соперника из стада*
- *Цель: облет станции*

ПРИМЕРЫ

- Правило 1.
- УСЛОВИЕ *температура воды высокая, солёность низкая или средняя*
- СПИСОК ДОБАВЛЯЕМЫХ ФАКТОВ
зоопланктон размножается
- СПИСОК УДАЛЯЕМЫХ ФАКТОВ
зоопланктон не размножается

ПРИМЕРЫ

- Правило 2.
- УСЛОВИЕ *зоопланктон размножается, течение слабое*
- СПИСОК ДОБАВЛЯЕМЫХ ФАКТОВ *рост биомассы популяции, **биомасса популяции** ($t+1$)*
- СПИСОК УДАЛЯЕМЫХ ФАКТОВ *уменьшение биомассы популяции*

ПРИМЕРЫ

- Правило 3.(ВЫБОР ЦЕЛИ)
- УСЛОВИЕ *направление линии визирования = неизвестно*
- СПИСОК ДОБАВЛЯЕМЫХ ФАКТОВ
цель: = поиск станции
- СПИСОК УДАЛЯЕМЫХ ФАКТОВ
остальные цели

ПРИМЕРЫ

- Правило 4.(ВЫБОР ЦЕЛИ)
- УСЛОВИЕ *угол $(AL, V) \geq \alpha$, резерв времени $< \varepsilon$*
- СПИСОК ДОБАВЛЯЕМЫХ ФАКТОВ
цель: = зависание
- СПИСОК УДАЛЯЕМЫХ ФАКТОВ
остальные цели

ПРИМЕРЫ

- Правило 5. (ВЫЧИСЛЕНИЕ ВЕКТОРА И МОМЕНТА СИЛЫ)
- УСЛОВИЕ *цель = сблизение, дистанция = D , вектор линии визирования = AL , угол промаха = α*
- СПИСОК ДОБАВЛЯЕМЫХ ФАКТОВ
*вектор силы := $F(V, AL, O_x, \Delta t)$,
момент силы := $M(\omega, F\omega, AL, V, O_x, \Delta t)$*

ПРИМЕРЫ

- Правило 6.(ВЫБОР КОМБИНАЦИИ ВКЛЮЧАЕМЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ)
- УСЛОВИЕ n такта = четный, $|F| \neq 0$, угол $(F, F(Cn)) \leq \varepsilon \alpha$, $|F| - |F(Cn)| < \varepsilon \lambda$
- СПИСОК ДОБАВЛЯЕМЫХ ФАКТОВ
 $C(t+1) := Cn$
- СПИСОК УДАЛЯЕМЫХ ФАКТОВ $C(t)$

ПРИМЕРЫ

- Правило 7.(ВЫБОР КОМБИНАЦИИ ВКЛЮЧАЕМЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ)
- УСЛОВИЕ n такта = нечетный, $|M| \neq 0$,
угол $(M, M(Cn)) \leq \varepsilon \rho$, $|M| - |M(Cn)| < \varepsilon v$
- СПИСОК ДОБАВЛЯЕМЫХ ФАКТОВ
 $C(t+1) := Cn$
- СПИСОК УДАЛЯЕМЫХ ФАКТОВ $C(t)$

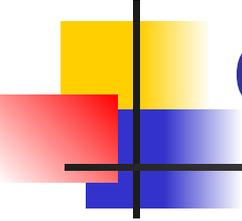
ПРАВИЛА

- Правило: $\Pi = \langle C, A, D \rangle$,
- C , A и D - множества атомарных формул языка L - например, многосортный язык исчисления предикатов первого порядка.
- Факт – замкнутая атомарная формула языка L . Формула превращается в факт в результате подстановок значений на места переменных.

- С – условие правила,
- А – множество формул, таких, что соответствующие им факты добавляются в состояние в результате применения правила ,
- D – множество формул, таких, что соответствующие им факты удаляются из состояния в результате применения правила .
- Для каждого правила $A \cap D = \emptyset$.

ПРАВИЛА

- Два класса правил R_t и R_σ .
- С правилом класса R_t связывается некоторое *действие*, производимое исполнительным органом, либо процедура, вычисляющая и присваивающая некоторой переменной значения некоторых атрибутов по значениям других атрибутов.
- С правилами класса R_σ не связывается никаких действий, они не изменяют окружающей действительности, но изменяют знания о ней.



Динамические системы, основанные на правилах

Применение правил как средства описания состояний и динамики приводит к динамическим системам, основанным на правилах.

Включают: множество правил, рабочую память, стратегию управления.

