

# Перспективы исследований на стыке информатики и биологии\*

Редько В.Г.  
НИИ системных исследований РАН  
E-mail: vgrecko@gmail.com

**Аннотация.** В статье подчеркивается актуальность исследований на стыке информатики и биологии. Выделены уже сложившиеся научные направления: нейронные сети, эволюционное моделирование, адаптивное поведение, модели происхождения молекулярно-генетических систем. Указана ключевая проблема – проблема происхождения правил логического вывода. Аргументируется, что необходима серьезная академическая программа «Эволюция, мозг, интеллект». В качестве первого приближения предлагается вести исследования на феноменологическом уровне, путем анализа когнитивной эволюции – эволюции познавательных свойств биологических организмов. Предлагаются контуры программы исследований когнитивной эволюции. Характеризуются определенные заделы исследований по предлагаемой программе.

## 1. Введение. Направления исследований на стыке информатики и биологии

Информатика и биология – активно развивающиеся науки 21 века. На стыке этих наук можно ожидать интересные и перспективные направления будущих исследований. Для того чтобы наметить такие перспективы, целесообразно охарактеризовать уже складывающиеся в этой области направления, выделить связанную с развитием научного миропонимания нетривиальную проблему и наметить подходы к ее исследованию. Этому и посвящена настоящая статья.

Далее кратко характеризуются уже сложившиеся научные направления, выделяется ключевая проблема – проблема обоснования применимости логического мышления в научном познании – и указываются подходы к ее исследованию путем построения моделей когнитивной эволюции.

На стыке информатики и биологии развивается несколько интересных научных направлений: *нейронные сети, эволюционное моделирование, адаптивное поведение, модели происхождения молекулярно-генетических систем*. Работы по нейронным сетям и эволюционному моделированию хорошо известны, и мы не будем на них сейчас останавливаться. Отметим только книги и лек-

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке программы Президиума РАН «Интеллектуальные компьютерные системы» (проект 2-45) и РФФИ (проект № 07-01-00180).

ции, характеризующие эти направления [1-5]. Модели адаптивного поведения и происхождения самовоспроизводящихся молекулярно-генетических систем управления простейших организмов недостаточно известны специалистам и кратко характеризуются в данном разделе. Подчеркнем, что именно путем моделирования эволюции адаптивного поведения, путем моделирования эволюции познавательных свойств биологических организмов, исследования когнитивной эволюции целесообразно искать подходы к изучению проблемы обоснования применимости логического мышления в научном познании. Также важно, что в работах по анализу происхождения самовоспроизводящихся молекулярно-генетических систем сложились четкие математические и компьютерные модели, для которых уже сейчас можно провести определенное упорядочивание.

Направление «Адаптивное поведение» (АП) активно развивается с начала 1990-х годов [6-8]. Основной подход этого направления – конструирование и исследование искусственных (в виде компьютерной программы или робота) «организмов», способных приспосабливаться к внешней среде. Эти организмы называются «аниматами» (от англ. animal + robot = animat). Также часто используются термины «агент», «автономный агент».

Программа-минимум направления «Адаптивное поведение» – исследовать архитектуры и принципы функционирования, которые позволяют животным или роботам жить и действовать в переменной внешней среде.

Программа-максимум этого направления – попытаться проанализировать эволюцию когнитивных способностей животных и эволюционное происхождение человеческого интеллекта [9].

Для исследований АП характерен *синтетический подход*: здесь конструируются архитектуры, обеспечивающие «интеллектуальное» поведение аниматов. Причем это конструирование проводится как бы с точки зрения инженера: исследователь сам «изобретает» архитектуры, подразумевая конечно, что какие-то подобные структуры, обеспечивающие адаптивное поведение, должны быть у реальных животных.

Часто системы управления АП рассматривают как автономные системы управления [10].

Хотя «официально» направление АП было провозглашено в 1990 году, были явные провозвестники этого направления. Например, в нашей стране модели поведения животных в 1960-70-х годах строились и исследовались М.Л. Цетлиным, М.М. Бонгардом, Д.А. Поспеловым [11-13].

В исследованиях АП используется ряд нетривиальных компьютерных методов:

- нейронные сети [1-3],
- генетический алгоритм и другие методы эволюционной оптимизации [4,5],
- классифицирующие системы (Classifier Systems) [14],
- обучение с подкреплением (Reinforcement Learning) [15].

Достоинство анимат-подхода – он привязан к конкретным задачам: во-первых, к задаче моделирования поведения искусственных, модельных организмов, в частности, роботов, и, во-вторых, к задаче моделирования адаптивного поведения биологических организмов. Исследователи направления АП ста-

раются строить именно такие модели, которые применимы к описанию поведения *как реального животного, так и искусственного анимата* [16,17].

Отметим, что в АП в основном используется *феноменологический подход* к исследованиям систем управления адаптивным поведением. Предполагается, что существуют формальные правила адаптивного поведения, и эти правила не обязательно связаны с конкретными микроскопическими нейронными или молекулярными структурами, которые есть у живых организмов. Скорее всего, такой феноменологический подход для исследований АП вполне имеет право на существование. В пользу этого тезиса приведем аналогию из физики. Есть термодинамика, и есть статистическая физика. Термодинамика описывает явления на феноменологическом уровне, статистическая физика характеризует те же явления на микроскопическом уровне. В физике термодинамическое и статистическое описания относительно независимы друг от друга и, вместе с тем, взаимодополнительны. По-видимому, и для описания живых организмов может быть аналогичное соотношение между феноменологическим (на уровне поведения) и микроскопическим (на уровне нейронов и молекул) подходами. При этом естественно ожидать, что для исследования систем управления адаптивным поведением феноменологический подход должен быть более эффективен (по крайней мере, на начальных этапах работ), так как очень трудно сформировать целостную картину поведения на основе анализа всего сложного многообразия функционирования нейронов, синапсов, молекул.

