

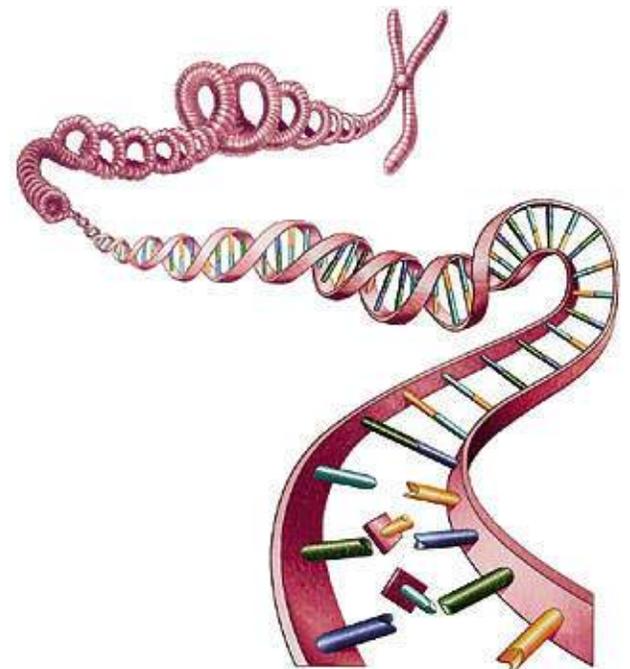
Эволюционные вычисления

Цой Ю.Р.

yurytsoy@gmail.com

<http://qai.narod.ru>

г. Томск, 24 октября 2009 г.



Существует только один способ ничего не делать и множество способов сделать что-нибудь...

Амброз Бирс

О СЕМИНАРЕ





О Семинаре

Идея: Цой Юрий & Лоцилов Илья

Примеры для подражания:

1. Во Франции каждый квартал собирают 1-дневный семинар по эволюционным вычислениям, на котором заслушиваются и обсуждаются результаты работы французских исследовательских групп.
2. В практику работы многих исследовательских групп входит периодические собрания с обсуждением результатов исследований.
3. Ежегодная школа-семинар «Современные проблемы нейроинформатики», г. Москва, МИФИ.
4. Всероссийская школа «В будущее наук о мозге и интеллекте», г. Москва.



Цели семинара

- Популяризация методов эволюционных вычислений при решении научных и практических задач.
- Информирование о результатах работы ведущих мировых научных школ, коллективов и лабораторий, занимающихся разработкой, анализом и приложениями эволюционных алгоритмов.
- Повышение уровня грамотности в области эволюционных вычислений.
- Обмен мнениями и опытом исследователей и инженеров.



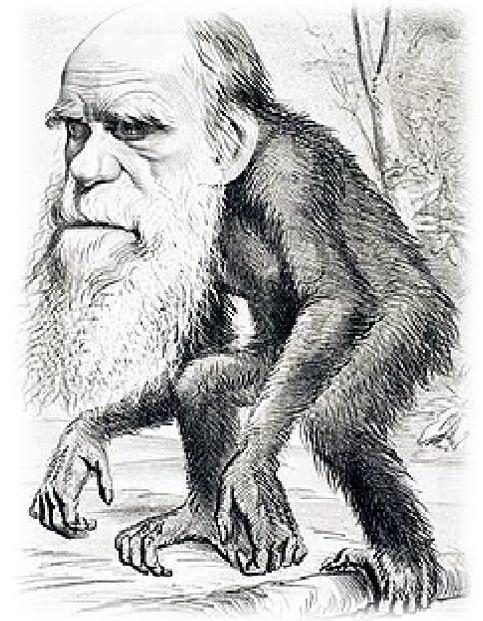
Планы

Планируемые темы лекций и докладов:

- Эволюционные алгоритмы многокритериальной оптимизации.
- Искусственные нейронные сети и нейроэволюционные алгоритмы.
- Нечеткие системы.
- Нечеткие эволюционные алгоритмы.
- Искусственная жизнь и адаптивное поведение.
- Эволюционная робототехника.
- Обзоры работ известных мировых исследовательских групп и лабораторий.
- Обзоры книг и публикаций.

Содержание

1. Введение.
2. Краткая история.
3. А тем временем в СССР...
4. Эволюционные вычисления в настоящее время.
5. Перспективы.
6. Легенды и мифы об эволюционных вычислениях.



Космос. Кажется, что он простирается до бесконечности. Но потом ты долетаешь до конца, и горилла начинает кидаться в тебя бочками.

Футурама

Космический пилот 3000

ВВЕДЕНИЕ



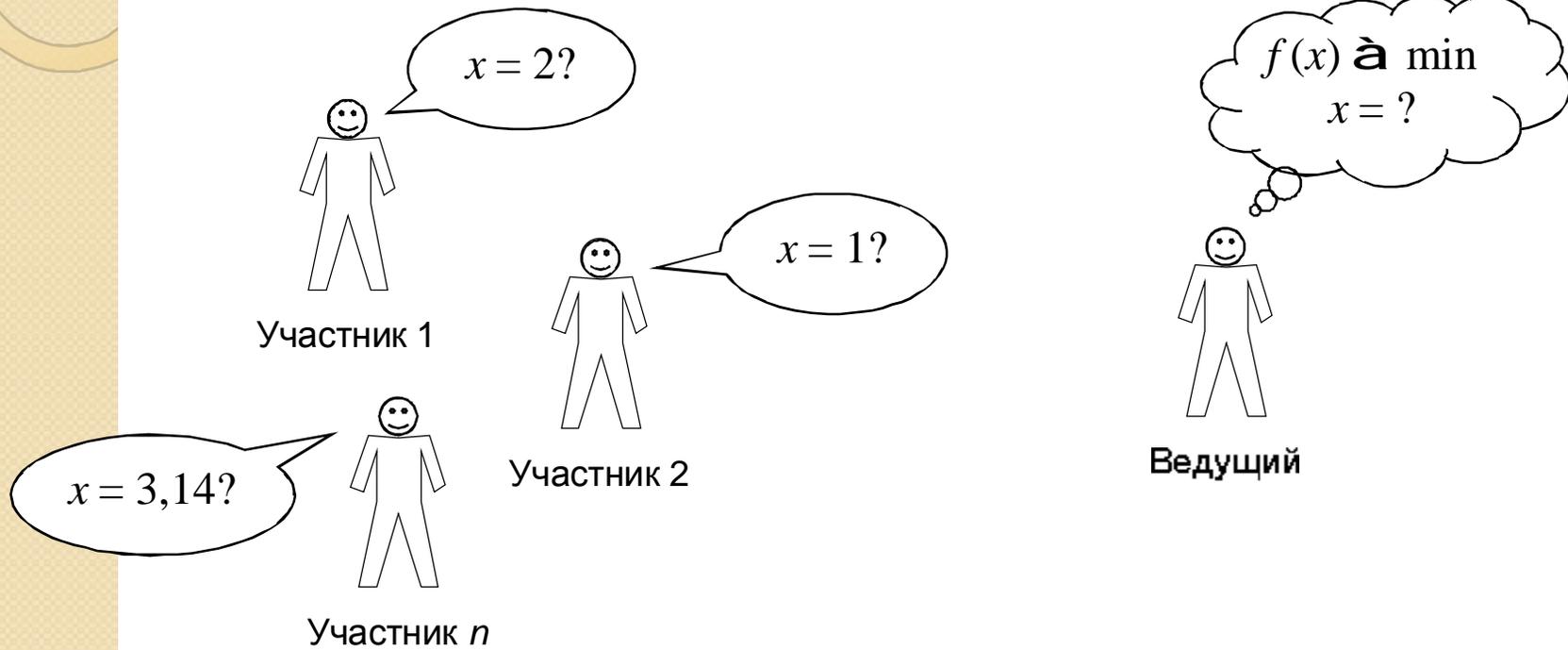
1. Введение

«Универсальные» методы:

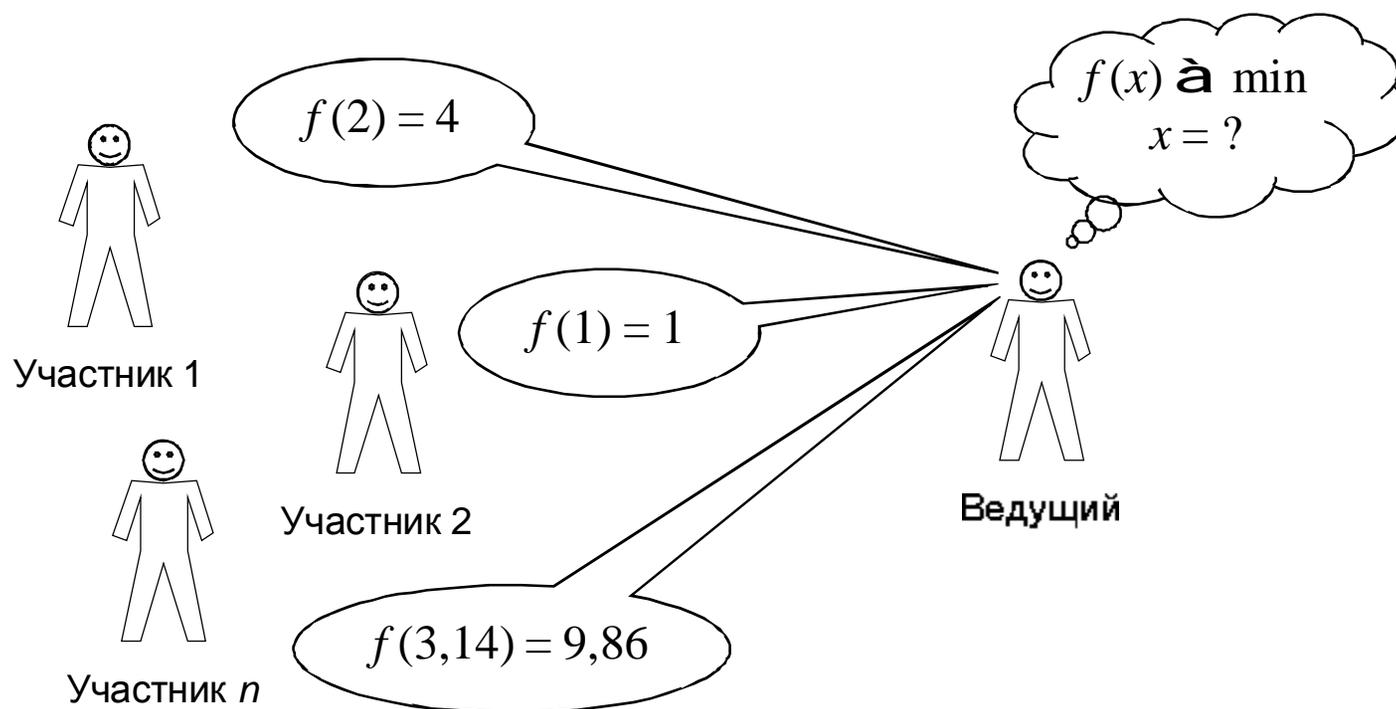
- Случайный поиск.
- Последовательный перебор.
- Метод проб и ошибок.

Эволюционные вычисления (evolutionary computation) – раздел *мягких вычислений* (soft computing) и *вычислительного интеллекта* (computational intelligence), посвященный разработке методов и алгоритмов, опирающихся на эволюционные принципы наследственности, изменчивости и естественного отбора.

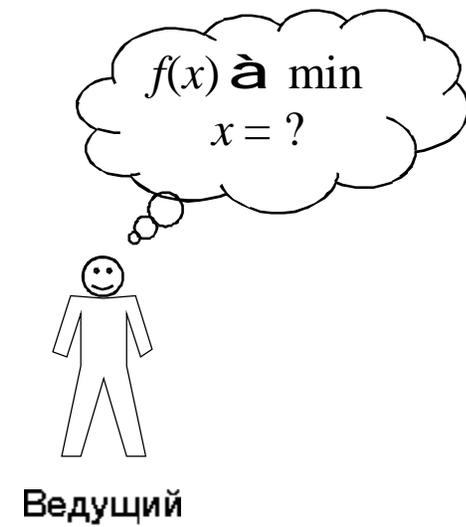
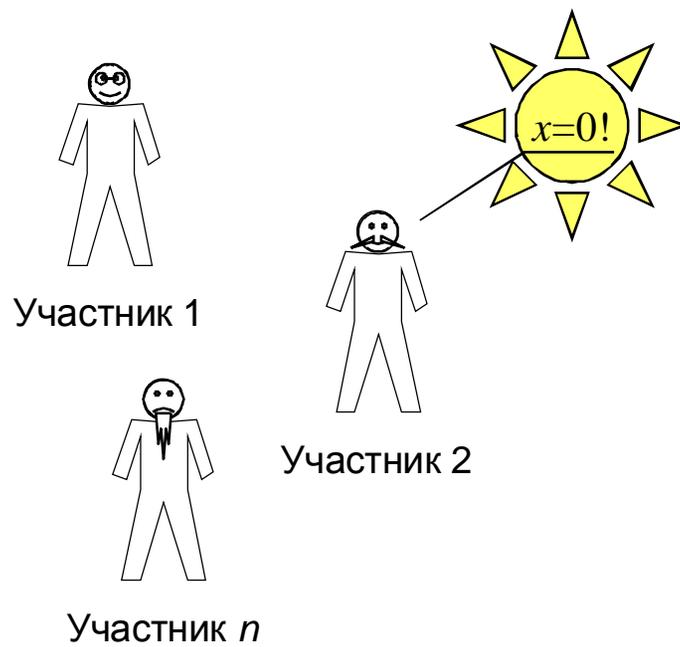
1.1. Игра



1.1. Игра



1.1. Игра





1.1. Игра

- Нет априорной информации о функции f и ее свойствах.
- Выбор игроками «разумной» стратегии игры с учетом предыдущих действий.
- Поиск ответа (решения) осуществляется «вслепую», методом проб и ошибок.