Рабочая память

- Совокупность таблиц или конечных отношений (таких, как, например, в реляционных базах данных), количество которых соответствует количеству различных предикатных символов в правилах. Столбцы таблиц соответствуют сортам индивидуальных переменных из предикатных символов.

Рабочая память

Выполнимость и применимость:

- а) условие правила выполнено в текущем состоянии рабочей памяти тогда и только тогда, когда все атомарные формулы условия выполнены в текущем состоянии рабочей памяти;
- б) атомарная формула выполнена в рабочей памяти тогда и только тогда, когда существует непустая подстановка из соответствующей таблицы на места её индивидуальных переменных.

Стратегия управления 1

- Выбирает некоторое правило из множества правил, проверяет выполнимость его условия в текущем состоянии рабочей памяти и, в случае выполнимости, применяет правило, т.е. выполняет предписываемые правилом действия;
- иначе выбирает следующее правило и повторяет с ним указанные действия.

Стратегия управления 1

Если множество правил упорядочено, например, в алфавитном порядке (по первой букве, затем по второй и т.д.), то стратегия управления имеет следующий вид:

- 1. Выбрать очередное правило P_i из множества правил;
- 2. Проверить выполнимость условия S_i в текущем состоянии рабочей памяти;
- 3. Если S_i выполнено, то подставить на места всех свободных переменных в формулы из S_i , A_i и D_i соответствующие значения параметров из базы данных. Иначе перейти к п. 1;
- 4. Применить правило, т.е. записать в рабочую память те значения, на которых оказались выполненными формулы из A_i и удалить из рабочей памяти значения, на которых оказались выполнены формулы из D_i .
- Перейти к п. 1.
- Условием завершения процесса является стабилизация состояния рабочей памяти.

ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ПРАВИЛАХ

- Обозначим описанный процесс через K и положим
- $K(x, P_\sigma) = \varphi(x)$
- $K(x, P_\tau) = \psi(x)$, где $P_\sigma \in R_\sigma$, $P_\tau \in R_\tau$.
- $\varphi(x)$ – функция замыкания,
- $\psi(x)$ – функция переходов.

ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ПРАВИЛАХ

Осталось ввести время: для этого в языке выделим сорт переменной t , которая может принимать значения из линейно упорядоченного дискретного множества T .



ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ПРАВИЛАХ

$$H = \langle X, T, \Phi, \Psi \rangle -$$

динамическая система, основанная на правилах,

- где $\Phi: 2^X \rightarrow 2^X$
- $\Psi: 2^X \times T \rightarrow 2^X$

ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ПРАВИЛАХ

- Состояние системы - неподвижная точка уравнения

$$\Phi(x) = x$$

- Предельное состояние системы - неподвижная точка уравнения

$$\Psi(\Phi(x), t) = x \quad \text{где } x \in 2^x$$

- Ψ индуцируется на $2^x \times T$ функцией ψ

- Φ индуцируется на 2^x функцией φ

ДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА С ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННЫМ ПОВЕДЕНИЕМ

- Задано некоторое $\Omega \subseteq 2^X$ с определенным на нем нетранзитивным, асимметричным и антирефлексивным бинарным отношением
- ρ ($\rho \subseteq \Omega \times \Omega$) - отношение предпочтения;
- тогда Ω множество целей, а
- $D = \langle X, T, \Phi, \Psi, \Omega \rangle$ -
динамическая система с
целенаправленным поведением.

ДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА С ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННЫМ ПОВЕДЕНИЕМ

- Пусть $\omega \in \Omega$
- Процедура $\pi: 2^x \times 2^x \rightarrow$ МНОЖЕСТВО ПЛАНОВ,
вырабатывающая план достижения цели ω из состояния θ - процедура планирования.

ДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА С ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННЫМ ПОВЕДЕНИЕМ

- Стратегия управления 2.
- 1. Выбирается цель ω из множества Ω - наиболее предпочтительная в смысле отношения ρ .
- 2. Выполняется процедура планирования.
- 3. Если план существует, то реализуется соответствующее поведение и ОСТАНОВ, иначе
- Выбирается следующая цель ω_1 в смысле отношения ρ
- Выполняется процедура планирования,
- Если план существует, реализуется Стратегия 1 для достижения ω_1 ; если нет – переход к п.4.,
- Переход к п.1.

ПРИМЕР

- поведение обезьяны: «СОПЕРНИК-БАНАН-СОПЕРНИК»,
- поведение активного корабля: «СТЫКОВКА- ОБЛЕТ- СТЫКОВКА».

ДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА С ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННЫМ ПОВЕДЕНИЕМ

Получены результаты: об устойчивости таких систем и их управляемости (в смысле компенсации возмущений и в смысле достижимости)

о связи архитектур баз знаний с достижимостью состояний и существованием планов поведения

Классификация динамических систем, основанных на правилах.

- Система Н1: $\Pi = \langle C, P(t, y), \emptyset \rangle$,
 $P(t, y)$ – добавляемый факт;
- Система Н2: $\Pi = \langle C, P(t, y), \Phi(t, z) \rangle$, $P(t, y)$ – добавляемый факт, $\Phi(t, z)$ – удаляемый факт;
- Система Н3: $\Pi_1 = \langle C, \{P(t, y)\}, \{\Phi(t, z)\} \rangle$
 $\{P(t, y)\}$ – множество добавляемых фактов,
 $\{\Phi(t, z)\}$ – множество удаляемых фактов.

Классификация динамических систем, основанных на правилах.

- S_0 – начальное состояние систем H_2 и H_3 .
Система H_{21} : H_2 , где $P \cap \Phi = \emptyset$
- Система H_{22} : H_2 , где $S_0 \cap \Phi = \emptyset$
- Система H_{31} : H_3 , где $P \cap \Phi^1 = \emptyset$
- Система H_{32} : H_3 , где $S_0 \cap \Phi^2 = \emptyset$
- Система H_{33} : H_3 , где $P \cap \Phi \neq \emptyset$
 $\cup S_0 \cap \Phi \neq \emptyset, \quad \Phi = \Phi^1 \cup \Phi^2$

ПРЕДЕЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ

P – объединение фактов, добавляемых всеми правилами;

F – объединение фактов, удаляемых всеми правилами;

S0 – начальное состояние;

ПРЕДЕЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ

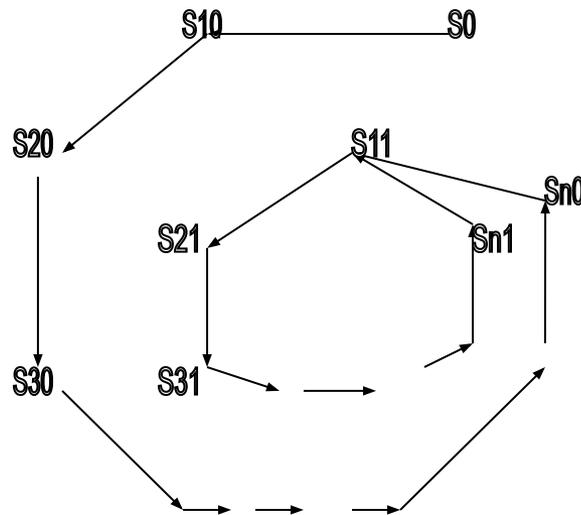
Система Н1: $S_0 \cup P$;

Системы Н21, Н31 : $(S_0 / \Phi) \cup P$;

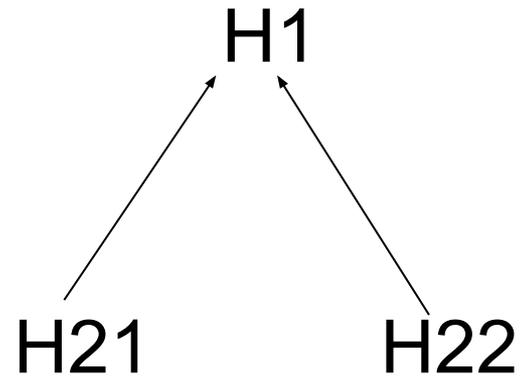
Системы Н22, Н32, Н33: - стабилизация состояний не наступает;

предельные траектории

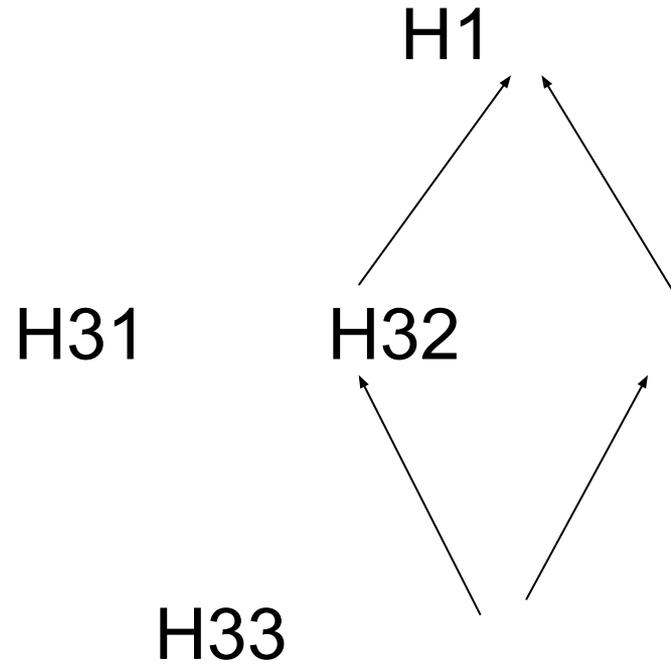
- В Н22, Н32, Н33 наступает стабилизация траекторий со второго «витка»