Подчеркнем, что «Адаптивное поведение» – активно развивающееся направление исследований. Есть научное общество «The International Society for Adaptive Behavior» (<http://www.isab.org.uk>). Регулярно проводятся международные конференции «Simulation of Adaptive Behavior (From Animal to Animat)». Издается журнал «Adaptive Behavior» (<http://www.isab.org.uk/journal>).

Обзор отечественных работ в области адаптивного поведения содержится в книге [7].

В 1960-80 годы проблема возникновения самовоспроизводящихся **молекулярно-генетических информационных систем** в процессе происхождения жизни заинтриговала многих ученых. Целая плеяда Нобелевских лауреатов (М. Эйген, Ф. Крик, Ф. Дайсон, Ф. Андерсон) предприняла попытки представить и промоделировать сценарии возникновения предбиологических информационных систем. В результате этих попыток был разработан ряд интересных математических и компьютерных моделей (квазивидов, гиперциклов и сайзеров), позволяющих представить возможные схемы возникновения молекулярно-генетических самовоспроизводящихся систем простейших организмов [18-22].

Модель *квазивидов* [18,19,23,24] – модель эволюции информационных последовательностей – описывает возможный процесс того, как могли бы эволюционно возникнуть самые простейшие макромолекулы, кодирующие наследственную информацию. В модели рассматривается эволюция популяции цепочек РНК. Эволюция такой популяции приводит к отбору квазивида – такого распределения цепочек РНК, в которое входит как «наилучшая РНК» (размножающаяся с максимальной скоростью), так и близкие к ней цепочки, отличающиеся от этой наилучшей мутационными заменами. Подчеркнем, что эта мо-

дель представляет собой «каноническую» схему эволюции информационных последовательностей, отражающую общие черты эволюционных процессов.

В конце 1970-х годов М. Эйген и П. Шустер предложили следующую по отношению к квазивидам модель – модель *гиперциклов* [19]. В гиперцикле к цепочкам РНК добавляются цепочки аминокислот – ферменты, которые выполняют определенные каталитические функции и вместе с цепочками РНК формируют целостную систему кооперативно взаимодействующих макромолекул. Ферменты циклически катализируют репликацию РНК и способствуют повышению точности копирования, циклическая организация гиперцикла обеспечивает его структурную стабильность.

Еще более близкие «конструкции» к самовоспроизводящейся молекулярно-генетической системе живой клетки – «сайзеры» – были предложены В.А. Ратнером и В.В. Шаминам [25]. Термин «сайзер» был предложен В.А. Ратнером и происходит от *System of self-reproduction (syser)*. В сайзерах ферменты репликации цепочек РНК и трансляции (синтеза ферментов) действуют примерно так же, как и в живой клетке. Модель сайзеров ближе к простейшим биологическим организмам, чем гиперциклы и позволяет анализировать возможные этапы эволюции от простейших мини-сайзеров до протоклеток. Например, модель адаптивного сайзера [26] характеризует процесс эволюционного возникновения системы автономного управления адаптивным поведением в переменной внешней среде.

Очерченные модели – только фрагменты и только возможного сценария эволюции предбиологических информационно-кибернетических систем. Тем не менее, эти модели позволяют четко и на серьезном математическом уровне представить гипотетические этапы возникновения самовоспроизводящейся молекулярно-генетической системы живой клетки (рис.1).

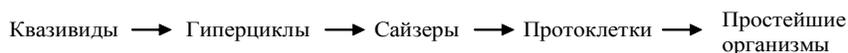


Рис. 1. Схема гипотетической эволюции самовоспроизводящихся макромолекулярных систем.

Подробное описание математических моделей предбиологических молекулярно-генетических информационных систем содержится в [27,28].

## 2. Ключевая проблема – эволюционное происхождение правил доказательства теорем

### 2.1. Гносеологическая проблема

Для серьезной постановки исследовательских работ целесообразно выделить ключевую проблему, связанную с фундаментальной наукой, такую проблему, изучение которой может внести радикальный вклад в научное миропонимание. В данном разделе характеризуется такая проблема.

Существует глубокая гносеологическая проблема: почему логическое мышление *человека* применимо к познанию *природы*?

Действительно, есть фундаментальная естественнонаучная дисциплина – физика. Мощь физики связана с эффективным применением математики. Но математик строит свои теории чисто логическим путем, совсем независимо от внешнего мира, используя свое мышление (в тиши кабинета, лежа на диване, в изолированной камере...). Почему же результаты, получаемые математиком, применимы к реальной природе?

Рассмотрим вопрос более подробно. Допустим, физик, изучая динамику некоторого объекта, сумел в определенном приближении свести описание объекта к дифференциальному уравнению (рис. 2). Далее он интегрирует полученное уравнение согласно известным из математики правилам и получает характеристики движения объекта (в рамках используемого приближения). Переход от дифференциального уравнения к характеристикам движения происходит в сознании физика, а используемые при этом правила интегрирования получены логическим путем математиками. Переход этот чисто дедуктивный, но, если быть предельно строгим, применимость данного перехода к физическому объекту надо обосновывать: поведение физического объекта совершенно обязательно должно соответствовать правилам логики человеческого мышления.<sup>1</sup>

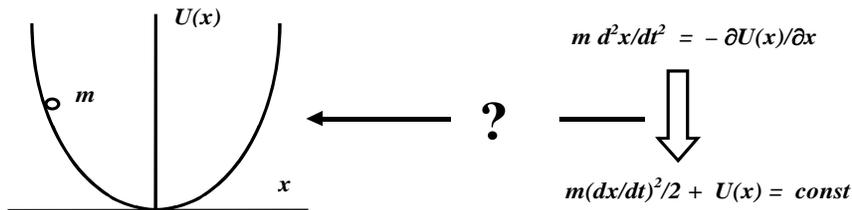


Рис. 2. Почему логика человеческого мышления применима к познанию природы? Левая часть рисунка иллюстрирует движение материальной частицы в потенциальном рельефе, правая часть – дедуктивный логический вывод закона сохранения энергии из второго закона Ньютона для рассматриваемого объекта. Вопрос состоит в том, почему логический вывод, сделанный человеком, применим к реальному объекту в природе.