1.1. Основные виды ЭА

- *Генетический алгоритм (ГА) (Genetic algorithm)* – новые решения генерируются участником на основе «своих» данных и данных других участников
- *Эволюционные стратегии (Evolution Strategies)* – новые решения генерируются участником на основе преимущественно «своих» данных
- *Генетическое программирование (Genetic Programming)* – разновидность ГА, в качестве решений выступают компьютерные программы и алгоритмы
- *Искусственная жизнь (Artificial Life)* – моделирование процессов адаптации и взаимодействий синтетических организмов в искусственных средах.
- *Параллельные ЭА (Parallel EAs)* – используют несколько популяций.

1.1. «Классические» модели ЭА

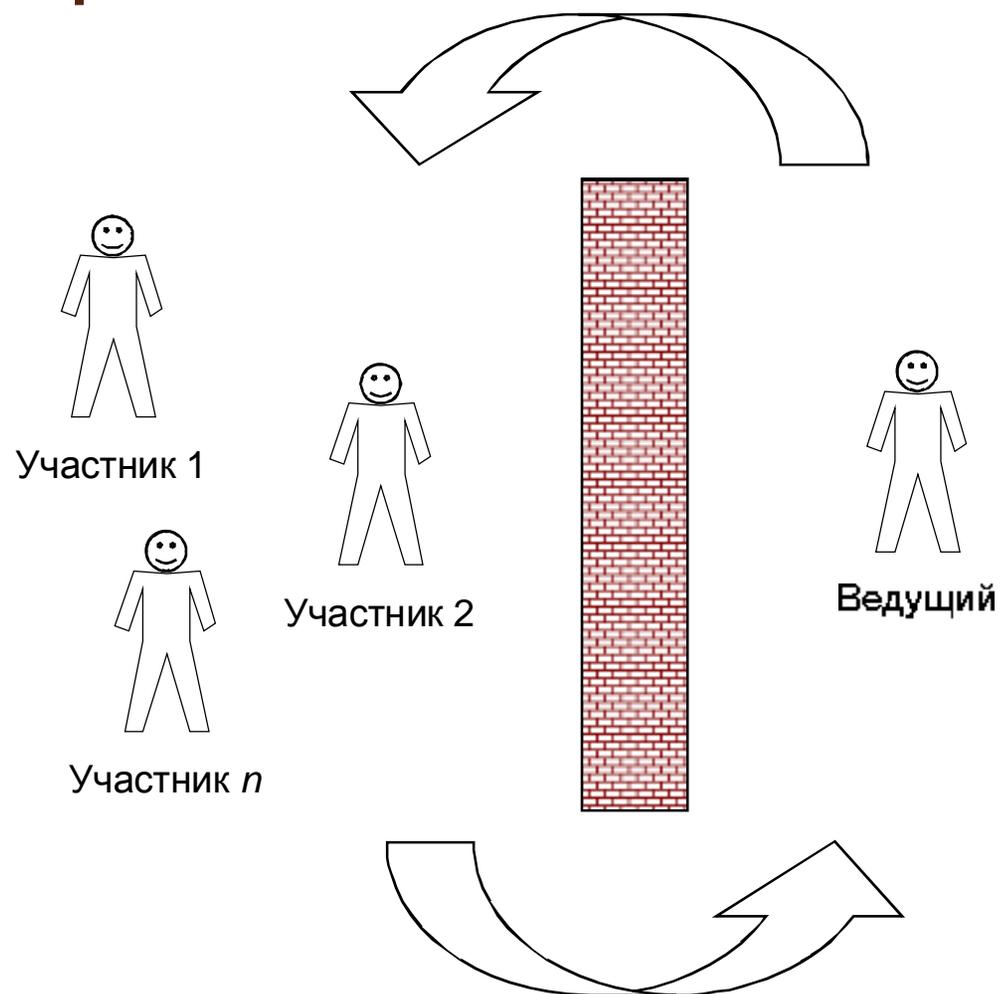
«Неконкурентная»
модель



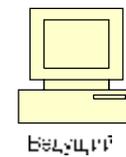
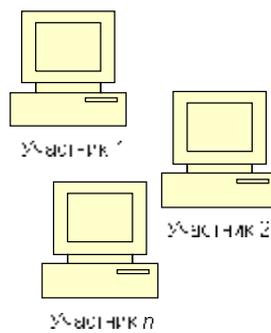
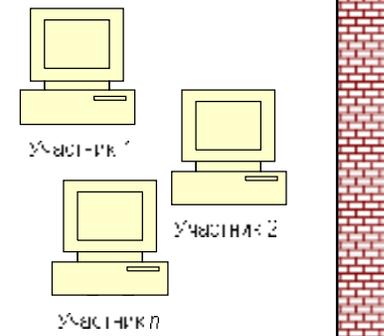
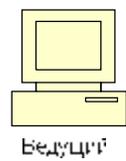
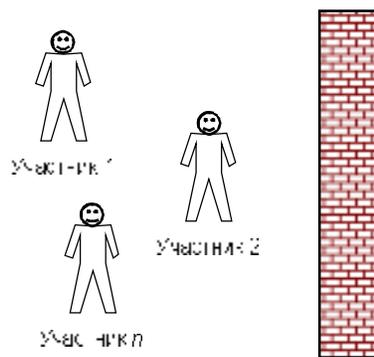
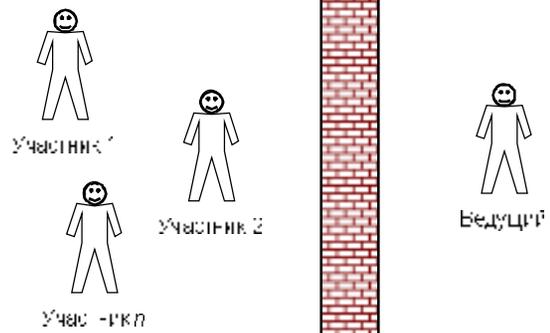
«Конкурентная»
модель



1.1. Игра



1.1. Игра

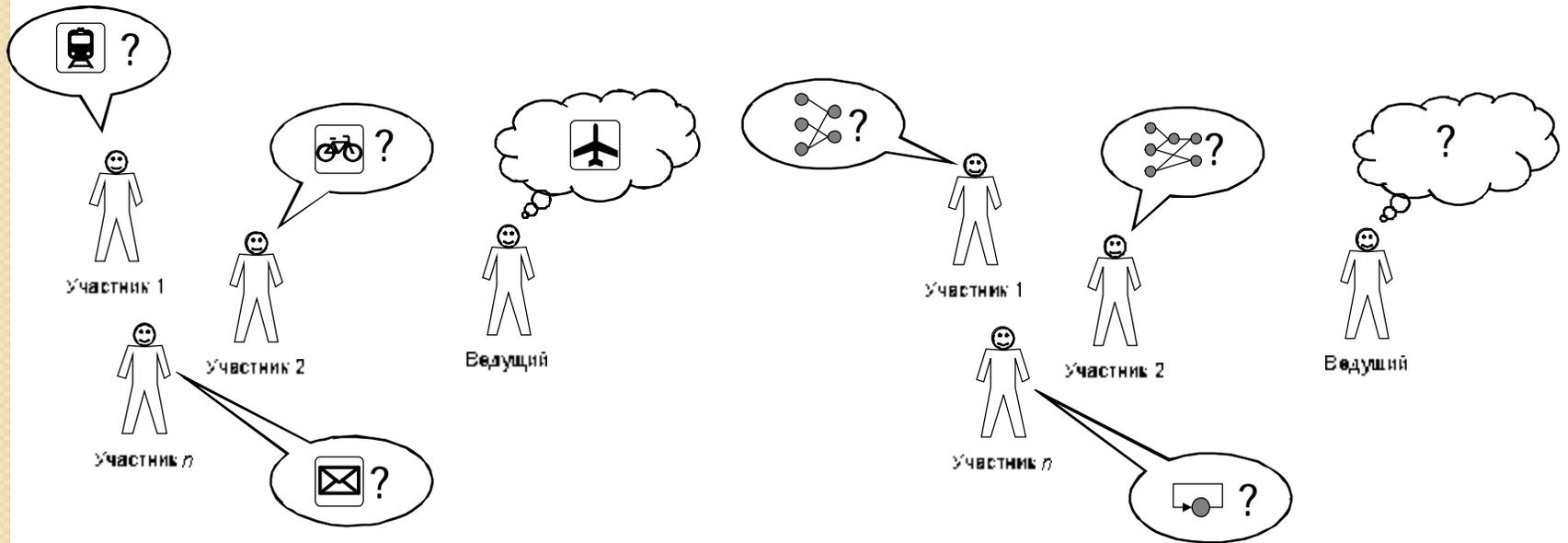
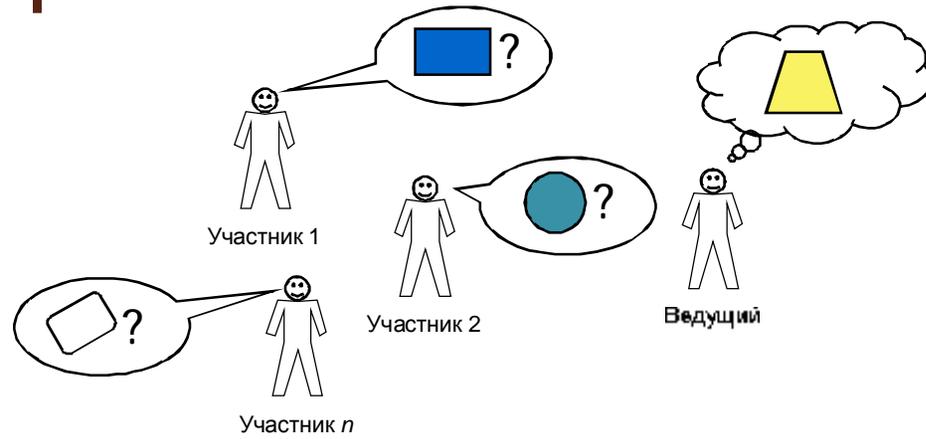


1.1. Игра

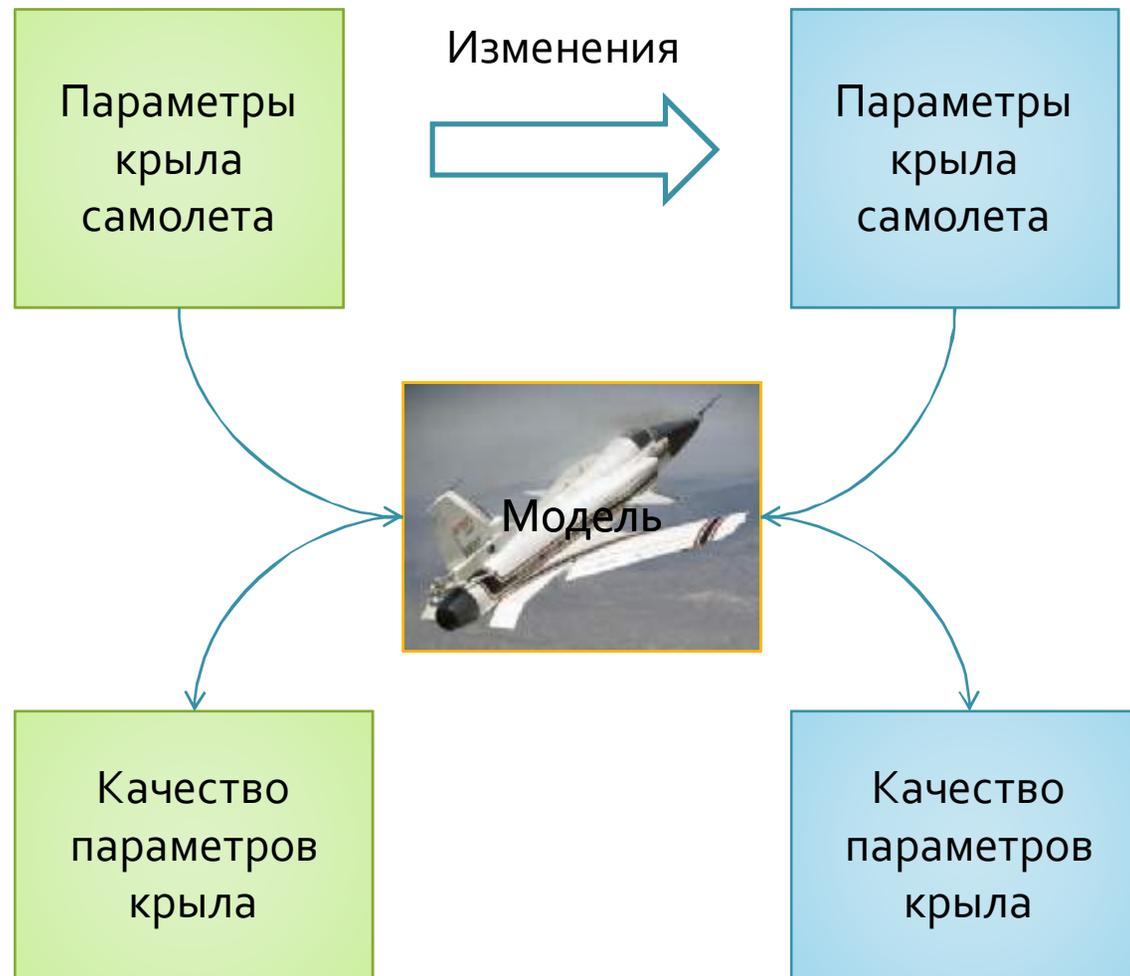


Что может загадать ведущий?