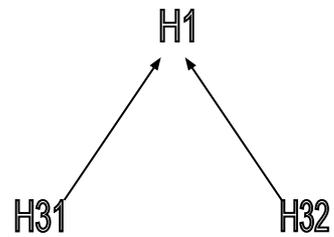
Структура предельных состояний и траекторий



Структура предельных состояний и траекторий



Учет применимости правил



СВОДКА РЕЗУЛЬТАТОВ

- **Устойчивость и управляемость.**
- Пусть I - некоторое возмущение в состоянии S_i , т.е. $i=S_i \{I\}$ и имеет место $|=I$. Тогда для состояния S_{i+1} имеем $S_{i+1} = \phi(\psi(\phi(S_i \{I\})))$.
- **Определение 1.** Траектория Ξ называется **устойчивой**, если для любого состояния $S_i \in \Xi$ и возмущения I
- $\phi(\psi(\phi(S_i))) \subseteq \phi(\psi(\phi(S_i \{I\})))$.
- **Теорема 1.** (достаточное условие устойчивости)
- Если ϕ и ψ монотонны, то траектория системы устойчива.
- **Определение 2.** База правил R полна в слабом смысле если найдется $R1$ – подмножество R , и найдется S – подмножество $L(R)$, что S - подмножество $A(R1)$ и пересечение S и $D(R1)$ пусто, где $A(R1)$ - объединение множеств всех фактов, добавляемых правилами из $R1$, $D(R1)$ - объединение множеств всех фактов, удаляемых правилами из $R1$.

СВОДКА РЕЗУЛЬТАТОВ

- **Определение 3.** Если X - множество состояний модели,
- то пара точек (x_0, x_1) в $X \times X$ называется N -достижимой, если существуют такие управления $U(j) \in L$ ($j=0,1,\dots,N-1$), что $x_1 \in x(N)$, при начальных условиях $x(0) \in x_0 \cup U(0)$, где $x(N)$ - решение уравнения состояния.

Определение 4. Если пара точек (x_0, x_1) N -достижима и в траектории, доставляющей решение уравнению (5.1) каждый факт Φ из $x(N)$ встречается не более, чем в одном правиле, то пара точек (x_0, x_1) называется эффективно N -достижимой.

- **Теорема 3.** База правил R полна в слабом смысле тогда и только тогда, когда в $X \times X$ найдутся пара точек (x_0, x_1) и управления $U(j)$, такие что (x_0, x_1) - эффективно N -достижима.
- **Определение 5.** База правил R полна, если для всякого $\Phi \in L(R)$, $\Phi \in A(R)$ и $A(R) \cap D(R) = \emptyset$, где $A(R)$ - объединение множеств всех фактов, добавляемых правилами из R , $D(R)$ - объединение множеств всех фактов, удаляемых правилами из R .
- **Определение 6.** Система называется полностью достижимой, если для любой пары точек (x_0, x_1) , найдется N , что пара (x_0, x_1) является эффективно N -достижимой.
- **Теорема 4.** Система полностью достижима, если и только если база правил R полна.

СВОДКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Существование плана и достижимость

- **Определение 7.** Планом достижения состояния ω из состояния ι будем называть последовательность $\Pi = \langle (\Pi_1, U_1), (\Pi_2, U_2), \dots, (\Pi_k, U_k) \rangle$ правил $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_k$ и управлений U_1, U_2, \dots, U_k удовлетворяющие следующим свойствам:
 - 1) каждое правило последовательности является допустимым;
 - 2) $\omega \in S(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_k)$.
- **Определение 8.** Пусть M_i – состояние, которое достигнуто перед применением правила Π_{i+1} . Правило Π_i назовем результативным, если $A(\Pi_i) \ni M_i \neq \emptyset$.