В более общей формулировке проблему можно поставить так: *почему логика человеческого мышления применима к познанию природы?* Действительно,

<sup>1</sup> На сомнения в применимости математики к познанию природы могут навести и размышления о неожиданных поворотах в науке. Например, многие ученые задумывались над тем, почему общей теории относительности и квантовой механике вдруг потребовались достижения с переднего фронта математики – неевклидова геометрия и теория эрмитовых операторов над векторами в гильбертовом пространстве. Могло сложиться впечатление, что путь развития математики в какой-то степени предопределен развитием содержательного познания природы, хотя математики в своих построениях стремились к максимальной обоснованности и общности своих теорий.

с одной стороны, логические процессы вывода происходят в нашем, человеческом мышлении, с другой стороны, процессы, которые мы познаем посредством логики, относятся к изучаемой нами природе. Эти два типа процессов различны. Поэтому далеко не очевидно, что мы можем использовать процессы первого типа для познания процессов второго типа.

Можно ли конструктивно подойти к решению этих вопросов? Чтобы продемонстрировать такую возможность, будем рассуждать следующим образом.

Рассмотрим одно из элементарных правил, которое использует математик в логических заключениях, правило *modus ponens*: «если имеет место  $A$ , и из  $A$  следует  $B$ , то имеет место  $B$ », или  $\{A, A \rightarrow B\} \Rightarrow B$ .

А теперь перейдем от математика к собаке И.П. Павлова. Пусть у собаки вырабатывают условный рефлекс, в результате в памяти собаки формируется связь «за УС должен последовать БС» (УС – условный стимул, БС – безусловный стимул). И когда после выработки рефлекса собаке предъявляют УС, то она, «помня» о хранящейся в ее памяти «записи»: УС  $\rightarrow$  БС, делает элементарный «вывод»:  $\{УС, УС \rightarrow БС\} \Rightarrow БС$ . И у собаки, ожидающей БС (скажем, кусок мяса), начинают течь слюнки.

Конечно, применение правила *modus ponens* (чисто дедуктивное) математиком и индуктивный «вывод», который делает собака, явно различаются. Но можем мы ли думать об эволюционных корнях логических правил, используемых в математике? Да, вполне можем – умозаключение математика и «индуктивный вывод» собаки качественно аналогичны.

Итак, мы можем думать над эволюционными корнями логического мышления, над происхождением тех правил, которые используются при математических доказательствах. Для решения проблемы применимости нашего мышления в научном познании целесообразно разобраться, как произошли познавательные способности человека в процессе биологической эволюции и как эволюционно появилась их применимость к познанию явлений природы. Наиболее четкий путь подобного исследования – построение математических и компьютерных моделей эволюции познавательных способностей животных и эволюционного происхождения мышления человека.

Рассматриваемая гносеологическая проблема – фундаментальная проблема. Она касается принципиальных возможностей человеческого познания, возможностей научного познания природы. Естественно ожидать, что ее изучение позволит укрепить основания всего величественного здания науки. Следовательно, эта проблема заслуживает тщательного исследования.

## 2.2. Почему проблема происхождения правил логического вывода

Каковы же правила логического вывода, происхождение которых необходимо исследовать? Для ответа на этот вопрос обратимся к математической теории логического вывода. Методы логического вывода в контексте математики 20-го века были формализованы в 1930 годы немецким математиком Г. Генценом, который в качестве базового примера рассматривал евклидово доказательство теоремы: «*Существует бесконечно много простых чисел.*»

Генцен [29,30] выделил правила, используемые при математических доказательствах, и проанализировал связь математической теории логического вывода с разработанными в то время исследованиями логики. Правила математических доказательств были более общими, чем указанное выше правило *modus ponens*, но, тем не менее, именно «формулы», подобные *modus ponens*, были в их основе.

Таким образом, правила, происхождение которых необходимо исследовать, в определенном приближении, известны.

Подчеркнем, что пока мы не останавливаемся на вопросе о том, как может возникнуть доказательство той или иной теоремы, решение той или иной проблемы. Примером схемы возникновения научного решения может служить известное описание А. Пуанкаре, который рассказывает о том, как однажды он долго не смог заснуть и обдумывал свою математическую задачу [31]. В конце концов, путем случайной комбинации частичных решений у него сложилось общее решение той задачи, которую он обдумывал. В настоящей работе основное внимание концентрируется на ключевой проблеме – проблеме анализа эволюционного происхождения логических правил математических доказательств.

Среди подходов, подобных развиваемым здесь, отметим также яркую работу Ю. Вигнера [32], заострявшего внимание на проблеме «непостижимой эффективности математики в естественных науках». Однако в отличие от Ю. Вигнера, который подчеркивал многочисленные трудности, здесь мы намечаем подходы к конструктивному анализу указанной ключевой проблемы путем исследования эволюции познавательных процессов, приведших к логическим правилам, используемым в математике.

Естественно, что мышление человека не сводится только к правилам доказательства теорем, но именно эти правила четко формализованы, лежат в основе математического знания и на них имеет смысл сконцентрироваться на начальном этапе исследований.

### 2.3. Взгляды философов. Становление эволюционной эпистемологии

Над проблемой применимости мышления в научном познании думали многие философы, работавшие в области теории познания. Отметим некоторые точки зрения.

В «Исследовании о человеческом познании» (1748) Давид Юм подверг сомнению понятие причинной связи [33]. Он задался вопросом: почему когда мы видим, что за одним явлением *A* постоянно следует другое *B*, то мы приходим к выводу, что *A* является причиной *B*? Например, когда мы наблюдаем, что Солнце освещает камень, и камень нагревается, то мы говорим, что солнечный свет есть причина нагревания камня.