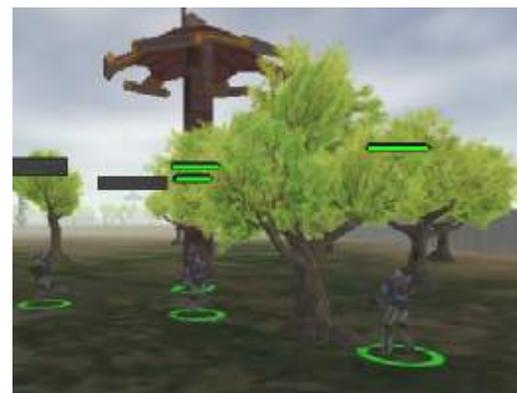
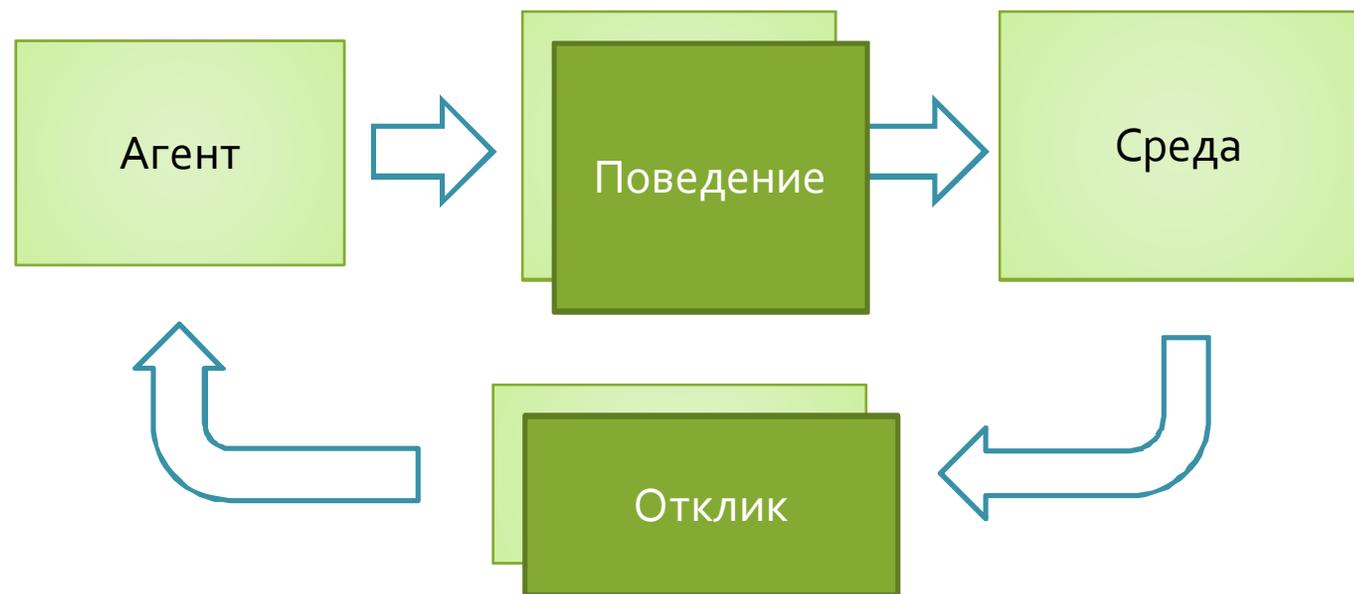
1.1. Игра



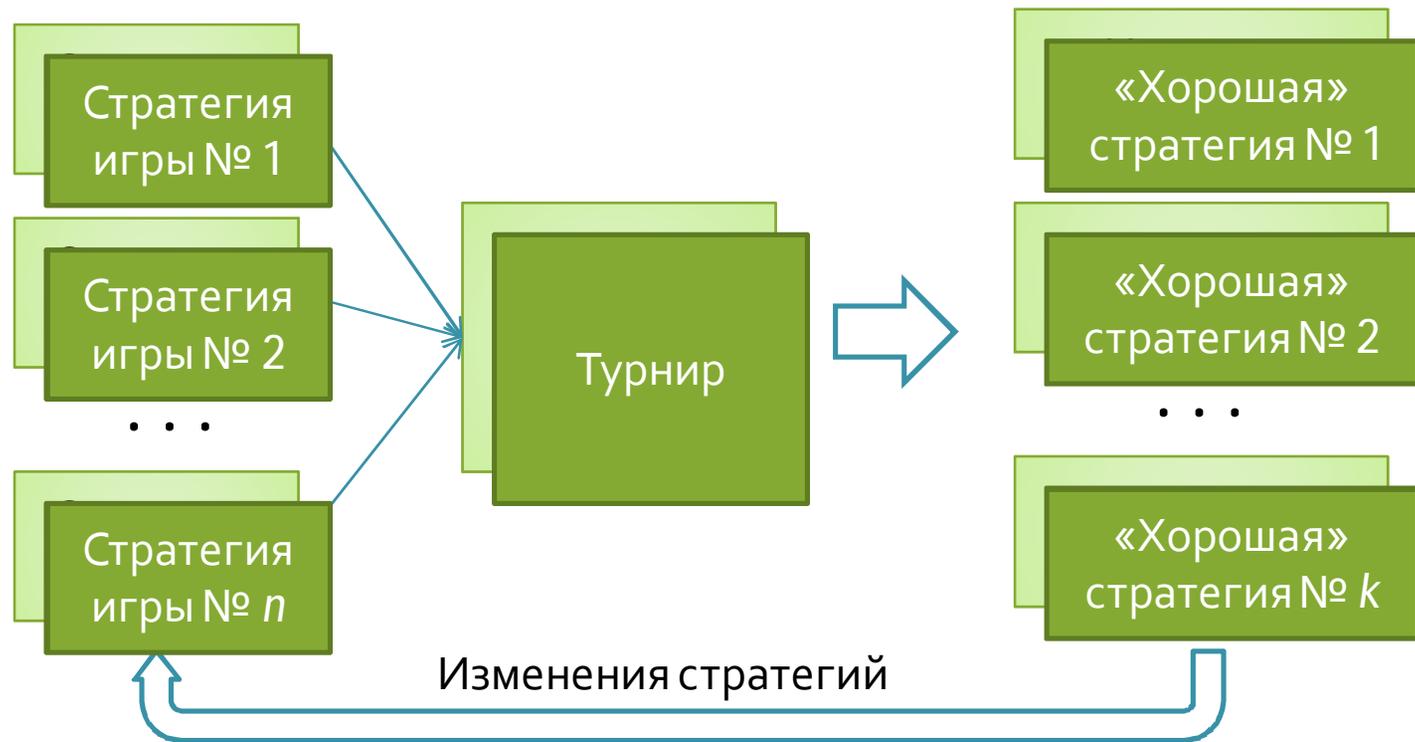
1.2. Пример. Синтез параметров геометрии крыла самолета



1.2. Пример. Адаптация поведения автономного агента



1.2. Пример. Поиск игровой стратегии

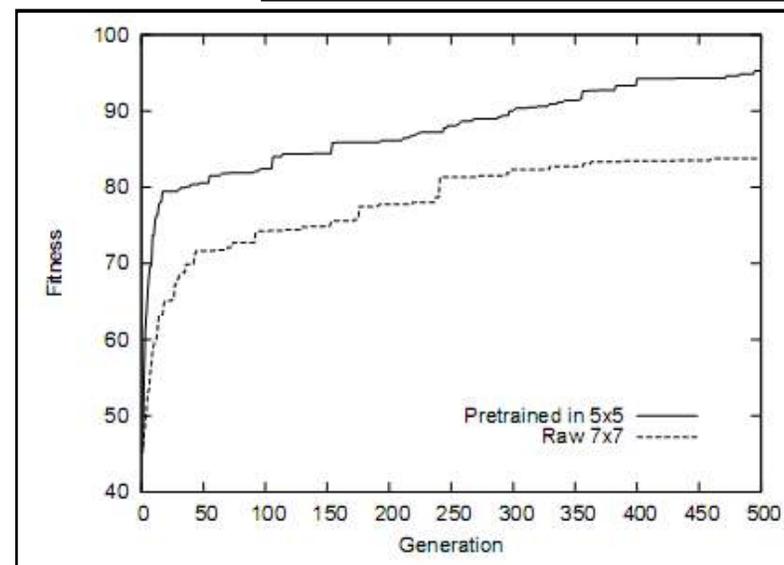
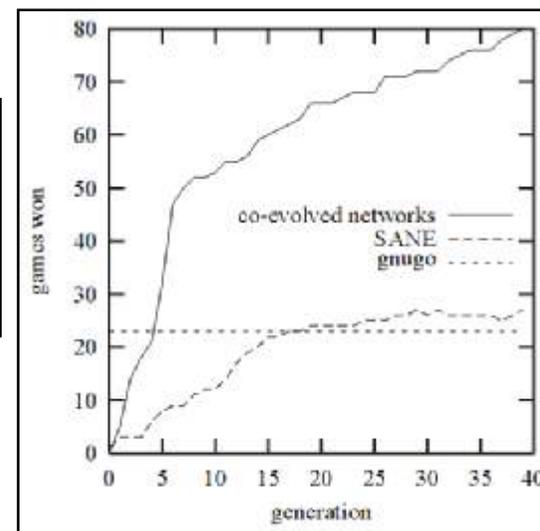
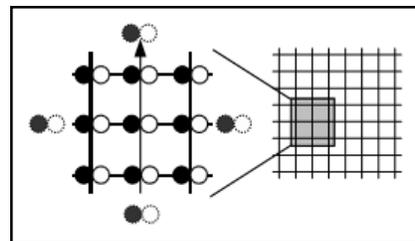


1.2. Пример. Поиск игровой стратегии

Команда 1

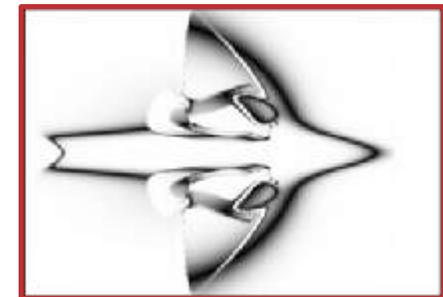
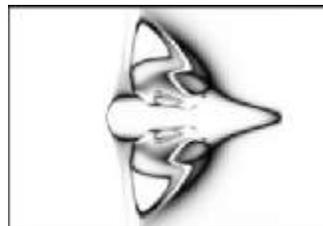
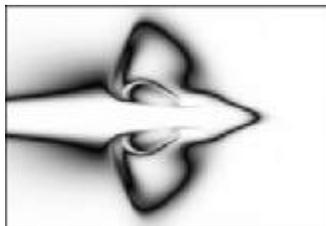
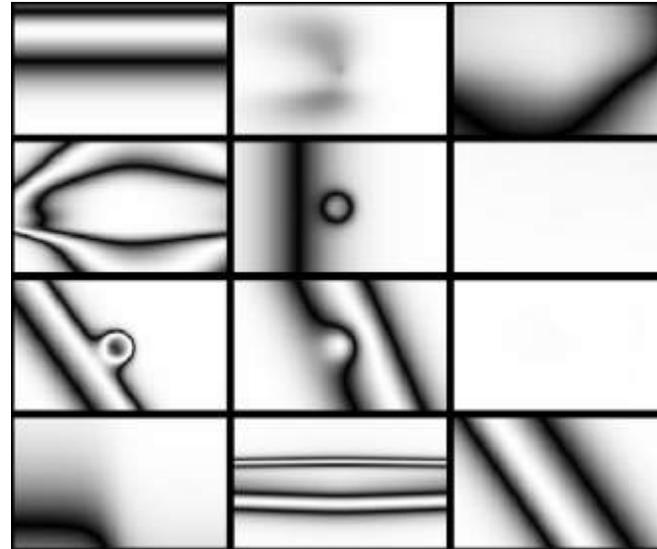
VS

Команда 2



Кадры из к/ф «Игры разума»

1.2. Пример. Генерация искусственных изображений



Изображения из статьи: Stanley K. Patterns Without Development. 2006

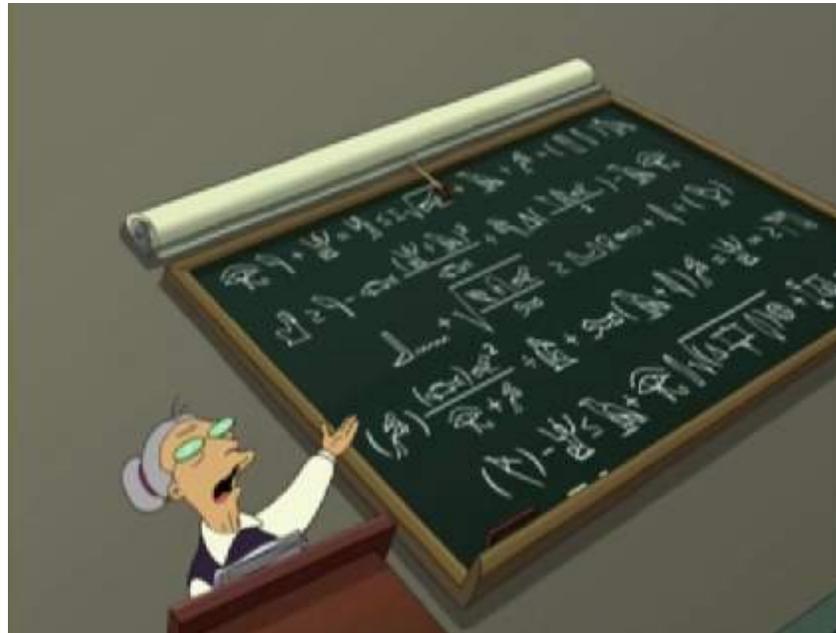
Мы, Ниблонианцы, - древняя и могущественная раса. Трепещи!
Когда Вселенная только выковывалась в горниле Большого
взрыва, нашей великой расе было уже 17 лет.

