

# Методологические проблемы эволюционных вычислений

**Аннотация.** В работе критически рассматривается ряд методологических вопросов эволюционных вычислений. Делается вывод о том, что в рамках существующих представлений эволюционное направление ИИ вряд ли сможет выйти за рамки методов поисковой оптимизации. Предлагается ряд вопросов, решение которых сможет превратить эволюционные вычисления в действительно магистральное направление развития интеллектуальных систем.

**Ключевые слова:** эволюционное моделирование, генетические алгоритмы, искусственный интеллект.

## Введение

Привлекательная идея, заключающаяся в том, что вместо моделирования сложного объекта в уже готовом виде следует заниматься моделированием эволюции некоторого простого объекта, получила явное формальное воплощение еще в 60-х гг. XX в. Речь идет о работе Л. Фогеля "Искусственный интеллект и эволюционное моделирование" [12,15]. Действительно, идея, лежащая в основе эволюционных вычислений, выглядит весьма многообещающе: запустить эволюционный процесс и ждать, когда с течением времени появится требуемый ответ – это весьма естественный и привлекательный путь решения сложных задач.

Мы не будем останавливаться на вопросе непростой научной судьбы этого направления. Причины забвения и "переоткрытия", метаморфозы представлений о сути эволюционного моделирования описываются, например, в [9]. Важно то, что, следуя идее моделирования эволюции, в дальнейшем появляется направление, названное генетическими алгоритмами [17], а затем и генетическое программирование [18]. Характерным и для эволюционного моделирования (ЭМ), и для генетических алгоритмов (ГА), и для генетического программирования (ГП) является то, что в них декларируется следование дарвиновской теории эволюции,

а также то, что субъектами эволюции могут быть "особи" самой разной природы (с точки зрения их математической модели, разумеется).

Сейчас существуют два разных представления о взаимоотношениях между ЭМ, ГА и ГП. Первое рассматривает ЭМ как некую общую парадигму, в рамках которой ГА и ГП являются лишь частными направлениями. При этом зачастую используется термин "эволюционные вычисления", претендующий на еще большую общность. Второе, более прагматическое представление, проводит разделение по типу используемых моделей субъектов эволюции: в ЭМ эволюционируют конечные автоматы, в ГА эволюционирующая особь представляется битовой строкой (в ГА ее называют хромосомой), а в ГП эволюционируют программы, представленные в виде деревьев.

С одной стороны, все эти эволюционные вычисления (объединим под этим термином ЭМ, ГА и ГП) занимают весьма прочную позицию в области искусственного интеллекта, относясь скорее к его бионическому направлению. Кроме того, эволюционные вычисления являются "идеологически близкими" для такой мощной ветви ИИ, как "мягкие вычисления". Более того, мягкие вычисления зачастую противопоставляются бытующему в последнее время "каноническому" представлению об ИИ, как совокупности прежде всего формальных,

логических подходов и методов. Результатом такого понимания ИИ является то, что мягкие вычисления активно собирают под своей крышей и нечеткие модели (включающие в себя различные НЕ-факторы), нейроинтеллект, многоагентные системы и прочие методы, вплоть до эволюционных вычислений, т.е. все то, что выходит за рамки прагматического направления ИИ. Определив таким образом место эволюционных вычислений в ИИ, рассмотрим следующие позитивные моменты. Прежде всего – количественные. Речь идет о количестве работ по этой тематике. Поисковые запросы в русскоязычном интернете определяют долю работ по тематике ГА и/или ЭМ в общем объеме работ по ИИ в 2-3 % (Google и Yandex). Такой скромный результат объясняется, видимо, уже упоминавшимся "разделом сфер влияния". Статистика же работ, представляемых на конференции по ИИ, совсем иная. Речь идет об основной российской конференции по вопросам ИИ - Национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием (КИИ). Судя по соотношению количества работ, которые в явном виде были посвящены вопросам эволюционных вычислений, к общему числу поданных на КИИ работ, интерес к эволюционным моделям неуклонно растет. Если это соотношение на КИИ-2006 составляло примерно 10%, то на КИИ-2012 – уже 18%.

Итак, в целом все хорошо: создано огромное количество систем, решающих самые разнообразные задачи, интерес к этой области не ослабевает, а даже совсем наоборот. Так есть ли причины говорить о проблемах в эволюционных вычислениях и тем более – о кризисных явлениях?