Юм взглянул на наш познавательный процесс со стороны, извне. Он как бы вышел на некий мета-уровень рассмотрения наших собственных познавательных процессов и задался вопросом о том, откуда взялись эти познавательные процессы и почему они работают.

Острота сомнений Юма была в том, что, развивая его идеи, можно ставить вопрос о принципиальной способности человека познавать мир.

Остроту сомнений Юма хорошо почувствовал Иммануил Кант. Но Кант также видел мощь и силу современной ему науки. Тогда уже была глубокая, серьезная и развитая математика, мощная ньютоновская физика, дающая картину мира, позволяющая объяснить множество явлений на основе немногих четких предположений, использующая многозвенные и сильные математические дедуктивные выводы. Что было делать Канту? Подвергнуть сомнению все эти познавательные процессы? И развивая сомнения Юма дальше, отвергнуть всю науку? Ведь на самом деле – драма!

Конечно же, Кант, как научно образованный человек, не стал отвергать современную ему науку, а постарался разобраться, как же работают познавательные процессы. В результате появились знаменитая «Критика чистого разума» [34] и популярное изложение «Критики...» «Пролегомены ко всякой будущей метафизике, могущей появиться, как наука» [35]. Кант провел исследование познавательных процессов в определенном приближении – приближении фиксированного мышления взрослого человека. Он не задавался вопросом, *откуда* берутся познавательные способности, он просто констатировал факт, что они существуют, и исследовал, *как* они работают. В результате этого анализа Кант пришел к выводу, что существует система категорий, концепций, логических правил и методов вывода (таких как заключения относительно причинных связей между событиями), которые используются в познании природы. Эта система «чистого разума» имеет априорный характер, – она существует в нашем сознании прежде всякого опыта – и является основой научного познания природы.

Приближение фиксированного мышления человека наложило свой отпечаток: Кант утверждает – и вполне логично (!) – что так как «чистый разум» априорен, то наш рассудок в познавательном процессе предписывает свои законы природе:

*« ... хотя в начале это звучит странно, но, тем не менее, верно, если я скажу: рассудок не черпает свои законы (a priori) из природы, а предписывает их ей»* [35].

Наверно, во времена Канта было разумно ограничиться приближением фиксированного мышления взрослого человека – все сразу не охватишь. Кроме того, не было еще теории Чарльза Дарвина. По-видимому, если бы Кант знал теорию происхождения видов, то он явно бы задумался об эволюционном происхождении «чистого разума». Тем более что эволюционные идеи ему были не чужды – вспомним его теорию происхождения Солнечной системы. Но приближение фиксированного мышления взрослого человека накладывает свои ограничения – оно не позволяет ответить на вопросы: откуда же взялись познавательные способности, познаем ли мы истинные законы природы или наш рассудок «предписывает их ей». Фактически Кант ушел от наиболее острой части вопроса, поставленного Юмом, – он не задавался вопросом, откуда взялся «чистый разум», а только тщательно и детально исследовал свойства «чистого разума» и применение его в научном познании.

Естественно, что после появления теории происхождения видов Дарвина должна была произойти ревизия концепции априорного «чистого разума». И она произошла. Очень четко ее выразил Конрад Лоренц в знаменитой статье

«Кантовская доктрина априорного в свете современной биологии» [36]. Согласно Лоренцу, кантовские априорные категории и другие формы «чистого разума» произошли в результате естественного отбора: «Наши категории и формы восприятия, данные до индивидуального опыта, адаптированы к внешнему миру точно по той же причине, по какой копыто лошади адаптировано к почве степи и плавник рыбы адаптирован к воде до того, как рыба вылупится из икринки» [36].<sup>2)</sup>

Составляющие «чистого разума» возникали постепенно в процессе эволюции, в результате многочисленных взаимодействий с внешним миром. В эволюционном контексте «чистый разум» совсем *не априорен*, а имеет явные эволюционные *эмпирические* корни.

Такое представление дало начало эволюционной эпистемологии, современной эволюционной теории познания, развитой в философско-методологических работах К. Лоренца, К. Поппера, Д. Кэмпбелла, Г. Фоллмера. Краткий обзор эволюционной эпистемологии дан в представленной в Интернет-журнале работе [39].

Однако в работах философов как-то не ощущается понимания остроты проблемы о принципиальной способности человека познавать мир. Проблемы: почему с помощью нашей *человеческой* логики, нашего человеческого мышления, нашего интеллекта, нашего «чистого разума» мы способны познавать *природу*. Но ведь есть драма. Примерно такая же, какую, возможно, ощутил И. Кант перед «Критикой чистого разума». Надо либо подвергнуть сомнению все научные знания, – которые получены с помощью человеческого мышления, в котором можно сомневаться, – либо заняться обоснованием самого мышления. И как уже отмечалось, наиболее естественный подход к решению проблемы – исследовать биологические корни наших познавательных способностей и постараться разобраться, как и почему эти способности возникли, и почему в процессе их эволюционного возникновения появилась возможность познания природы. Наиболее четкий путь такого исследования – построение математических и компьютерных моделей когнитивной эволюции, эволюции познавательных свойств биологических организмов. Причем здесь, как это ни удивительно, возможен симбиоз философской науки, эпистемологии, с естественнонаучными исследованиями.

Как же конкретно возникали составляющие «чистого разума» в процессе эволюции, за счет чего они обеспечивали познание закономерностей природы животными, как эволюция познавательных способностей животных привела к возникновению интеллекта человека?

Есть ли задел исследований, направленных на решение этих интригующих вопросов? Оказывается, что да, есть. Такой задел развивается в направлении исследований «Адаптивное поведение» (см. Введение), дальняя цель которого близка к задаче исследования когнитивной эволюции. В следующих разделах мы обсудим методы построения моделей эволюции познавательных способностей на базе исследований эволюции адаптивного поведения.

---

<sup>2)</sup> Отметим также работы И.М. Сеченова [37,38], который один из первых занимался проблемой эволюционного происхождения логического мышления человека.