Футурама

День, когда Земля отупела



КРАТКАЯ ИСТОРИЯ



2. Краткая история. Невнимательно прочитанная статья Тьюринга



А. Тьюринг
1912-1954

Малоизвестный факт: Алан Тьюринг *предвосхитил* появление эволюционных вычислений и обучения с подкреплением.

Тьюринг А. Могут ли машины мыслить? 1950.

Структура обучающейся машины – **наследственный материал**.

Изменения, происходящие в обучающейся машине – **мутации**.

Решение экспериментатора – **естественный отбор**.

2. Первые опыты



Н.А. Баричелли
1912-1993

Нильс Баричелли: Первые опыты по компьютерному моделированию процесса эволюции путем мутаций и симбиогенеза в искусственных средах (1953, 1954 и далее). Прародитель направления «[Искусственная жизнь](#)», [A-Life](#).

Алекс Фрейзер
1923–2002

Алекс Фрейзер: Моделирование эволюции битовых строк для более глубокого понимания биологических процессов (1957 и далее). Предтеча [генетического алгоритма](#).

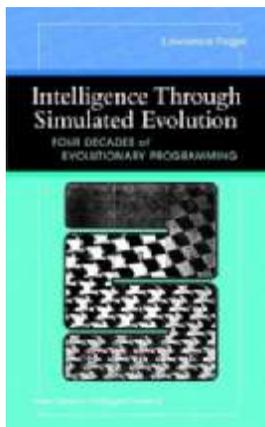
Х.И. Бремерманн
1926-1996

Ханс Иоахим Бремерманн: Одни из первых теоретических работ по эволюционным алгоритмам. Оценки эффективности и оптимальных значений параметров.

2. Эволюционное программирование



Л. Дж. Фогель
1928-2007



Лоуренс Дж. Фогель – Эволюция конечных автоматов: **Эволюционное программирование**. Применение ЭП для решения задач прогнозирования, идентификации, управления и распознавания образов.

Первая книга по эволюционным вычислениям:
L.J. Fogel, A.J. Owens, and M.J. Walsh, Artificial Intelligence through Simulated Evolution, John Wiley, NY, 1966.

Русскоязычный перевод:

Фогель Л., Оуэнс А., Уолш М. Искусственный интеллект и эволюционное моделирование: Пер. с англ. М.: Мир, **1969**. 232 с.

2. Генетический алгоритм



Д.Г. Холланд
1929 – ...

Джон Холланд – исследование механизмов адаптации. Первая книга по ГА (1975).
Репродуктивный план. Теорема шаблонов.
Системы обучающихся классификаторов.
Сложные адаптивные системы.



К.А. Де Йонг
???

Кеннет Де Йонг – одно из первых обстоятельных исследований генетического алгоритма (1975).
Элитаризм. Нишинг. Адаптация параметров ГА.
Тестовый набор Де Йонга.



Д.Э. Голдберг
1953 – ...

Дэвид Голдберг – Строительные блоки.
Связанность в ГА. Адаптация параметров. Одна из самых цитируемых книг по ГА (1989).
Эволюционное проектирование.

2. Эволюционные стратегии



И. Рехенберг
1934 – ...

Инго Рехенберг – разработал в 1960-х годах метод оптимизации, названный **эволюционная стратегия**. Первое серьезное применение эволюционного подхода к решению инженерной задачи: проектирование крыла самолета.



Х.-П. Швельф
1940 – ...

Ханс-Поль Швельф – со-родитель эволюционных стратегий. Адаптация и самоадаптация параметров эволюционного алгоритма. Оценки эффективности эволюционных стратегий.

2. Генетическое программирование

Р.М. Фридберг (???) – эволюция программ на машинном языке (1958). Решение простых задач. Прародитель **генетического программирования**.



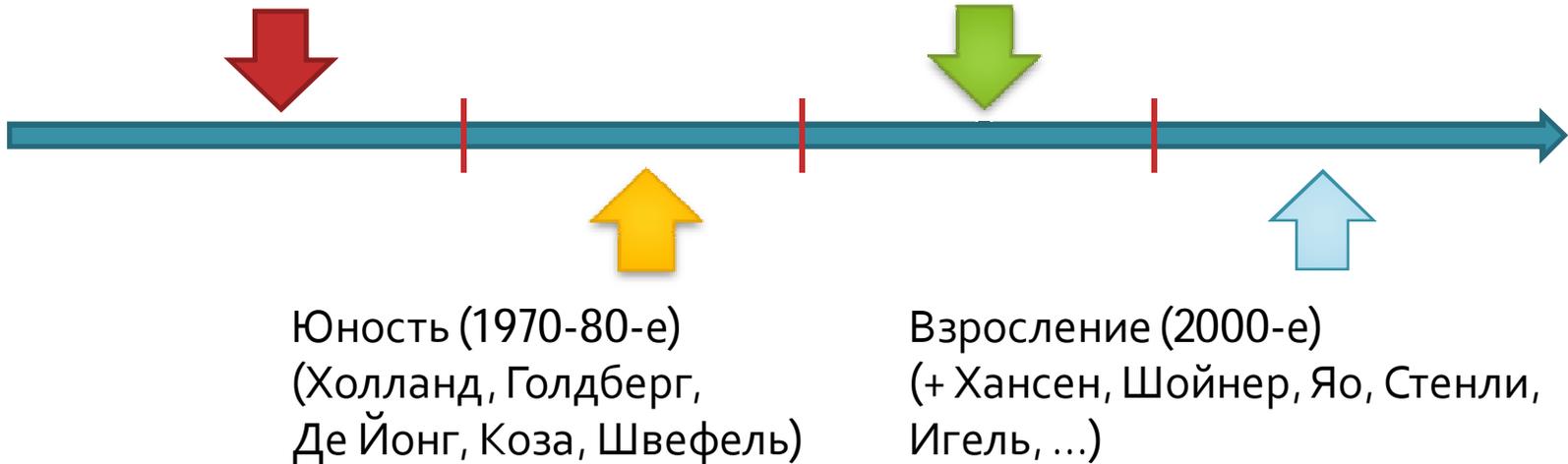
Д. Коза

Джон Коза – адаптация генетического алгоритма для автоматического синтеза компьютерных программ (конец 80-х) на символьном языке (часто используется Лисп и Лисп-подобные языки) – **Генетическое программирование**.

2. Краткая история ЭВ. Этапы

Рождение... (1950-е – 1970-е)
(Фрейзер, Фогель, Холланд,
Рехенберг, Швевель,...)

Бурные 90-е (конец 80-х – 1990-е)
(+ Бейер, Бекк, Уитли, Фогель, Ленгдон,
Деб, Шмидхубер, Флореано, Банжаф, ...)



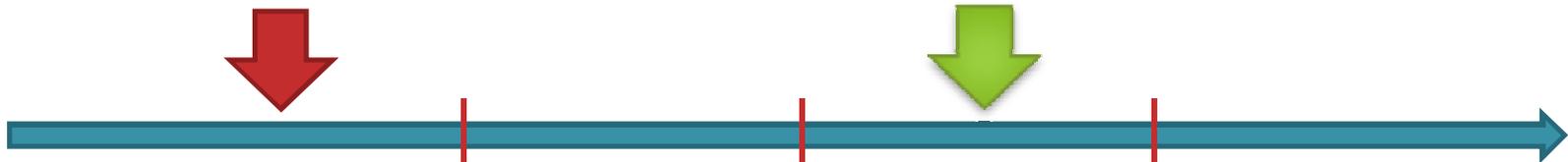
2. Краткая история ЭВ. Этапы

Рождение... (1950-70-е)
(Фрейзер, Фогель, Холланд,
Рехенберг, Швевель,...)

идеи, первые эксперименты,
исследования и результаты

Бурные 90-е (конец 80-х – 1990-е)
(+ Бейер, Бекк, Уитли, Фогель, Ленгдон,
Деб, Шмидхубер, Флореано, Банжаф, ...)

активные исследования, получено очень
большое количество результатов



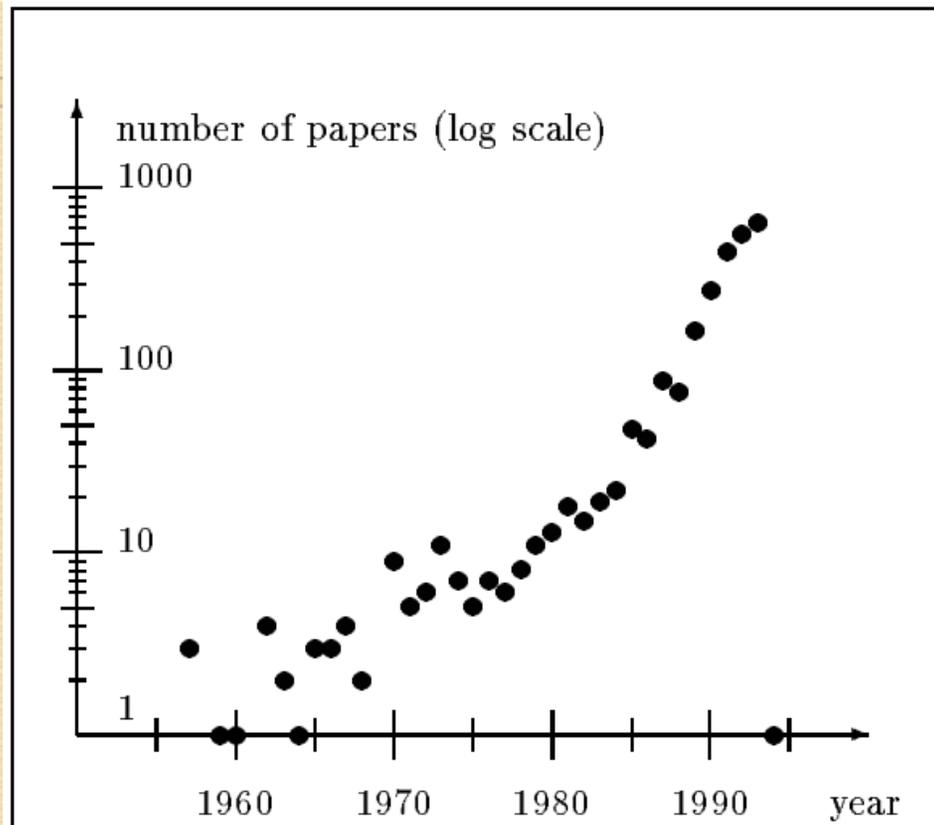
Юность (1970-80-е)
(Холланд, Голдберг,
Де Йонг, Коза, Швевель)

развитие идей, рост «в
глубину»

Взросление (2000-е)
(+ Хансен, Шойнер, Яо, Стенли,
Игель, ...)

серьезные практические
приложения,
вариации на тему,
гибридные методы

Динамика публикаций



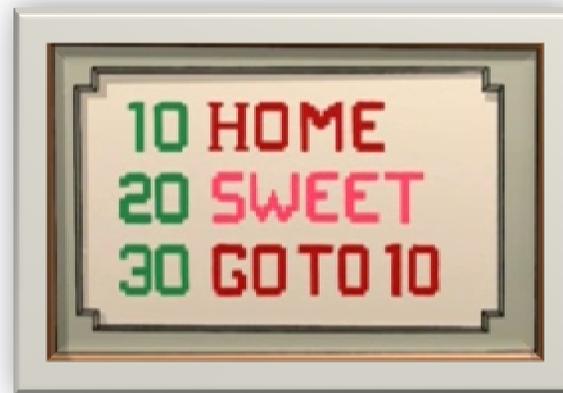
<i>type</i>	<i>number of items</i>
book	32
part of a collection	139
journal article	544
proceedings article	1377
proceedings	32
report	244
manual	2
PhD thesis	87
M.Sc. thesis	49
manucripts	1
others	14
<i>total</i>	2521

Jarmo T. Alander «An indexed bibliography of genetic algorithms: Years 1957-1993» (1995)

На днях ощутил все величие наследия СССР. Починил итальянскую стиральную машину при помощи инструментов из советского детского конструктора.
bash.org.ru



А ТЕМ ВРЕМЕНЕМ В СССР...