## 1. Проявления кризиса

Основное проявление кризиса или, по крайней мере, того, что что-то идет не так, лежит на поверхности. Все эволюционные вычисления (ЭМ, ГА, ГП) уже давно рассматриваются как некие оптимизационные методы, поисковые механизмы, использующие аналогии из области биологической эволюции. И это притом, что изначально то же ЭМ рассматривалось как одно из магистральных направлений в области искусственного интеллекта. Конечно, направлений, не оправдавших ожиданий, было в ИИ предостаточно. Однако уж слишком хороша

базовая концепция, слишком она претендует на всеобщность, чтобы воспринимать ее лишь как один из методов поисковой оптимизации.

Первые предкризисные явления проявились на самом деле тогда, когда были предложены генетические алгоритмы. Это было проявлением того, что декларируемые эволюционным моделированием принципы слишком общи и нужен был более простой для реализации и, главное, анализа механизм. Таковым механизмом и стали ГА. Вторым предвестником стало, как ни странно, появление концепции генетического программирования. К тому времени стало ясно, что ГА оказались слишком примитивным механизмом, биологические эволюционные принципы просто притягивались за уши. Однако и ГП не смогло приблизить достижение поставленной изначально цели – построить универсальный механизм решения задач ("вместо моделирования сложного объекта").

Для того чтобы понять, почему оказалось сложно как минимум повысить общность решаемых задач или хотя бы кардинальным образом улучшить механизм моделирования эволюции, посмотрим на эволюционные вычисления с критической стороны. Начнем с основной метафоры ЭМ – приспособительного ландшафта.

## 2. Проблемные вопросы эволюционных вычислений

**Ландшафт.** Практически ни одна работа из области ЭМ/ГА/ГП не обходится без рассуждений о том, что поиск решения представляет собой блуждание в некоем пространстве состояний (структур, генотипов и проч.) И что соответствующие механизмы превращают это блуждание не в случайный и даже не в градиентный поиск, а в некий целенаправленный процесс. И при этом приводится либо явно, либо умозрительно примерно такая схема, как на Рис.1.

Каждая особь, как субъект эволюции, представлена некой точкой, а траектория ее движения – это процесс эволюции. Такой наглядный и метафоричный "приспособительный ландшафт" был введен еще в 1932 г. Сьюэллом Райтом (Sewall Green Wright), американским генетиком и одним из создателей математического аппарата популяционной генетики. Однако сам по себе этот ландшафт уже заставлял задуматься о том, может ли процесс эволюции быть

сведен к поиску некоторого глобального экстремума, ведь именно он, как решение задачи, и является целью эволюционных вычислений.

Очевидно, что отбор в пользу локальных оптимальных значений признаков препятствует эволюции в направлении к более глобальным и, в конечном счете, лучшим оптимумам. Как было отмечено в [5], сам по себе естественный отбор, не будучи способен к предвидению, является в каком-то смысле механизмом *против* совершенства, стараясь по возможности придерживаться вершин низких предгорий на райтовском ландшафте.

Именно такая ландшафтная интерпретация эволюции и очевидные ее сложности привели к тому, что необходимо было вводить некие дополнительные механизмы для того, чтобы можно было справиться с проблемой застревания на локальных экстремумах.

**Болдуин, Ламарк и "более общие теории эволюции"**. Весьма характерным признаком слабости результатов моделирования эволюции является привлечение различного рода дополнительных "улучшающих" механизмов и теорий. Причем делается это зачастую, невзирая на опасность впадения в "биологический еретизм".

Согласно теории Ламарка (1809 г.) эволюция, т.е. проявление форм более сложных и современных, - это проявление «закона градации», стремление живых существ усложнять свою структуру, целесообразные изменения организмов, направленные на приспособление к внешним условиям. Причем эти приспособительные изменения далее способны передаваться по наследству (это и есть концепция «наследования приобретенных признаков»). Итак, в отличие от теории Дарвина, по Ламарку среда оказывает прямое влияние на наследуемые признаки.

Со временем оба эти подхода трансформировались в одну из комбинированных теорий эволюции – теорию Ламарка-Дарвина. Более того, в [8] утверждается о введении Дарвиным в своих поздних работах гипотезы *пангенезиса* – некоего физиологического механизма, по которому изменения в органах и тканях, вызванные реакцией организма на окружающую среду, переносятся особыми частицами в половые клетки особи и становятся частью ее наследственных свойств.