### **3. Необходима серьезная академическая программа «Эволюция, мозг, интеллект». Контур программы**

Исследования когнитивной эволюции будут вестись эффективно, если они будут идти по добротной академической программе. В качестве рабочего названия программы исследования эволюционного происхождения мышления предлагаем следующее: «Эволюция, мозг, интеллект». В рамках этой программы предлагается провести исследования когнитивной эволюции на базе методов, сложившихся в направлении «Адаптивное поведение».

Исследования целесообразно вести методом последовательных приближений. В качестве первого приближения разумно использовать сложившийся в «Адаптивном поведении» феноменологический подход.

Предложим контуры программы исследований эволюционного происхождения мышления человека.

#### **А. Разработка схем и моделей поведения аниматов, имеющих естественные потребности**

Разумно начать с моделирования целостного адаптивного поведения простых аниматов, имеющих естественные потребности: питания, размножения, безопасности. Работы [40,41] представляют собой задел таких исследований.

#### **Б. Исследование перехода от физического уровня обработки информации в нервной системе животных к уровню обобщенных образов**

Такой переход можно рассматривать, как появление в «сознании» животного свойства «понятие». Обобщенные образы можно представить как мысленные аналоги наших слов, не произносимых животными, но реально используемых ими. Например, у собаки явно есть понятия «хозяин», «свой», «чужой», «пища». И важно осмыслить, как такой весьма нетривиальный переход мог произойти в процессе эволюции.

#### **В. Исследование процессов формирования причинной связи в памяти животных**

По-видимому, запоминание причинно-следственных связей между событиями во внешней среде и адекватное использование этих связей в поведении – одно из основных свойств активного познания животным закономерностей внешнего мира. Такая связь формируется, например, при выработке условного рефлекса: животное запоминает связь между условным стимулом (УС) и следующим за ним безусловным стимулом (БС), что позволяет ему предвидеть события в окружающем мире и адекватно использовать это предвидение.

Естественный следующий шаг – переход от отдельных причинных связей к «базам знаний», к логическим выводам на основе уже сформировавшихся знаний.

#### **Г. Исследование процессов формирования логических выводов в «сознании» животных**

Фактически, уже на базе классического условного рефлекса животные способны делать «логический вывод» вида:  $\{УС, УС \rightarrow БС\} \Rightarrow БС$  или «Если имеет место условный стимул, и за условным стимулом следует безусловный, то нужно ожидать появления безусловного стимула». Такие выводы подобны выводам математика, доказывающего теоремы (см. п. 2.1). И целесообразно разобраться в системах подобных выводов, понять, насколько адаптивна логика поведения животных и насколько она подобна нашей, человеческой логике. Возможно, здесь были бы полезны семантические сети, предложенные разработчиками искусственного интеллекта [42], и сопоставление процессов выводов на семантических сетях с «выводами» поведенческой логики животных.

#### **Д. Исследование коммуникаций, возникновения языка**

Наше мышление тесно связано с языком, с языковым общением между людьми. Поэтому целесообразно проанализировать: как в процессе биологической эволюции возникал язык общения животных, как развитие коммуникаций привело к современному языку человека, как развитие коммуникаций и языка способствовало развитию логики, мышления, интеллекта человека.

Конечно же, перечисленные пункты формируют только контуры плана будущих исследований по предлагаемой программе. Тем не менее, уже сейчас видно, сколь широк фронт исследований, и как много нетривиальной, интересной и важной работы предстоит сделать.

### **4. Заделы работы по программе**

Для того чтобы представить, как вести исследования по программе, необходим хороший аналитический обзор уже имеющего задела. Такой обзор необходимо сделать в будущем. В данном разделе будут охарактеризованы только отдельные фрагменты проведенных работ.

#### **4.1. Почему «Эволюция»**

Познавательные способности биологических организмов сложились в процессе эволюции.

Кроме того, сейчас активно развивается эволюционное моделирование, работы которого могут быть использованы при исследовании когнитивной эволюции. Например, исследования модели квазивидов (об этой модели см. Введение) позволяют сделать оценку эффективности эволюционного поиска оптимального решения [23,24,43]. За счет того, что эволюционный процесс идет путем последовательного уточнения найденных решений посредством отбора и

мутаций, оптимальное решение находится достаточно быстро. В простейшем случае единственного оптимума эволюционный процесс сходится за порядка  $N$  поколений, при этом общее число особей, участвующих в эволюционном процессе при поиске оптимального решения, составляет порядка  $N^2$ . Здесь  $N$  – длина гена особи, число двоичных символов, составляющих ген особи. Эволюционный процесс в данном случае можно назвать «субоптимальным»: он не обеспечивает максимальную скорость поиска, тем не менее, он намного быстрее случайного перебора.

В определенных случаях эволюционный поиск нетривиального решения может быть более эффективен, чем обучение. Так, например, в [44,45] методом компьютерного моделирования исследовалась модель эволюции популяции самообучающихся автономных агентов и анализировалось взаимодействие между обучением и эволюцией. Система управления отдельного агента была основана на нейросетевых адаптивных критиках [46,47]. Модель отработывалась на примере агента-брокера, который имеет ресурсы двух типов: деньги и акции; сумма этих ресурсов составляет капитал агента. Агент стремился увеличить свой капитал, покупая и продавая акции.

Сравнивались три случая адаптации агента: случай L (чистое обучение), случай E (чистая эволюция), случай LE (эволюция + обучение). Обучение нейронных сетей агента проводилось методом обучения с подкреплением [15], при этом использовалось  $\varepsilon$ -жадное правило, в котором с малой вероятностью  $\varepsilon$  действия агента выбирались случайными, а с вероятностью  $1-\varepsilon$  – оптимальными в соответствии с полученным обучением.