3. А тем временем в СССР...

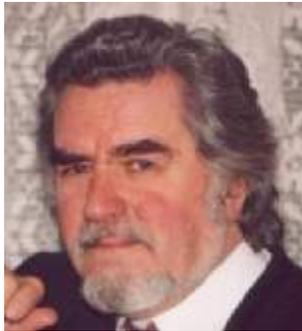
Вариации на тему:

- Метод группового учета аргументов (А.Г. Ивахненко)
- Статистические методы случайного поиска (Л.А. Растригин)

Очень многое началось с перевода той самой книги Л. Фогеля, А. Оуэнса и М. Уолша.

Основные действующие лица: *Л.А. Растригин, И.Л. Букатова, Ю.И. Неймарк*

3. А тем временем в СССР...



1929-???



Растригин Леонард Андреевич – бионические методы, эволюционное моделирование.

Эволюционное моделирование – структурная адаптация сложных систем.

Эволюционная адаптация конечного автомата.

Эволюционная адаптация структуры графов:

- компоновка электронной аппаратуры,
- сегментация ПО вычислительной системы,
- расположение блоков информации на магнитных лентах.

Эволюционная адаптация структуры решающих правил.

Адаптация структуры перцептрона.

Растригин Л.А. Адаптация сложных систем. Рига, "Зинатне", 1981, 376 стр.

3. А тем временем в СССР...



Букатова Инесса Леонидовна

Эволюционное моделирование – замена процесса моделирования сложной системы моделированием ее эволюции.

Задачи:

- Прогнозирование.
- Распознавание образов.
- Управление.

Букатова И. Л. Эволюционное моделирование и его приложения. М., Наука, 1979. 230 с.

Букатова И.Л., Михасев Ю.И., Шаров А.М. Эвоинформатика: Теория и практика эволюционного моделирования: учебное пособие. - М. : Наука, 1991. - 205 с.



3. А дальше?

То были 70-80-е.

90-е и 2000-е:

- Батищев Д.И.
- Емельянов В.В.
- Курейчик В.М.
- Норенков И.П.
- Редько В.Г.
- Ярушкина Н.Г.

3. Апогей

1996

Июнь 1996 г.: First International Conference on Evolutionary Computation and its Applications (EvCA'96), г. Москва.

Участвовали многие известные зарубежные и отечественные специалисты: К. Де Йонг, Д. Голдберг, В.В. Емельянов, Л. Ешельман, В.М. Курейчик, М. Митчелл, Д. Шаффер.

К сожалению, второй конференции уже не было...

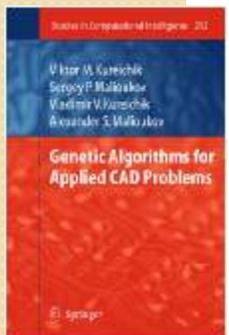
3. Новое время



С 1992 года научная школа Виктора Михайловича Курейчика «Эволюционное моделирование, генетические алгоритмы и интеллектуальные САПР» (г. Таганрог) регулярно проводит международные конференции по искусственным и интеллектуальным системам, где большую часть занимает тематика генетических алгоритмов и эволюционных вычислений.

Последние монографии:

1. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы / Под ред. В.М. Курейчика - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006 - 320с.
2. Курейчик В.М., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Поисковая адаптация: теория и практика. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006 - 272с.
3. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М., Сороколетов П.В. Биоинспирированные методы в оптимизации. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009 - 384с.
4. В.М. Курейчик, Р.В. Потарусов, Гонкалвес Ж. Бионические методы упаковки блоков. - Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009 - 120с.
5. Kureichik V.M., Malioukov S.P., Kureichik V.V., Malioukov A.S. Genetic algorithms for Applied CAD Problems. - Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, 2009 - 236с.



3. Новое время



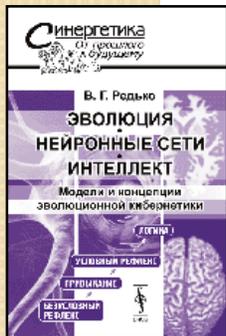
Редько Владимир Георгиевич

Проблема происхождения интеллекта человека, эволюционная кибернетика, модели адаптивного поведения, нейроинформатика.

Основные публикации:

1. Редько В.Г. Эволюция, нейронные сети, интеллект. Модели и концепции эволюционной кибернетики. М.: УРСС, 2005.
2. Редько В.Г. Эволюционная кибернетика. М.: Наука, 2001
3. Редько В.Г. Интернет-лекции "Эволюционная кибернетика" (1999):

www.keldysh.ru/pages/BioCyber/Lectures.html



- Докажи мне средневековыми методами, что существуют атомы.

- Пожалуйста на костёр.

bash.org.ru



4. ЭА В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ

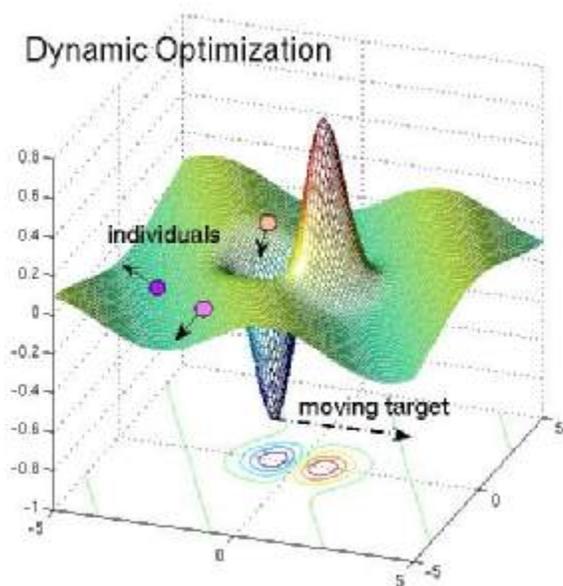


4. ЭА в настоящее время

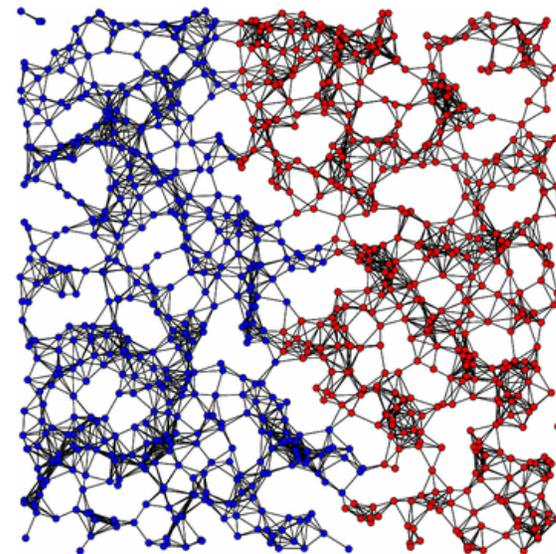
- Проводятся крупные международные конференции (за рубежом):
 - GECCO (*Genetic and Evolutionary Computation COnference*),
 - IEEE CEC (*Congress on Evolutionary Computation*),
 - PPSN (*Parallel Problems Solving from Nature*),
 - Evo* (целое семейство европейских конференций).
 - FOGA (*FOundation of Genetic Algorithms*)
 - ...
- Издаются специализированные научные журналы (за рубежом):
 - MIT Evolutionary Computation
 - IEEE Transactions On Evolutionary Computation
 - ...
- Работают профессиональные сообщества (за рубежом).
- Издаются книги (в основном за рубежом, в России выходит 1-2 книги в «урожайный» год, за рубежом десятки).

4. Активные направления

— Эволюционная оптимизация и проектирование.



Численная оптимизация

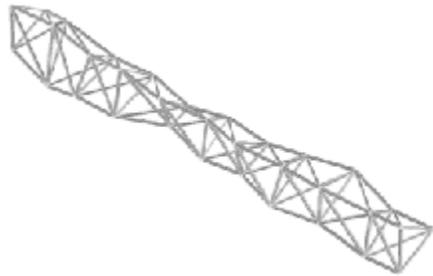


Решение задач на графах

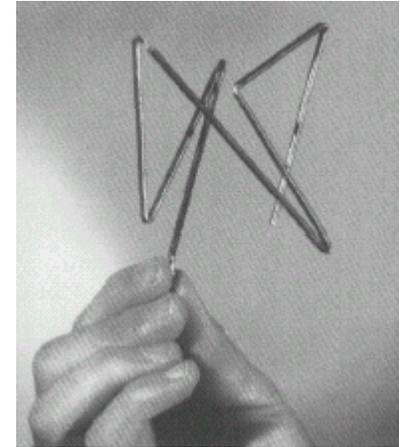
Рисунки с сайта:

http://www.ra.cs.uni-tuebingen.de/forschung/combopt/welcome_e.html

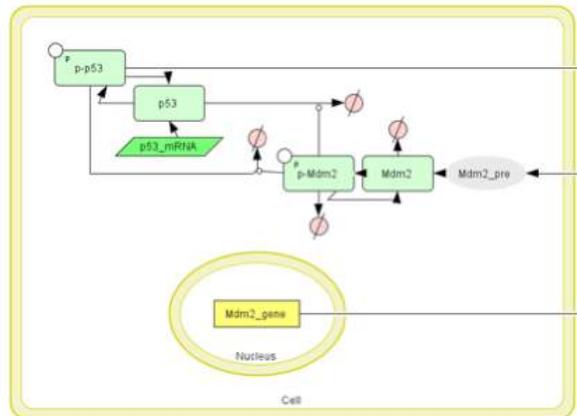
4. Эволюционная оптимизация и проектирование.



Оптимизация несущих ферм,
устойчивых к вибрациям



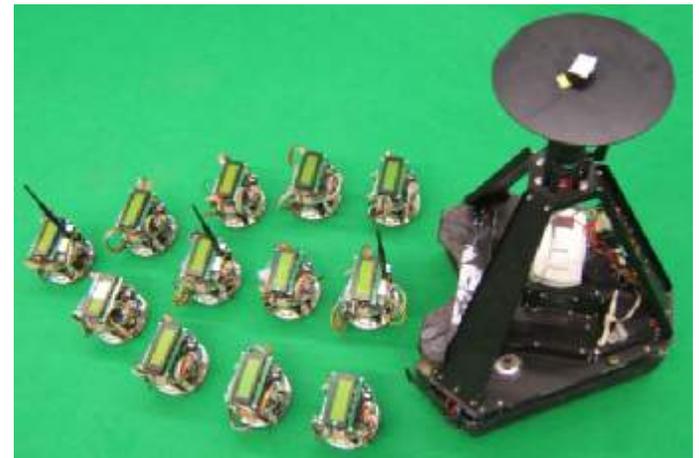
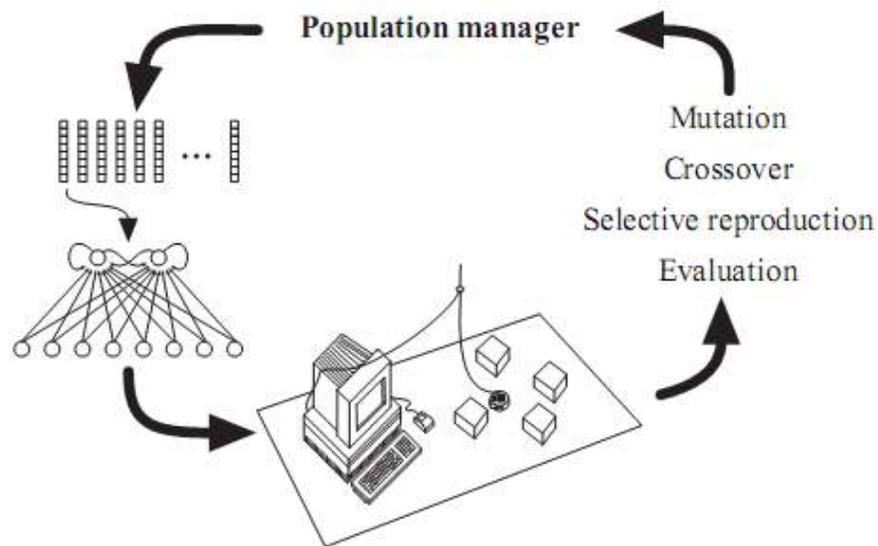
Оптимизация структуры и
параметров антенн