Идейно близким к ламарковской теории эволюции является концепция Джеймса Болдуина (James Mark Baldwin), который в 1896 г.

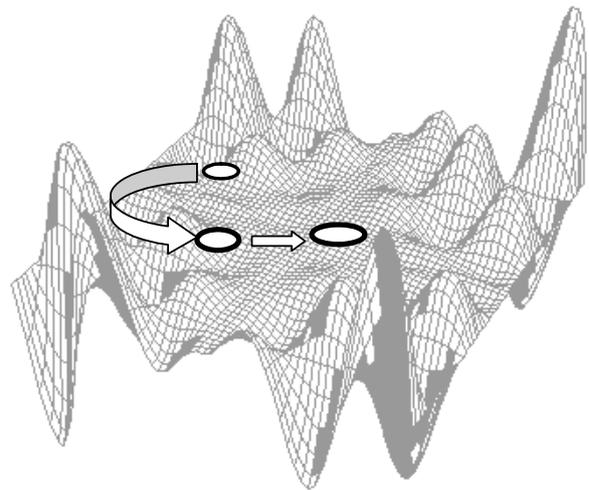


Рис.1. Поиск в пространстве состояний (структур)

предложил механизм, согласно которому эпигенетические факторы (изменения фенотипа клетки, вызванные механизмами, не затрагивающими изменения ДНК) влияют на формирование генома не менее эффективно, чем действие естественного отбора. И во главу угла Болдуин также ставит обучение, т.е. наследование благоприобретенных навыков.

Мы не будем останавливаться на эффекте Болдуина, хотя это – крайне интересный механизм сам по себе. Более подробно, в частности, о его "попперовской" интерпретации, говорится в [9].

Здесь важно иное. В ряде работ показано, что обучение (читай – наследование благоприобретенных признаков) может оказать существенное влияние на скорость нахождения оптимума. Например, в [9] описываются эксперименты, при которых особи (автоматные модели) могли передавать по наследству приобретенные в ходе своей жизни навыки. Важно, что фенотипическая деятельность (признаки) особей-автоматов задавалась формируемой матрицей вероятности действий.

Влияние наследования благоприобретенных признаков на скорость и качество эволюции было очевидным. В этих экспериментах каждая особь содержала специальный признак CF, который определял, будет ли при размножении наследоваться матрица вероятностей действий (CF-признак есть), либо нет. Во-первых, была обнаружена четкая корреляция между CF-фактором и общим показателем качества популяции. Во-вторых, доля особей с признаком CF меняется скачкообразно. Это видно на Рис.2.

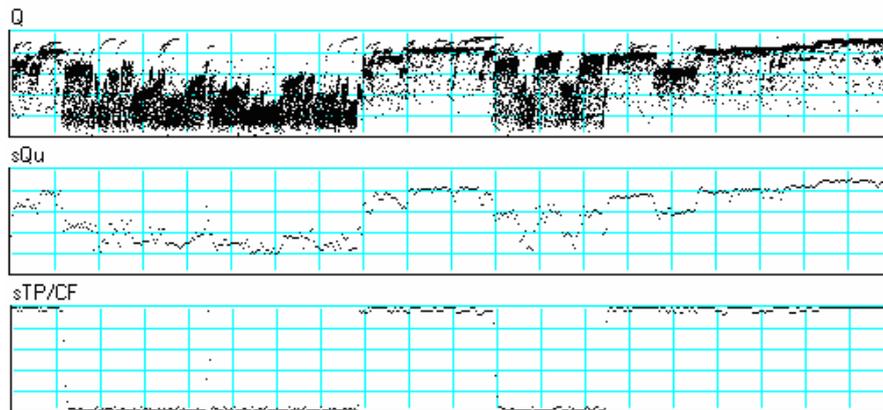


Рис.2. Роль CF-фактора

$Q$  – показатель качества

$sQ_u$  – средний показатель качества

$sTP/CF$  – доля особей с CF-фактором в общей численности популяции

Некоторые результаты были нетривиальными. Оказалось, например, что в благополучных средах наличие CF-фактора особого влияния на скорость эволюции не оказывает. CF-фактор начинает играть важную роль в сложных условиях, когда у индивидуума нет времени на длительное обучение и ему сразу нужен опыт родителей. А в неблагоприятных средах, особенно в тех, в которых происходит резкое изменение условий существования, CF-фактор становится, напротив, крайне вредным. Это связано с тем, что в неблагоприятных условиях должна происходить очень быстрая смена поколений, а опыт старших поколений оказывается неприменимым, тормозящим прогресс. Когда же преодолевается некоторое критическое значение «жесткости» среды, CF-фактор вновь начинает играть положительную, стабилизирующую роль. Эти соображения подтверждаются также экспериментами, в которых использовались большие мутационные частоты. Чем выше частота мутаций, тем меньшее значение имеет CF-фактор.