СВОДКА РЕЗУЛЬТАТОВ

- **Теорема 5.** Следующая процедура есть *процедура планирования*:
- 1. Пусть S есть целевое состояние, M_i текущее состояние, а $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_k$ —множество результативных правил.
- 2. Пусть текущим является правило Π_i , тогда $M_{i-1} = M_i \setminus A(\Pi_i) \cap C(\Pi_i)$;
- 3. Выполняется проверка $M_j \cap M_{i-1}$, где $j > i-1$. Если это выполняется, то текущим множеством целей становится M_{i-1} , в противном случае текущим становится правило Π_{i+1} .
- 4. Если результативных правил не осталось, то текущим множеством целей становится M_{i+1} , правило же, приведшее к M_i считается неудачным.
- Правила остановки:
 - 1. $M_i \cap S_0$
 - 2. $M_i = S$ и результативных правил не осталось.

Сводка результатов

- **Теорема 6.** Для всякой пары точек $(x_0, x_1) \in X \times X$ план $\Pi = \Pi = \langle (\Pi_1, U_1), (\Pi_2, U_2), \dots, (\Pi_k, U_k) \rangle$ существует тогда и только тогда, когда $(x_0, x_1) - N$ - достижима

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ

- Gennady Osipov. Developing Models of a World with Regard for its Dynamics - General Principles. Proc. of SCI'97 - World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Vol.3, Caracas, Venezuela, 1997.
- Gennady Osipov. Applied semiotics and intelligent control. Proc. of the Second Workshop on Applied Semiotics 7-th Int. Conference AIICSR'97, Slovakia, 1997
- Gennady Osipov. Dynamics in Integrated Knowledge-Based Systems. Proceedings of the 1998 IEEE `Symposium on Intelligent control, Gaithersburg, MD, USA, 1998

Публикации по теме

- Osipov G. Sazonova L., Intelligent system for fish stock prediction and allowable catch evaluation. Environmental modelling & software, Elsevier Science Ltd., Volume 14, issue 5, 1999
- А.Б.Беляев, Е.П.Куршев , Г.С. Осипов. Интеллектуальная технология поддержки лечебно-диагностического процесса. Сб. Программные системы: Теоретические основы и приложения. М. Наука, “Физматлит”, 1999

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ

- Осипов Г.С. Дискретные динамические модели, основанные на знаниях: архитектура, планирование, управляемость. Труды 4-го международного семинара по прикладной семиотике, семиотическому и интеллектуальному управлению ASC'99, Москва, ПАИМС, 1999
- Лебедева Т.Г. Осипов Г.С. Архитектура и управляемость дискретных динамических систем, основанных на знаниях. Известия АН. Теория и системы управления. М: Наука, 2000, №5, 703-709
- Gennady Osipov. Attainable Sets and Knowledge Base Architecture in Discrete Dynamic Knowledge-based Systems. Proc. of the ECAI 2000. 14-th European Conference of Artificial Intelligence. Berlin.2000, 39-43

Публикации по теме

- Бурдаев М.Н., Осипов Г.С., Хачумов В.М. О системе управления относительным движением космических аппаратов с повышенной безопасностью сближения. Материалы Третьих научных чтений памяти М.К. Тихонравова по военной тематике, 4-5 октября 2000 г., 4 ЦНИИ МО РФ, 2000.
- Бурдаев М.Н., Осипов Г.С. Хачумов В.М. Принципы построения интеллектуальной измерительно-управляющей системы. Доклады Международной космической конференции 2001. Космос без оружия арена мирного сотрудничества в XXI веке. М.: Изд-во МАИ, 2001.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ

- Г.С.Осипов. Интеллектуальные динамические системы и целенаправленное поведение. Научно - теоретический журнал «Искусственный интеллект», ІПШІ «Наука і освіта», 2002, №2, 221-235.
- Виноградов А. Н., Осипов Г.С., Жилякова Л.Ю. Динамические интеллектуальные системы. Ч.1. Представление знаний и основные алгоритмы. Известия АН. Теория и системы управления, М: Наука, 2002, №6, 119-127
- Виноградов А. Н., Осипов Г.С., Жилякова Л. Ю. Динамические интеллектуальные системы. Ч.2. Моделирование целенаправленного поведения. Известия АН. Теория и системы управления, М: Наука, 2003, №1.

Публикации по теме

- **Осипов Г.С.** Динамические модели и инструментальные программные средства, использующие экспертные и эмпирические знания. Труды 3-его расширенного семинара "Использование методов искусственного интеллекта и высокопроизводительных вычислений в аэрокосмических исследованиях." (АКИИ-03) Переславль-Залесский, 2003, с.13-20.
- **Г.И. Назаренко, Г.С. Осипов.** Основы теории медицинских технологических процессов. Часть 1.- М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005