Оптимизация
электрических цепей

4. Активные направления

– Эволюционная робототехника

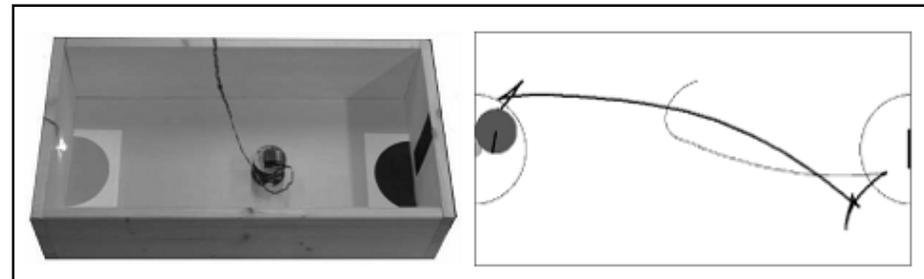
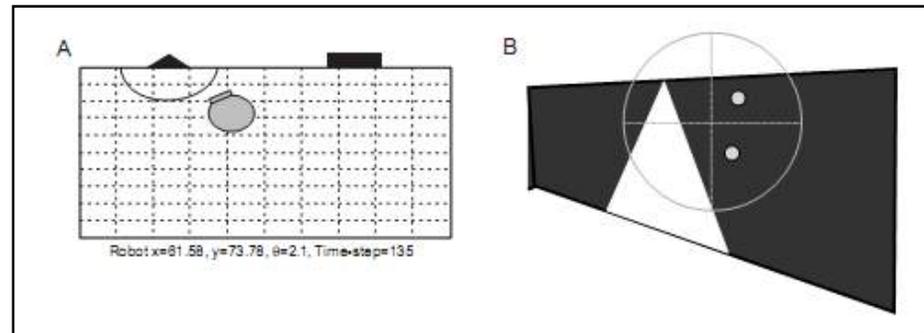


http://www.ra.cs.uni-tuebingen.de/forschung/combopt/welcome_e.html

Floreano D., Husband P., Nolfi S. (2008).
Evolutionary Robotics / in Siciliano B.,
Oussama Khatib (eds.), Handbook of Robotics,
Berlin: Springer Verlag

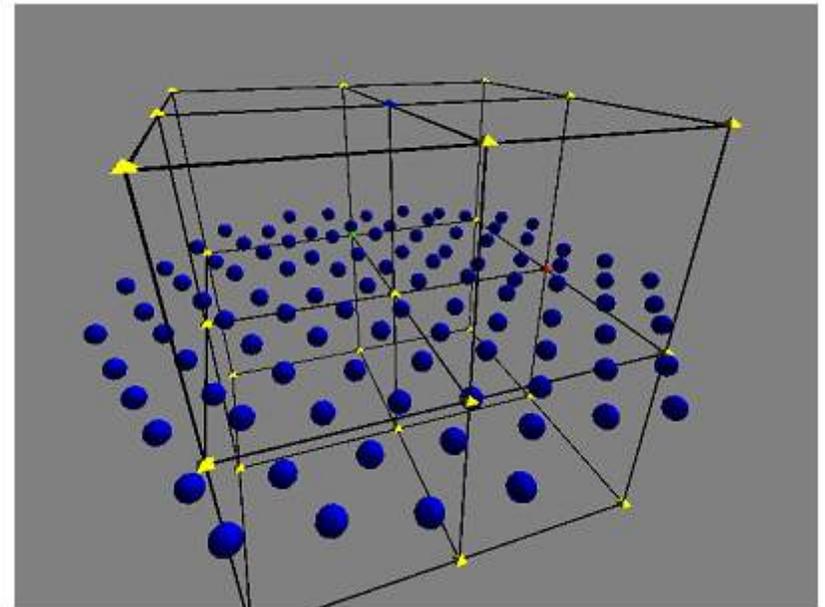
4. Эволюционная робототехника

Управление одиночным роботом.
Процессы обучения и адаптации.



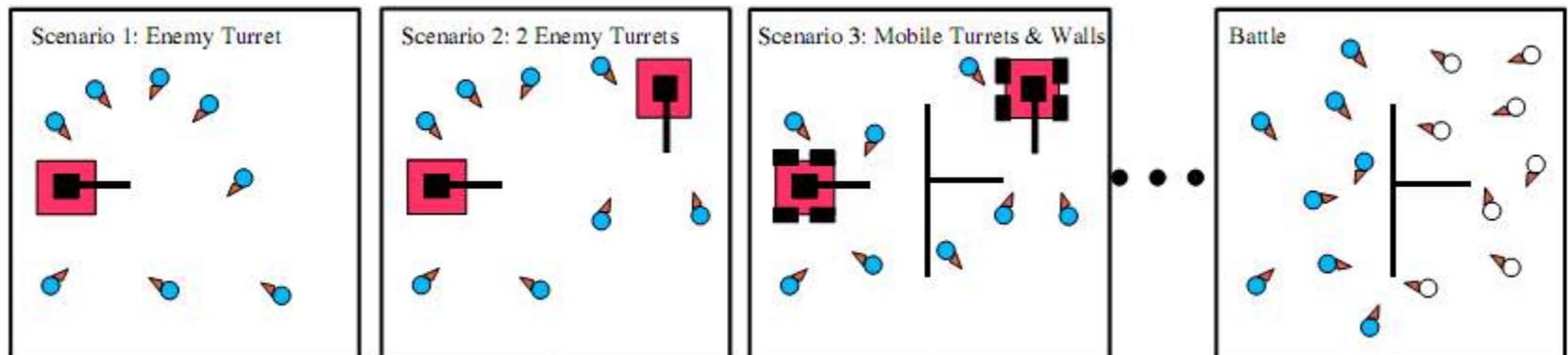
4. Эволюционная робототехника

Исследование синхронизации в управлении множеством роботов, располагающих только локальной информацией.



4. Активные направления

– Искусственная жизнь и адаптивное поведение



Использован рисунок из статьи Yong, Stanley, Miikkulainen, Karpov "Incorporating advice into neuroevolution of adaptive agents" (2006)

4. Адаптивное поведение

Тест Тьюринга для компьютерных ботов – BotPrize (<http://www.botprize.org/index.html>) – конкурс на лучшего бота с

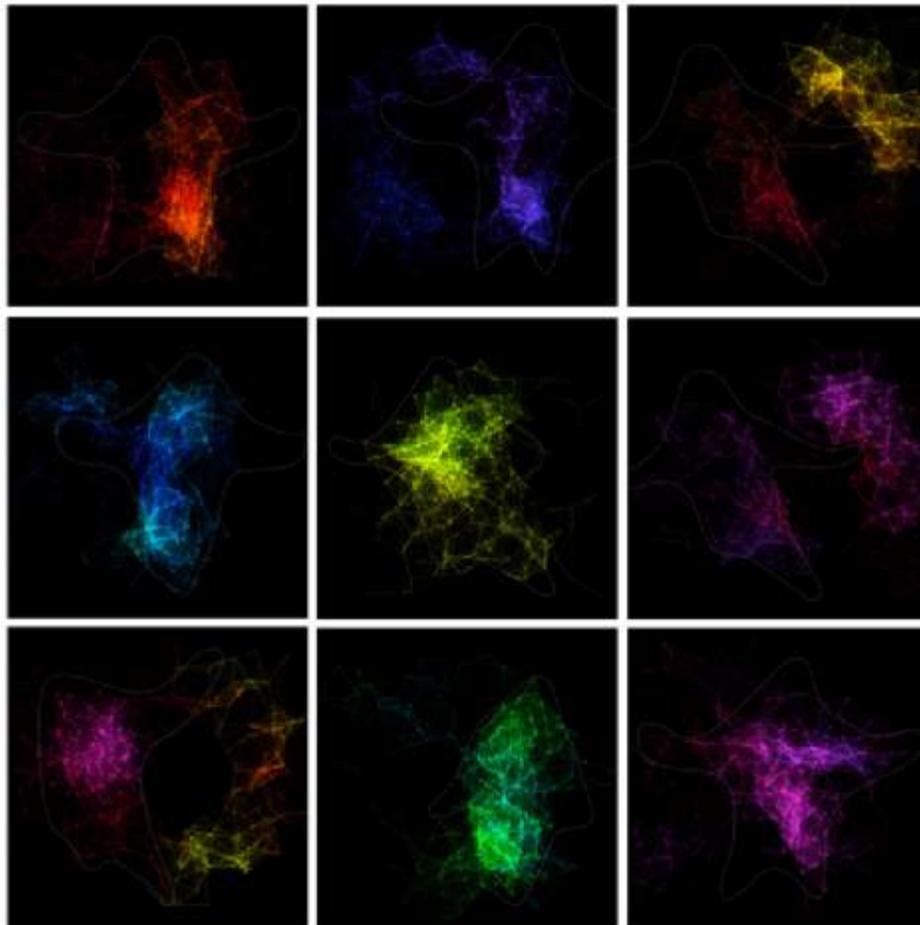
человекоподобным поведением для компьютерной игры Unreal Tournament 2004.



None of the bots was able to fool enough judges to take the major prize. But all the bots fooled at least one of the judges.

4. Искусственная жизнь

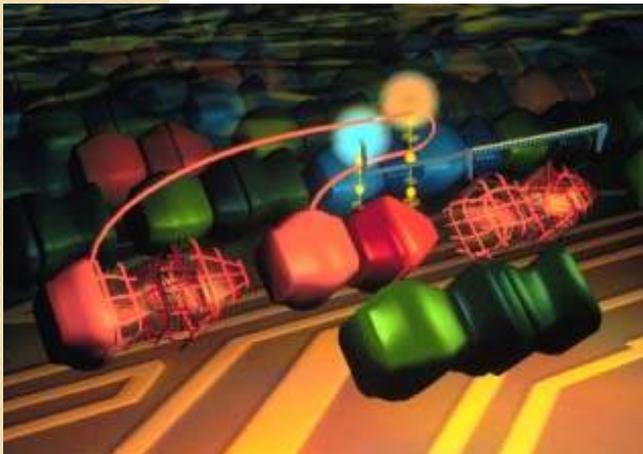
life-as-it-might-be



Проект Wirefire (John McCormack):

Виртуальная вселенная, в которой создания, перемещаясь, образуют сложные сети. Перемещения зависят от действий человека и его движений.

4. Искусственная жизнь



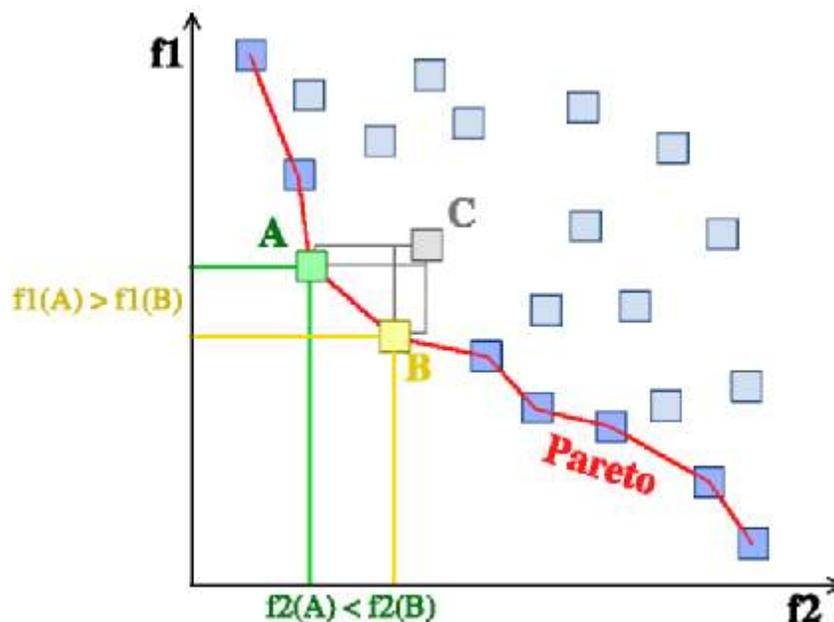
Проект Tierra (Thomas Ray):
Эволюция
самовоспроизводящихся
компьютерных программ,
борющихся за ресурсы –
компьютерное время и
память.

- Паразитизм и гипер-паразитизм.
- Сложные взаимодействия

4. Активные направления

– Эволюционная многокритериальная оптимизация.

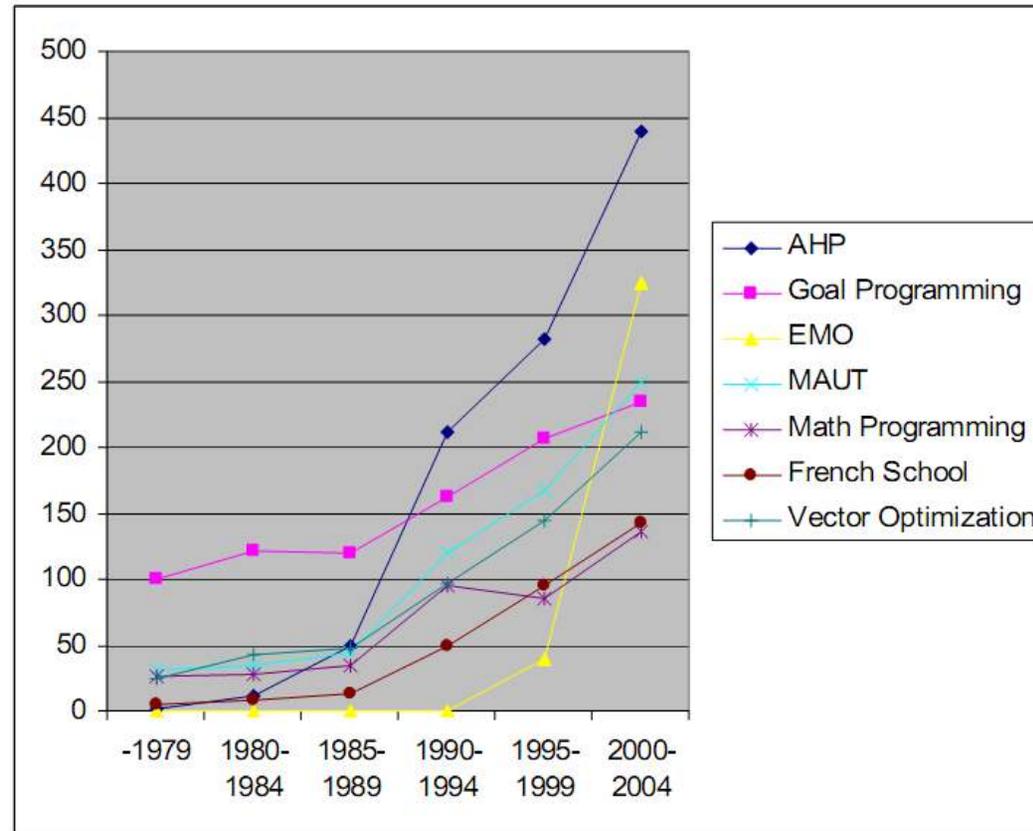
Очень активно развивается в течение последних 10-15 лет.