Эти выводы созвучны тем, что приводятся в работах Хинтона (Hinton, 1987) и Мейли (Mauley, 1997) [10]. В них было продемонстрировано, что обучение может как направлять эволюционный процесс к нахождению оптимума, так и препятствовать этому. При этом обучение может при определенных условиях и препятствовать эволюционной оптимизации, если оно увеличивает шансы нахождения хорошего фенотипа вне зависимости от генома особи.

На самом деле, подобного рода исследования, эксперименты и выводы малосодержа-

тельны с точки зрения описания процесса эволюции. Наследование благоприобретенных признаков действительно может играть положительную роль в том случае, если нас интересует отыскание именно хорошего фенотипа. Отметим, кстати, что ни фенотип, ни обучение с закреплением его результатов не имеют никакого отношения к ГА и ГП, оставаясь прерогативой ЭМ, в котором фенотипическое поведение не связано жестко с генотипом.

Прежде, чем мы рассмотрим вопросы фенотипа, вернемся к вопросу о введении разнообразных дополнительных механизмов и теорий с целью улучшения ландшафтного блуждания. Примером такого подхода является направление "Искусственная жизнь", сторонники которого прямо заявляют, что они исследуют более общие формы жизни, чем те, которые существуют на Земле. Изучается жизнь, какой она могла бы в принципе быть ("life-as-it-could-be"), а не обязательно та жизнь, какой мы ее знаем ("life-as-we-know-it") [11].

**Фенотип и генотип.** Вопрос соотношения генотипа и фенотипа является не только водоразделом между ЭМ и ГА. Он является ключевым и для теории биологической эволюции. Скорее всего, мы вынуждены будем согласиться с тем, что с биологической точки зрения эволюции подлежит генотип или, следуя Р. Докинзу – т.н. *репликатор* [5].

И вот здесь возникает основная методологическая проблема эволюционного моделирования. Она заключается в том, что если в "настоящей" биологической эволюции речь идет

о выживании (заботе о процветании и/или развитии – как угодно) репликатора, то с точки зрения технической или прагматической, нас на самом деле интересует лишь развитие *внешних фенотипических признаков*. Именно фенотип, развитие особи ставится во главу угла. Нас, по большому счету, не интересует генотип полученной в ходе эволюции особи. Нам важно, как эта особь решает задачу, т.е. ее – особи – фенотипические проявления. Отсюда и вытекает множество методологических проблем – от терминологической путаницы вплоть до непонимания цели моделирования того, что называется эволюцией.

Различные по генотипу особи могут обладать сходным поведением и быть одинаково успешно приспособлены к конкретным условиям окружающей среды. В биологии это называется явлением плейотропии, т.е. способностью одного гена давать несколько фенотипических эффектов. Разумеется, плейотропия – это не свойство гена, а результат взаимодействия между геном и его окружением. Действительно, фенотипический "эффект" гена – понятие, имеющее смысл только в определенном контексте влияний окружающей среды, причем окружающая среда включает в себя и все остальные гены генома [5].

Интересно, что в этом смысле хорошей иллюстрацией является модель представления генотипа в виде структуры автомата. Одинаковые с точки зрения «вход-выход» автоматы могут иметь совершенно разные структуры. Здесь необходимо подчеркнуть, что речь идет о входных наборах, описывающих конкретную среду, в которой функционируют автоматы-особи. Изменение условий среды, ее свойств, может привести, разумеется, к иному набору входных сигналов, и автоматы будут вести себя по-разному. В этом смысле мы можем говорить, что имеем дело с частично-эквивалентными автоматами, т.е. автоматами, поведение которых одинаково лишь в некоторой конкретной среде.