Было проведено сравнение ресурса, приобретаемого агентами за  $T = 200$  временных тактов для этих трех способов адаптации. Для случаев E и LE считалось, что  $T$  – продолжительность поколения и регистрировалось максимальное значение ресурса в популяции  $R_{max}(n_g)$  в конце каждого поколения, в этих случаях  $n_g$  – номер поколения. В случае L (чистое обучение) рассматривался только один агент, ресурс которого для удобства сравнения со случаями E и LE обнулялся каждые  $T = 200$  тактов времени. В этом случае индекс  $n_g$  увеличивался на единицу после каждых  $T$  временных тактов.

Зависимости  $R_{max}(n_g)$  показаны на рис. 3. Чтобы исключить уменьшение значения  $R_{max}(n_g)$  из-за случайного выбора действий при применении  $\varepsilon$ -жадного правила [15] для случаев LE и L полагалось  $\varepsilon = 0$  после  $n_g = 100$  для случая LE и после  $n_g = 2000$  для случая L (на рис. 3 видно резкое увеличение  $R_{max}(n_g)$  после  $n_g = 100$  и  $n_g = 2000$  для соответствующих случаев).

Рис. 3 показывает, что обучение, объединенное с эволюцией (случай LE), и чистая эволюция (случай E) дают одно и то же значение конечного ресурса  $R_{max}(500) = 6,5$ , соответствующее оптимальной стратегии поведения (покупки и продажи акций). Однако эволюция и обучение вместе обеспечивают нахождение больших значений  $R_{max}$  быстрее, чем эволюция отдельно – существует симбиотическое взаимодействие между обучением и эволюцией.

В случае L (чистое обучение) асимптотическое значение ресурса ( $R_{max}(2500) = 5,4$ ) было существенно меньше, чем для случаев E и LE. Анализ компьютерных экспериментов показал, что одно обучение обеспечивает нахождение только «субоптимальной» стратегии поведения: агент держит капитал в

акциях при росте и при слабом падении курса и переводит капитал в деньги при сильном падении курса.

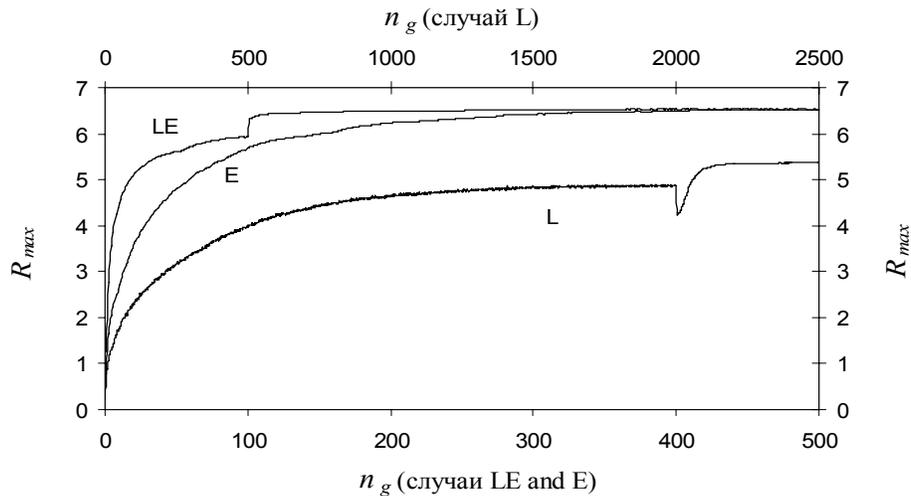


Рис. 3. Зависимости  $R_{max}(n_g)$ . Кривая LE соответствует случаю эволюции, объединенной с обучением, кривая E – случаю чистой эволюции, кривая L – случаю чистого обучения. Временная шкала для случаев LE и E (номер поколения  $n_g$ ) представлена снизу, для случая L (индекс  $n_g$ ) – сверху. Кривые усреднены по 1000 компьютерным экспериментам.

Итак, приведенные результаты демонстрируют, что эволюционная адаптация в рассмотренной модели более эффективна, чем обучение. Это связано с тем, что обучение в нейронных сетях агентов имеет ряд промежуточных шагов, а эволюция идет к поиску оптимума более прямым путем. Тем не менее, хотя обучение и несовершенно, оно способствует более быстрому нахождению оптимальной стратегии поведения по сравнению со случаем чистой эволюции (см. графики LE и E на рис. 3).

Таким образом, эволюционный подход важен как с точки зрения развития исследования когнитивной эволюции в целом, так и с учетом того, что эволюционные процессы представляют собой эффективный метод адаптации.

#### 4.2. Почему «Мозг»

Познавательные способности животных обеспечиваются их мозгом. Исследования нейронных сетей идут широким фронтом. И хотя эти исследования в основном прикладные, тем не менее, есть большое количество работ, которые анализируют эволюционные аспекты становления нейронных структур мозга, обеспечивающих познавательные процессы. Например, в [48] проанализирована эволюция нейронных структур мозга животных, играющих важную роль при выборе действий, обеспечивающих адаптивное поведение.

Многие работы по нейронным сетям посвящены распознаванию образов, т.е. анализу того, как происходит сокращение сенсорной информации – от набора признаков к классам образов. См. например, теоретические работы [49,50]. Это связано с эволюционным процессом перехода от физического уровня обработки информации в нервной системе животных к уровню обобщенных образов, изучение которого представляет собой один из пунктов предлагаемой программы исследований (см. п. Б в разделе 3).

Работа [51] непосредственно посвящена изучению процессов в нейронных моделирующих полях, процессов формирования иерархической системы обобщенных понятий с помощью нейроподобной структуры.

Начата работа по конструированию схем адаптивного поведения анимата с естественными потребностями (проект «Мозг анимата») на основе теории функциональных систем [52-55]. Этот проект может быть положен в основу базовых моделей когнитивной эволюции.

#### **4.3. Почему «Интеллект»**

Конечной целью предлагаемых исследований должен быть процесс эволюционного формирования логического мышления человека. Эта цель, несомненно, актуальна, так как сейчас идут активные работы по попыткам моделирования естественного и искусственного интеллекта. В частности, такие исследования непосредственно связаны с разработкой роботов, обладающих элементами интеллекта, см. например, работы [56].