Наиболее известные алгоритмы:

- SPEA2
- NSGA-2
- MO-CMA-ES

4. Эволюционная многокритериальная оптимизация.



Jyrki Wallenius, James S. Dyer, Peter C. Fishburn, Ralph E. Steuer, Stanley Zionts and Kalyanmoy Deb Multiple Criteria Decision Making, Multiattribute Utility Theory: Recent Accomplishments and What Lies Ahead // Management Science. Volume 54 , Issue 7 (July 2008). Pages 1336-1349

4. Активные направления

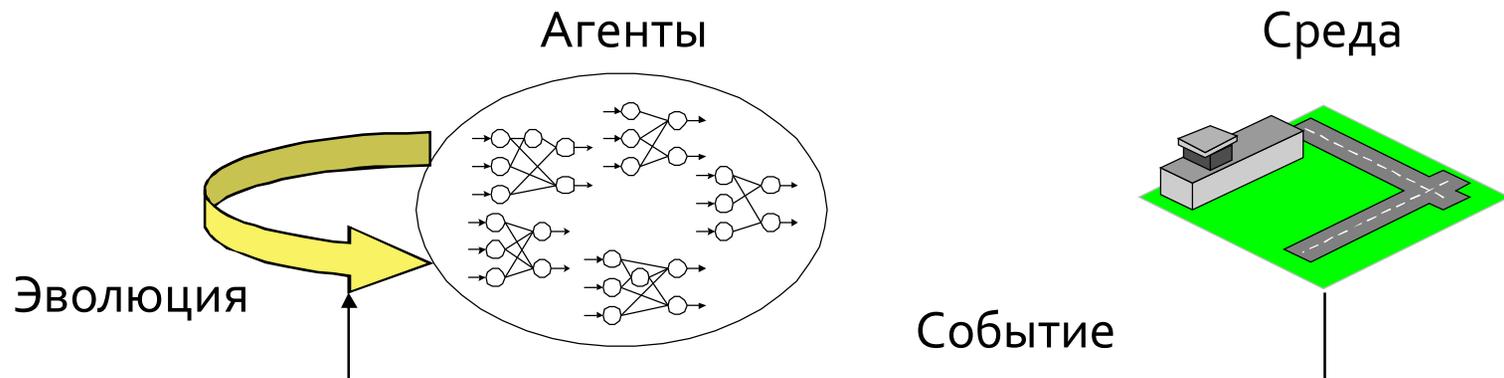
Гибридные методы.