Теперь становится понятной роль фенотипа в ЭМ. Если последовательно придерживаться биологических представлений, то во главу угла придется ставить именно генотип, т.е. эволюцию репликаторов. Роль же фенотипа сведется лишь к некому вспомогательному механизму. Действительно, если один и тот же генотип может давать разные фенотипы в различных условиях

окружающей среды, то мы получим лишь механизм, помогающий успешно преодолевать локальные экстремумы. На это, кстати, можно посмотреть и с другой стороны: в результате удачной модификации фенотипа популяция может оставаться в сложившихся условиях среды до тех пор, пока не произойдет генетического закрепления этого фенотипа (данное проявление «генетического ламаркизма» [4] также связывается с эффектом Болдуина).

Это достаточно тяжело принять последователям ЭМ, но с этим легко соглашаются сторонники ГА. В ГА фенотипическая составляющая как таковая отсутствует вовсе. Все, что происходит в процессе эволюции – это работа на уровне хромосомы и не более того. Можно выразиться помягче: между генотипом и фенотипом ставится знак равенства. Этим, кстати, и объясняется "скромность" получаемых результатов.

**Ограниченность эволюции.** То, что в эволюционных вычислениях происходит процесс моделирования эволюции, следует из самого названия. Казалось бы, что здесь нечего и обсуждать. Декларируется, что в основе всего – дарвиновские механизмы эволюции (или некие модификации). Дело даже не в том, что в биологии рассматриваются три фактора, задающие необходимые и достаточные условия, которые определяют ход эволюции: наследственная изменчивость, т.е. мутирование, как предпосылка эволюции, ее материал; борьба за существование как контролирующий и направляющий фактор; естественный отбор как преобразующий фактор [14]. А в эволюционных вычислениях при этом прекрасно обходятся двумя – естественным отбором и в меньшей степени – наследственной изменчивостью. И дело даже не в том, что следует рассматривать как цель процесса – генотип или фенотип. Более того, даже не так важно, какое определение эволюции мы выберем – эволюцию по Дарвину, по Ламарку или синтетическое (например, следы ламаркизма можно обнаружить и в таком определении: под эволюцией понимаются изменения в популяции во времени, т.е. в поколениях, через преобразование фенотипа и закрепление этих преобразований в генотипе вплоть до происхождения нового вида [6].

Проблема заключается в том, что эволюционным вычислениям не удается породить хоть сколько-нибудь сложные объекты. И причина здесь кроется глубже, нежели в ограничениях вычислительного характера.

Следуя современным представлениям о принципах эволюции [5], следует принять, что организм – это физически обусловленная единица, соответствующая одному и только одному жизненному циклу. Это означает, что эволюция сложно устроенного организма возможна при наличии циклически возобновляемого процесса развития, т.е. для создания новой сложной структуры необходимо начинать развитие с начала. Эволюционные же вычисления такого процесса развития не предполагают в принципе. То, что эволюционирует в ЭВ – это в лучшем случае, аналог роста многоклеточного организма без дифференциации его частей и усложнений на уровне органов. Предлагаемые различного рода коннекционистские модели, рассуждения о том, как могли бы образовываться сложные структуры, слова о роли иерархии и т.п. остаются лишь декларациями о намерениях. Скажем, К.М. Завадским в 1970 г. было введено понятие *синтезогенеза* – одного из путей эволюции, при котором происходит объединение простых организмов в более сложный (переход от одноклеточных водорослей к многоклеточным, сообщество пчел в улье, муравьев в муравейнике и т.п.). Другим, уже практически примером синтезогенеза, являлось моделирование поведения автоматов на тороидальной поверхности [3]. Нельзя также не отметить и т.н. *гипотезу простоты*, высказанную М.Л.Цетлиным [13]. Следствием ее является идея о том, что совместное функционирование простых «маленьких зверушек» в сложной среде способно обеспечить устойчивое существование всего коллектива, который можно рассматривать как некий «сверхорганизм». Но, повторим, все это лишь либо общие умозаключения, либо решения частных задач на демонстрационном уровне.

Подытожим. Неспособность формирования сложных структур и есть основная проблема эволюционных вычислений. Именно потому ЭВ сводятся исключительно и только к поиску в пространстве состояний. Все остальные ограничения и недостатки ЭВ проистекают, видимо, из этого.

**Попытки формализации.** Разумеется, предпринимались попытки создания содержательных моделей эволюционных вычислений. Но все эти модели оставались в рамках поисковых механизмов приспособительного ландшафта. Рассмотрим некоторые из них.