Интересные работы связаны с методами формализации правил принятия решения. Например, в [57] предложены обобщенные, соответствующие разным уровням биологической эволюции правила принятия решений. Правила учитывают ассоциативные модели, модели классического и инструментального условного рефлексов, модели предвидения результатов действия. Проработаны схемы обучения и принятия решения на основе этих правил, проведено соответствующее компьютерное моделирование, подтвердившее эффективность предложенных правил принятия решений.

Выделим также работу [58], в которой разработаны схемы моделирования мышления и организации интеллектуального поведения и подчеркивается, что интеллект необходим для организации адаптивного поведения.

В данном разделе отмечены только некоторые научные работы, которые связаны с предлагаемой программой. Однако число таких работ велико и анализ задела исследований по программе должен быть продолжен.

### **5. Заключение**

Итак, предложена программа исследований на стыке информатики и биологии, таких исследований, которые могут внести радикальный вклад в научное миропонимание. Работы по программе связаны с современными исследованиями по теории познания и когнитивным наукам. Выделена ключевая проблема – проблема применимости логического мышления человека в научном познании природы. В качестве первого приближения целесообразно изучать

эволюцию познавательных способностей животных на феноменологическом уровне, используя подходы математического и компьютерного моделирования, сложившиеся в современном направлении «Адаптивное поведение».

### Литература

1. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 1104 с.
2. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. М.: Финансы и статистика, 2002.
3. Лекции по нейронным сетям. Подборка по конференциям «Нейроинформатика-1999» – «Нейроинформатика-2007». Под ред. Ю.В. Тюменцева. Представлены на сайте: <http://www.niisi.ru/iont/ni/Library/>
4. Holland J.H. Adaptation in Natural and Artificial Systems. Ann Arbor, MI: The University of Michigan Press, 1975 (1st edn). Boston, MA: MIT Press., 1992 (2nd edn).
5. Емельянов В.В., Курейчик В.М., Курейчик В.В. Теория и практика эволюционного моделирования. М.: Физматлит, 2003.
6. Meyer J.-A., Wilson S. W. (Eds) From animals to animats. Proceedings of the First International Conference on Simulation of Adaptive Behavior. The MIT Press: Cambridge, Massachusetts, London, England. 1991.
7. От моделей поведения к искусственному интеллекту. Серия «Науки об искусственном» (под ред. Редько В.Г.). М.: УРСС, 2006.
8. Nolfi S., Baldassarre G., Calabretta R., Hallam J., Marocco D., Miglino O., Meyer J-A, Parisi D. (Eds). From animals to animats 9: Proceedings of the Ninth International Conference on Simulation of Adaptive Behaviour. LNAI. 2006. Volume 4095. Berlin, Germany: Springer Verlag.
9. Donnart J.Y., Meyer J.A. Learning reactive and planning rules in a motivationally autonomous animat // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part B: Cybernetics, 1996. V. 26. N. 3. PP. 381-395. See also: <http://animatlab.lip6.fr/index.en.html>
10. Жданов А.А. Метод автономного адаптивного управления // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1999. N. 5. С. 127-134.
11. Цетлин М.Л. Исследования по теории автоматов и моделирование биологических систем. М.: Наука, 1969. 316 с.
12. Бонгард М.М., Лосев И.С., Смирнов М.С. Проект модели организации поведения – «Животное» // Моделирование обучения и поведения. М.: Наука, 1975. С.152-171.
13. Гаазе-Рапопорт М.Г., Поспелов Д.А. От амебы до робота: модели поведения. М.: Наука, 1987, М.: УРСС, 2004.
14. Holland J.H., Holyoak K.J., Nisbett R.E., Thagard P. Induction: Processes of Inference, Learning, and Discovery. Cambridge, MA: MIT Press, 1986.
15. Sutton R., Barto A. Reinforcement Learning: An Introduction. Cambridge: MIT Press, 1998. See also: <http://www.cs.ualberta.ca/~sutton/book/the-book.html>
16. Непомнящих В.А. Аниматы как модель поведения животных // IV Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2002». Материалы дискуссии «Проблемы интеллектуального управления – общесистемные, эволюционные и нейросетевые аспекты». М.: МИФИ, 2003. С. 58-76. См. также <http://www.keldysh.ru/pages/BioCyber/RT/Nepomn.htm>
17. Непомнящих В.А. Поиск общих принципов адаптивного поведения живых организмов и аниматов // Новости искусственного интеллекта. 2002. N. 2. С. 48-53.
18. Эйген М. Самоорганизация материи и эволюция биологических макромолекул. М.: Мир, 1973. 216 с.
19. Эйген М., Шустер П. Гиперцикл. Принципы самоорганизации макромолекул. М.: Мир, 1982. 270 с.