ЭА

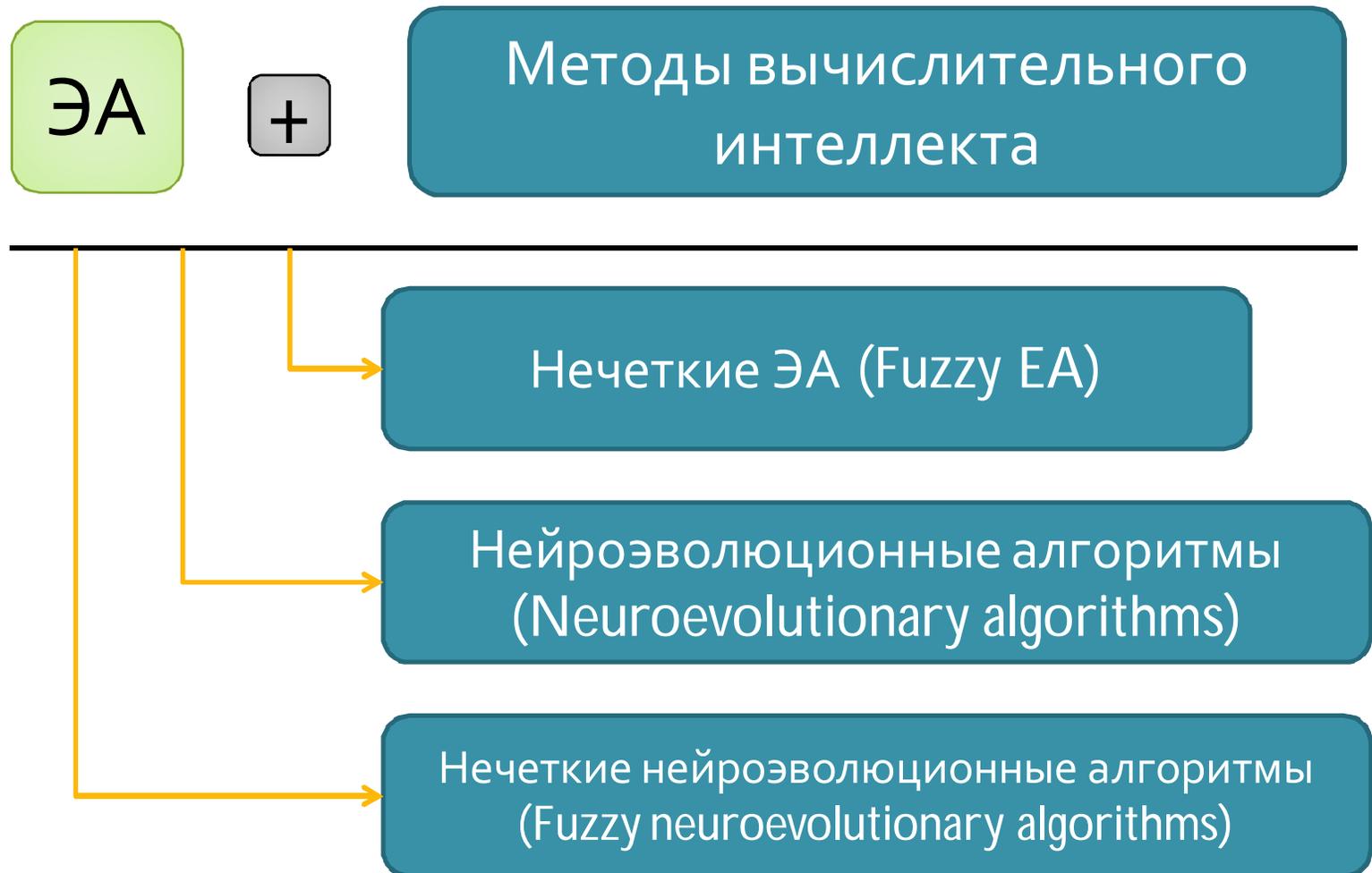
+

Методы вычислительного интеллекта

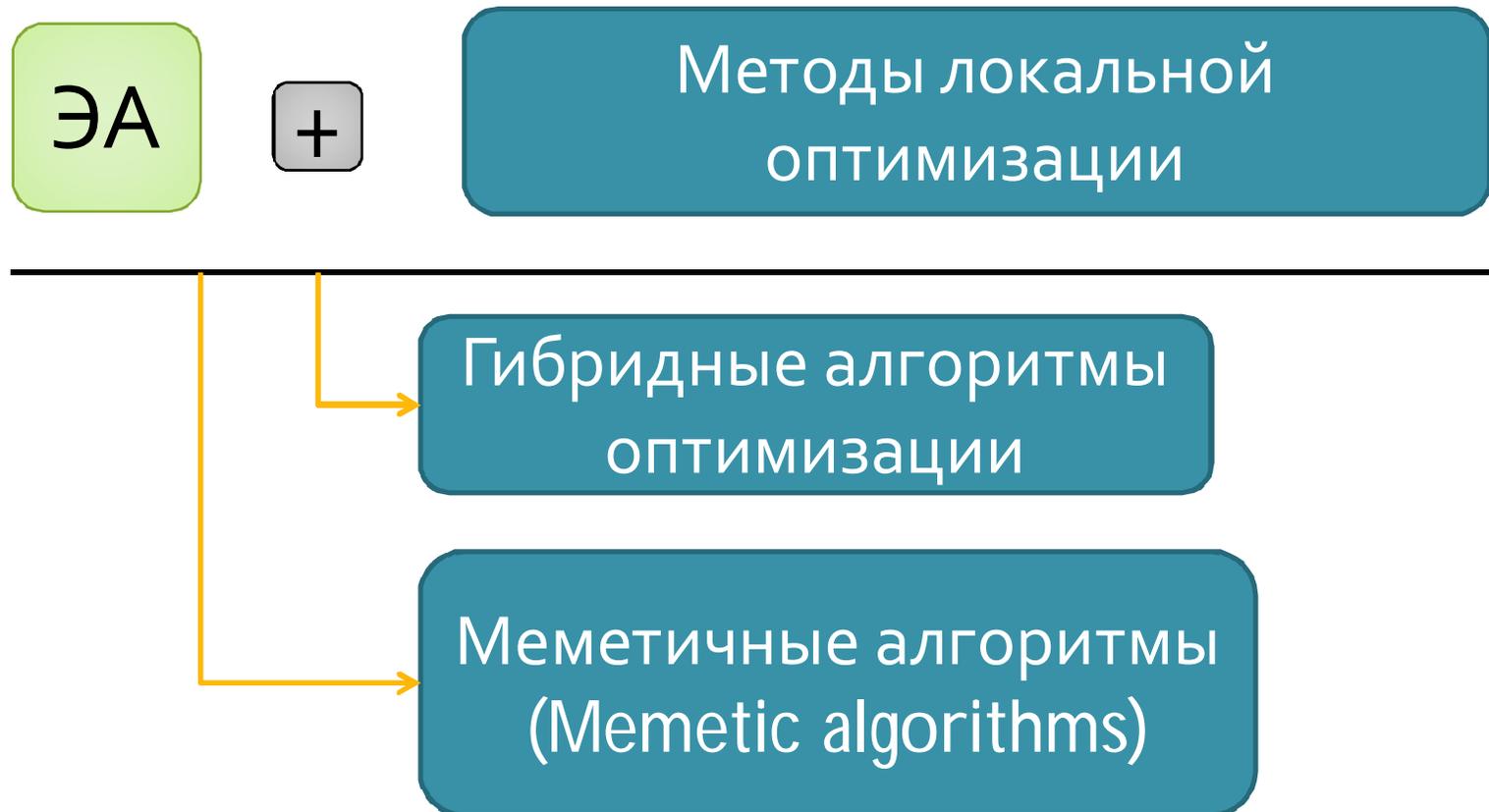
Методы локальной оптимизации

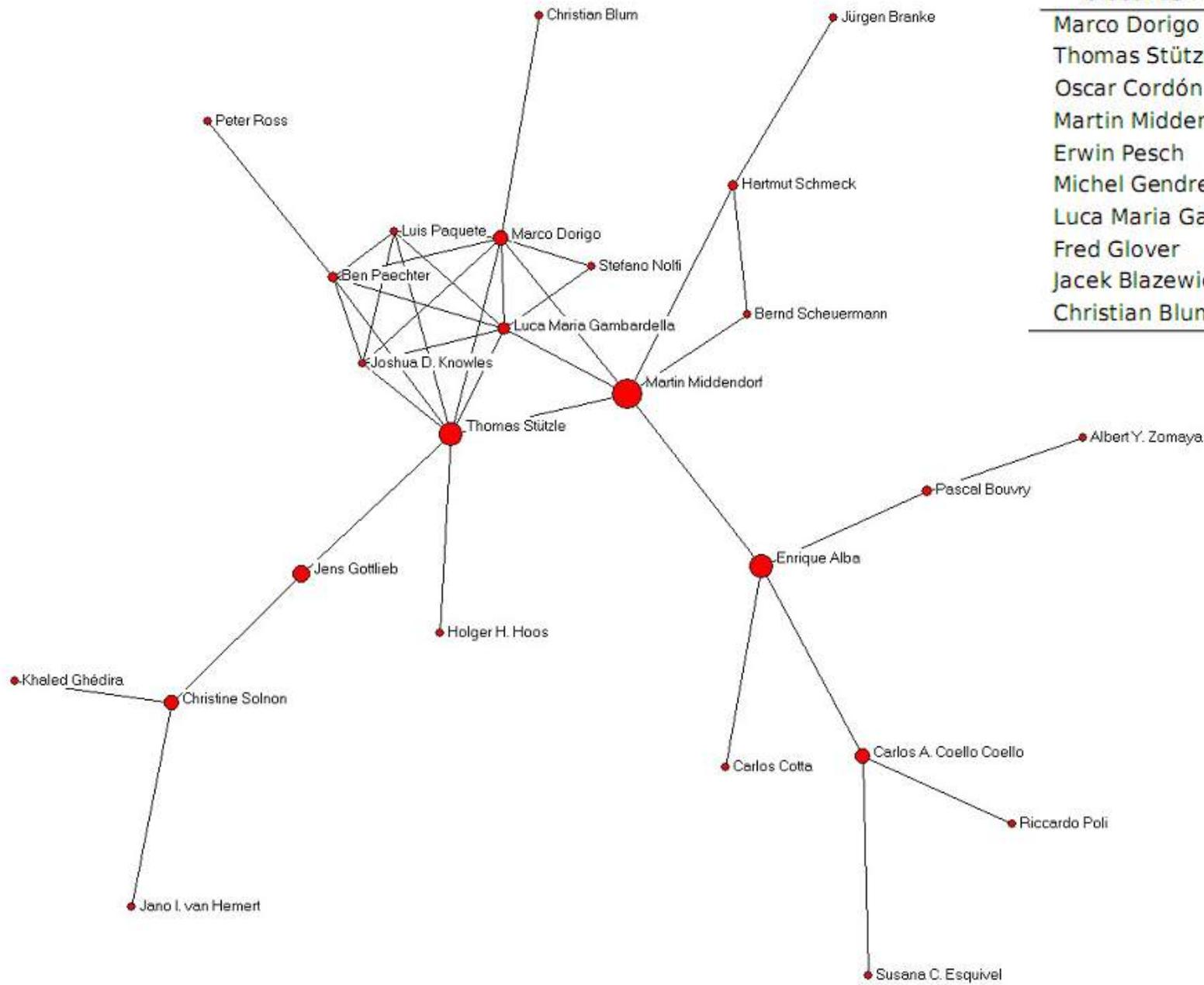


4. Гибридные методы



4. Гибридные методы





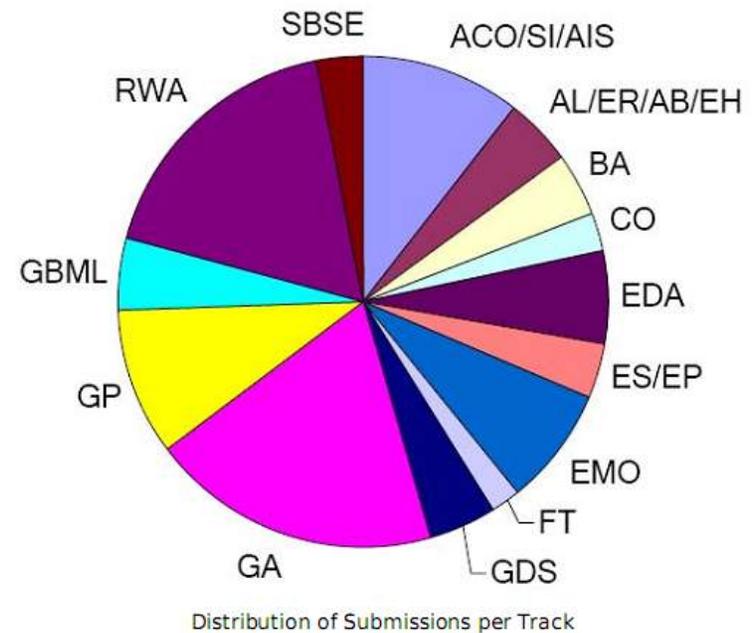
Global LS+EC+nECP network	
Marco Dorigo	444471
Thomas Stützle	293345
Oscar Cordón	247473
Martin Middendorf	246075
Erwin Pesch	233502
Michel Gendreau	214349
Luca Maria Gambardella	214056
Fred Glover	122235
Jacek Blazewicz	98859
Christian Blum	79352

Juan-Julián Merelo, Carlos Cotta «Building bridges: the role of subfields in metaheuristics» // SIGEVolution, 2006, Vol. 1, no. 4, pp. 9-15

GECCO-2007 Sets Submissions Record

Paper Submissions per Track

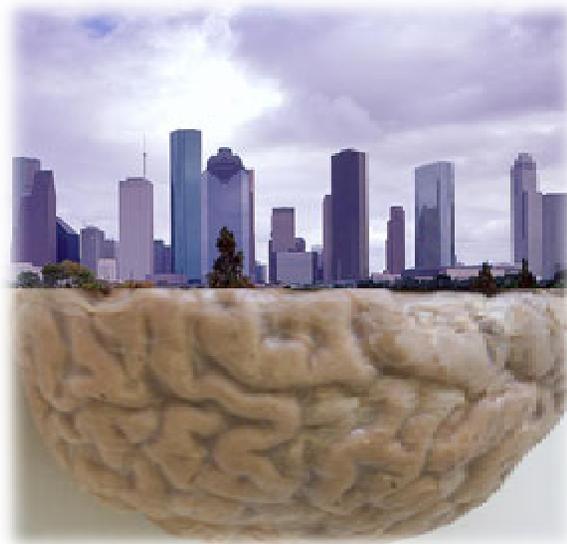
Ant Colony Optimization, Swarm Intelligence, and Artificial Immune Systems	59
Artificial Life, Evolutionary Robotics, Adaptive Behavior, Evolvable Hardware	25
Biological Applications	25
Coevolution	14
Estimation of Distribution Algorithms	34
Evolution Strategies, Evolutionary Programming	21
Evolutionary Multiobjective Optimization	44
Formal Theory	11
Generative and Developmental Systems	24
Genetic Algorithms	109
Genetic Programming	54
Genetics-Based Machine Learning and Learning Classifier Systems	28
Real World Applications	99
Search-Based Software Engineering	18



Фольклорному ансамблю требуются ложкари, цокари, топари, и-и-ихари, у-у-ухари и эгегейщики.

Автор неизвестен автору презентации

5. ПЕРСПЕКТИВЫ





5. Перспективные направления

- «Великое Объединение».
- Эволюционное моделирование социальных, экономических, экологических и исторических процессов.
- Создание эволюционирующих многоагентных адаптивных систем в динамических средах.
- Решение вопросов управляемости и прогнозируемости ЭА. Построение моделей работы ЭА.
- Создание многопредметных интерактивных обучающихся (эволюционирующих) экспертных систем, систем управления и принятия решений.

5. Перспективные направления





5. Перспективные направления

- «Великое Объединение».
- Эволюционное моделирование социальных, экономических, экологических и исторических процессов.
- Создание эволюционирующих многоагентных адаптивных систем в динамических средах.
- Решение вопросов управляемости и прогнозируемости ЭА. Построение моделей работы ЭА.
- Создание многопредметных интерактивных обучающихся (эволюционирующих) экспертных систем, систем управления и принятия решений.

Ох уж эти сказочки! Ох уж эти сказочники!
м/ф «Падал прошлогодний снег»

6. ЛЕГЕНДЫ И МИФЫ ОБ ЭВОЛЮЦИОННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЯХ



6. Самый лучший алгоритм

Можно создать самый лучший эволюционный алгоритм.

Неправда, потому что:

- Теорема об отсутствии бесплатных обедов (Wolpert, MacReady, 1995).
- Здравый смысл.

6. Самый лучший алгоритм – 2

ЭА – лучший способ решения задач оптимизации и поиска.

Неправда, потому что:

- Теорема об отсутствии бесплатных обедов (Wolpert, MacReady, 1995).
- Здравый смысл.

6. Кто сильнее: кит или слон?

Кроссинговер лучше, чем мутация (или наоборот).

Неправда, потому что:

- Зависит от задачи.
- Зависит от условий сравнения.

6. Кто тут, к примеру, в цари крайний?

Можно придумать наилучший оператор селекции/скрещивания/мутации/..., идеально подходящий для всех задач.

Неправда, потому что:

- Зависит от задачи.
- Зависит от условий сравнения.

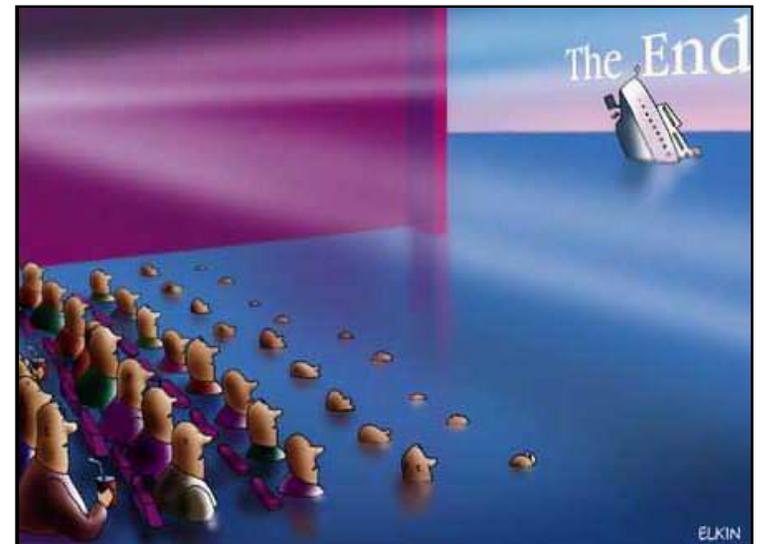
6. Стрижка только начата...

В эволюционных вычислениях еще мало чего сделано.

Давайте поразмыслим:

- Пионерские работы были сделаны в 50-х годах.
- Первые книги появились в 60-70-х годах.
- В мире существует несколько десятков исследовательских групп, занимающихся теорией и приложениями ЭВ.
- Вы действительно все еще считаете, что в ЭВ мало что сделано? **Ж**
- Если какой-то информации по базовому вопросу ЭВ не удалось найти на английском языке, то, скорее всего, плохо и не там искали.

Эволюционные вычисления



Презентация:

http://qai.narod.ru/TomskWorkshop/slides_2009_10.pdf

Вопросы можно будет также задать:

- лично (найдите/поймайте меня, если сможете **J**)
- по почте: yurytsoy@gmail.com
- на сайте группы ECetc (оптимально):
<http://groups.google.com/group/ecetc?hl=ru>



ИСТОЧНИКИ

1. N.A. Barricelli, "Esempi numerici di processi di evoluzione," *Methodos*, pp. 45-68, 1954.
2. H.J. Bremermann, M. Rogson, and S. Salaff, "Global properties of evolution processes," *Natural Automata and Useful Simulations*, H.H. Pattee, E.A. Edsack, L. Fein, and A.B. Callahan (eds.), Spartan Books, Washington D.C., pp. 3-41, 1966.
3. Floreano D., Husband P., Nolfi S. (2008). *Evolutionary Robotics*, in Siciliano B., Oussama Khatib (eds.), *Handbook of Robotics*, Berlin: Springer Verlag.
4. A.S. Fraser, "Simulation of genetic systems by automatic digital computers. I. Introduction," *Australian J. Biological Sciences*, Vol. 10, pp. 484-491, 1957.
5. R.M. Friedberg, "A learning machine: Part I," *IBM J. Res. Develop.*, Vol. 2:1, pp. 2-13, 1958.
6. L.J. Fogel, A.J. Owens, and M.J. Walsh, "Artificial intelligence through a simulation of evolution," *Biophysics and Cybernetic Systems: Proc. 2nd Cybern. Sciences Symp.*, M. Maxfield, A. Callahan, and L.J. Fogel (eds.), Spartan Books, Washington D.C., pp. 131-155, 1965.
7. L.J. Fogel, A.J. Owens, and M.J. Walsh, *Artificial Intelligence through Simulated Evolution*, John Wiley, NY, 1966.
8. Goldberg David E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley Pub. Co. 1989
9. J.H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, Univ. Mich, Ann Arbor, 1975.
10. Kenneth A. De Jong *An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems*. 1975.

ИСТОЧНИКИ

11. M.L. Minsky, "Steps toward artificial intelligence," Proc. of the IRE, Vol. 49:1, pp. 8-30, 1961.
12. Pinciroli C., Birattari M., Tuci E., Dorigo M., Del Rey Zapatero M., Vinko T., Izzo D. (2008). Lattice Formation in Space for a Swarm of Pico Satellites, Sixth International Conference on Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence (ANTS 2008), in Dorigo M et. al. (eds.), Lecture Notes in Computer Science, Springer Verlag, Berlin, vol. 5217, pp. 347-354
13. Ingo Rechenberg (1971): Evolutionsstrategie - Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution (PhD thesis)
14. H.-P. Schwefel: Numerische Optimierung von Computer-Modellen, Birkhäuser, Basle, 1977
15. Kenneth O. Stanley, Bobby D. Bryant, Igor Karpov, Risto Miikkulainen Real-Time Evolution of Neural Networks in the NERO Video Game // Proceedings of the Twenty-First National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-2006, Boston, MA). Meno Park, CA: AAAI Press. 1671-1674
16. Jyrki Wallenius, James S. Dyer, Peter C. Fishburn, Ralph E. Steuer, Stanley Zionts and Kalyanmoy Deb Multiple Criteria Decision Making, Multiattribute Utility Theory: Recent Accomplishments and What Lies Ahead // Management Science. Volume 54 , Issue 7 (July 2008). Pages 1336-1349
17. Букатова И. Л. Эволюционное моделирование и его приложения. М., Наука, 1979. 230 с.
18. Букатова И.Л., Михасев Ю.И., Шаров А.М. Эвоинформатика: Теория и практика эволюционного моделирования: учебное пособие. - М. : Наука, 1991. - 205 с.
19. Растрингин Л.А. Адаптация сложных систем. Рига, "Зинатне", 1981, 376 стр.