В свое время основателем ГА была предложена т.н. теорема схемы (Schema Theorem), обосновывающая эффективность ГА [16,17]. Суть теоремы Холланда/Голдберга сводится к оценке количества особей, правильно решающих поставленную задачу. Выглядит эта оценка так:

$$E[m(H, t+1)] \geq \frac{m(H, t)f(H, t)}{f_{all}(t)} \times \left\{ 1 - p_c \frac{\delta(H)}{1-l} p_{diff}(H, t) - o(H)p_m \right\}, \quad (1)$$

где:  $m(H, t)$  – количество особей, удовлетворяющих требованиям задачи (схеме  $H$ );

$f(H, t)$  – средняя степень приспособленности по всем примерам схемы  $H$  в популяции;

$f_{all}(H, t)$  – средняя степень приспособленности всей популяции;

$p_m$  – вероятность мутации;

$p_c$  – вероятность кроссинговера.

Теорема показывает, что, используя каноническую схему ГА, в каждый следующий момент времени количество особей, более соответствующих задаче (схеме), будет не убывать.

В эволюционном моделировании обычно приводятся рассуждения, основанные на схемах преобразования исходной модели (автомата) и обсуждаются последовательности преобразований вида:

$$C_1 \rightarrow C_2 = M(C_1) \rightarrow A_3 = M(C_2) \dots \rightarrow C_k = M^k(C_1), \quad (2)$$

где  $C_1$  – автомат, полученный в момент времени  $i$ ;  $M$  – некий обобщенный оператор мутации. Например, в [2], рассматривая вопросы сходимости и устойчивости эволюционного процесса, вводится метрика

$$d(C, C') = \min_C \{N : C' \in V_C^N\}, \quad (3)$$

определяющая минимальное число шагов, за которое из модели  $C$  синтезируется модель  $C'$ .

Предпринимались и попытки построения алгебраических моделей эволюционных вычислений. Например, в [1] описываются модели ГА, основанные на введенных операциях мутаций и замещения, а также схеме отбора. Основой таких построений является сведение всех операций, выполняемых ГА с хромосомами, к перестановкам на множестве всех возможных хромосом.

Подавляющее же число работ, в которых затрагиваются вопросы качества, устойчивости и сходимости эволюционных алгоритмов, прекрас-

но обходится безо всяких математических построений и обоснований. Читателю предлагаются в основном графики и диаграммы, подобные тем, что приведены выше на Рис.2. Как бы то ни было, все эти вопросы рассматриваются исключительно в контексте поисковой оптимизации.

Таким образом, приходится признать малую содержательность и тем более – конструктивность подобного рода попыток алгебраизации описания процесса эволюции.

## Заключение

Итак, сейчас эволюционные вычисления в системах ИИ рассматриваются лишь как некие стохастические оптимизационные методы, иногда дающие неплохие результаты. Если же вновь вернуться к представлению о том же эволюционном моделировании, как о некотором магистральном направлении ИИ, то имеются следующие основные вопросы, требующие своего разрешения.

1. Околобиологические спекуляции. Факторы эволюции нельзя лишь декларировать, подгоняя их под поисковые процедуры. Необходимы последовательные, методологически и предметно (с биологической точки зрения) корректные схемы моделирования эволюции.

2. Организация среды эволюции. Основные усилия должны быть сосредоточены на создании таких условий, которые могли бы привести к появлению сложных структур. Беда в том, что и в природе образование многоклеточных организмов с их дифференциацией органов не является неперенным путем развития. Это означает, что главным вопросом эволюционных вычислений является именно определение такой окружающей среды, в которой успешное функционирование организма должно быть непременно связано с его усложнением. Биологами считается, что биохимия нашей планеты определяет, что минимальная реплицирующая единица должна состоять примерно из пятидесяти цистронов (Margulis, 1981) [5]. Правда, однозначного ответа на вопрос, почему клеткам целесообразно сбиваться в многоклеточные организмы, до сих пор нет. Видимо, здесь могут помочь сугубо технические соображения: сложная однородная система управления менее надежна по сравнению с децентрализованной или иерархической, в которой имеется к тому же и резервирование.

3. Разрешение противоречия между целями моделирования. С прагматической точки зрения интерес представляет внешние, фенотипические проявления результатов эволюции. Однако с биологической точки зрения эволюционирует репликатор, т.е. генотип. Однако при этом положение усугубляется тем, что отказ от фенотипической составляющей (как в ГА) резко сужает эффективность эволюционного поиска.

4. Сведение решения задач ИИ к процессу эволюции. Этот оставленный напоследок вопрос является на самом деле самым сложным. У экспериментатора есть вполне определенная цель – получить устройство (решение) для некоторой вполне определенной задачи. Именно по заведомо известным критериям и оценивается качество получаемых решений. Проблема, однако, заключается в том, что у самой эволюции цели быть не может. Эволюция со всех точек зрения - это некий наблюдаемый процесс жизнедеятельности репликаторов. И в ходе этого процесса остаются те репликаторы, которые... (далее см. любое определение эволюции, на выбор). К тому же эволюция даже в условиях одной среды может идти самыми замысловатыми путями. В [9] описывается казус, когда в одной из серий экспериментов вместо ожидаемого получения сложной особи популяция стала вырождаться во множество короткоживущих, но интенсивно размножающихся субъектов. Т.е. вместо эволюции особи получилась т.н. эволюция вида.

К сожалению, на данный момент здесь лишь декларируются имеющиеся проблемы и намечаются общие пути решения. Часто критикуя существующие модели и методы за неконструктивизм, в самой статье не удалось обойтись без самых общих схем и "концептуальных" соображений. Оправдывает это лишь основная цель этой работы – заставить задуматься о роли и месте эволюционных вычислений в системах ИИ, непредвзято и критически взглянуть на уже привычные и устоявшиеся эволюционные механизмы.

## Литература

1. Богатырев М.Ю. Инварианты и симметрии в генетических алгоритмах // XI национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2008 (г. Дубна. 29 сентября - 3 октября 2008 г): Труды конференции. М.: Физматлит, Т.1. 2008. 1288 с.

2. Букатова И.Л., Михасев Ю.И., Шаров А.М. Теория и практика эволюционного моделирования. -М.: Наука, 1991. -206 с.
3. Варшавский В.И., Поспелов Д.А. Оркестр играет без дирижера: размышления об эволюции некоторых технических систем и управлении ими. - М.:Наука, 1984. - 208 с.
4. Горбань А.Н., Хлебопрос Р.Г. Демон Дарвина. Идея оптимальности и естественный отбор. - М.:Наука, 1988. -208 с.
5. Докинз Р. Расширенный фенотип. Длинная рука гена. Пер. с англ. – М.: Астрель: CORPUS, 2010. – 512 с.
6. Дунаев Б.Б. Математическая модель эволюции биологических популяций. //Кибернетика, № 1, 1990. с.107-111.
7. Емельянов В. В., Курейчик В. В., Курейчик В. М. Теория и практика эволюционного моделирования -М.: Физматлит, 2003, 432 с.
8. Животовский Л.А. Наследование приобретенных признаков: Ламарк был прав.//Химия и Жизнь, №4, 2003, с. 22-26.
9. Карпов В.Э. Эволюционное моделирование. Проблемы формы и содержания // Новости искусственного интеллекта, №5, 2003. с.35-46.
10. Редько В.Г. Модели автономных когнитивных агентов – бионический задел развития искусственного интеллекта //XIII национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2012 (16-20 октября 2012 г., Белгород): Труды конференции, Белгород: Изд-во БГТУ, Т.4, 2012, с.172-179, -249.
11. Редько В.Г. Эволюция, нейронные сети, интеллект. Модели и концепции эволюционной кибернетики. – М.: УРСС, 2005.
12. Фогель Л., Оуэнс А., Уолш М. Искусственный интеллект и эволюционное моделирование. -М.: Мир, 1969. -230 с.
13. Цетлин М.Л. Исследования по теории автоматов и моделирование биологических систем. -М.: Наука, 1969. -316 с.
14. Шмальгаузен И.И. Факторы эволюции. -М.: Наука, 1968. -451с.
15. Fogel L. a.o. Artificial intelligence through simulated evolution. New York, Wiley, 1966.
16. Goldberg D.E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison Wesley, 1989.
17. Holland J.H. Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to biology, control and artificial intelligence. MIT Press, 1998 (NB original printing 1975).
18. John R. Koza. Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1992.

**Карпов Валерий Эдуардович.** Доцент Московского института электроники и математики НИУ ВШЭ. окончил Московский государственный институт электроники и математики в 1993 году. Кандидат технических наук. Автор 45 публикаций. Область научных интересов: искусственный интеллект, робототехника. E-mail: karpov\_ve@mail.ru