20. Crick F.H.C. The origin of the genetic code // *Journal of Molecular Biology*. 1968. Vol. 38. No.3. PP. 367-379.
21. Dyson F.J. A model for the origin of life // *J. Mol. Evol.* 1982. Vol.18. No.5. PP.344-350.
22. Anderson P.W. Suggested model for prebiotic evolution: the use of chaos // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 1983. V.80. No.11. PP. 3386-3390.
23. Редько В.Г. Оценка скорости эволюции в моделях Эйгена и Куна // *Биофизика*. 1986. Т. 31. N.3. С. 511-516.
24. Редько В.Г., Цой Ю.Р. Оценка эффективности эволюционных алгоритмов // *Доклады АН*, 2005. Т. 404. N. 3. С. 312-315.
25. Ратнер В.А., Шамин В.В. Сайзеры: моделирование фундаментальных особенностей молекулярно-биологической организации. Соответствие общих свойств и конструктивных особенностей коллективов макромолекул // *Журн. общ. биологии*. 1983. Т.44. N.1. С. 51-61.
26. Редько В.Г. Адаптивный сайзер // *Биофизика*. 1990. Т. 35. Вып. 6. С. 1007-1011.
27. Редько В.Г. Эволюционная кибернетика. М.: Наука, 2001. 156 с.
28. Редько В.Г. Эволюция, нейронные сети, интеллект: Модели и концепции эволюционной кибернетики. Серия «Синергетика: от прошлого к будущему». М.: УРСС, 2005. 224 с.
29. Генцен Г. Исследования логических выводов // *Математическая теория логического вывода*. М.: Наука. 1967. С.9-76.
30. Генцен Г. Непротиворечивость чистой теории чисел // *Математическая теория логического вывода*. М.: Наука. 1967. С.77-153.
31. Пуанкаре А. О науке. М.: Наука. 1990, 736 с. (стр. 404-405).
32. Вигнер Е. Непостижимая эффективность математики в естественных науках // *Успехи физических наук*. 1968. Т. 94. Вып. 3. С. 535-546.
33. Юм Д. Исследование о человеческом познании. Соч. в 2-х томах. Т.2. М.: Мысль, 1966. С. 5-169.
34. Кант И. Критика чистого разума. Соч. в 6-ти томах. Т.3. М.: Мысль, 1964. С. 69-695.
35. Кант И. Прологомены ко всякой будущей метафизике, могущей появиться как наука. Соч. в 6-ти томах. Т.4, часть 1. М.: Мысль, 1965. С. 67-210.
36. Lorenz K. Kant's doctrine of the a priori in the light of contemporary biology // *Learning, Development and Culture* (ed. Plotkin H.). N.Y. 1982.
37. Сеченов И.М. Рефлексы головного мозга. Серия «Из наследия мировой психологии». Изд.2. УРСС, 2007. 128 с.
38. Сеченов И.М. Элементы мысли. Сб. избр. статей. М. — Л., 1943. СПб.: Питер, 2001. 416 с.
39. Кузнецов Н.А., Баксанский О.Е., Гречишкина Н.А. Происхождение знания: истоки и основания // *Информационные процессы*. 2007. Том 7. №1. С. 72-92. <http://www.jip.ru/2007/72-92-2007.pdf>
40. Бурцев М.С., Гусарев Р.В., Редько В.Г. Исследование механизмов целенаправленного адаптивного управления // *Изв. РАН. Теория и системы управления*. 2002. No 6. С. 55-62.
41. Бурцев М.С. Модель эволюционного возникновения целенаправленного адаптивного поведения. 2. Исследование развития иерархии целей // *Препринт ИПМ РАН*, 2002, N. 69.
42. *Semantic Networks in Artificial Intelligence* (F. Lehmann, E.Y. Rodin, eds.), Pergamon Press, Oxford, 1992.
43. Редько В.Г. Спиновые стекла и эволюция // *Биофизика*. 1990. Т. 35. Вып. 5. С. 831-834.
44. Red'ko V.G., Mosalov O.P., Prokhorov D.V. A model of evolution and learning // *Neural Networks*, 2005. Vol. 18, No 5-6. PP. 738-745.

45. Мосалов О.П., Прохоров Д.В., Редько В.Г. Сравнение эволюции и обучения как методов адаптации агентов // Научная сессия МИФИ - 2006. VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2006»: Сборник научных трудов. В 3-х частях. Ч.1. М.: МИФИ, 2006. С. 201-208.
46. Редько В.Г., Прохоров Д.В. Нейросетевые адаптивные критики // Научная сессия МИФИ-2004. VI Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2004». Сборник научных трудов. Часть 2. М.: МИФИ, 2004. С. 77-84.
47. Prokhorov D.V., Wunsch D.C. Adaptive critic designs // IEEE Trans. Neural Networks, 1997. Vol. 8. No.5. PP. 997-1007.
48. Prescott T.J. Forced moves or good tricks in design space? Landmarks in the evolution of neural mechanisms for action selection // Adaptive Behavior. 2007. Vol. 15. No. 1. PP. 9-31.
49. Крыжановский Б.В., Крыжановский В.М., Микаэлян А.Л. Доменная модель нейронной сети // Доклады АН. 2005. Т. 401. №4. С. 462-466.
50. Крыжановский Б.В., Крыжановский В.М., Микаэлян А.Л. Применение процедуры клиппирования в задачах бинарной минимизации квадратичного функционала // Доклады АН. 2007. Т. 413. №6. С. 730-733.
51. Перловский Л.И. К физической теории мышления: теория нейронных моделирующих полей // Нейроинформатика, 2006. Том 1, № 2. С. 175-196.  
<http://www.niisi.ru/iont/ni/Journal/N2/>
52. Анохин П.К. Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем // Принципы системной организации функций. М.: Наука, 1973. С. 5-61.
53. Анохин К.В., Бурцев М.С., Зарайская И.Ю., Лукашев А.О., Редько В.Г. Проект «Мозг анимата»: разработка модели адаптивного поведения на основе теории функциональных систем // Восьмая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием. Труды конференции. М.: Физматлит, 2002. Т.2. С.781-789.
54. Red'ko V.G., Prokhorov D.V., Burtsev M.S. Theory of functional systems, adaptive critics and neural networks // International Joint Conference on Neural Networks, Budapest, 2004. PP. 1787-1792.
55. Red'ko V.G., Anokhin K.V., Burtsev M.S., Manolov A.I., Mosalov O.P., Nepomnyashchikh V.A., Prokhorov D.V. Project "Animat Brain": designing the animat control system on the basis of the functional systems theory // In Butz, M.V., Sigaud, O., Pezzulo, G., Baldassarre, G. (Eds.), Anticipatory Behavior in Adaptive Learning Systems: From Brains to Individual and Social Behavior. LNAI 4520, Berlin Heidelberg: Springer Verlag. 2007. PP. 94-107.
56. Станкевич Л.А. Нейрологические средства систем управления интеллектуальных роботов // VI Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2004». Лекции по нейроинформатике. Часть 2. М.: МИФИ, 2004. С. 57-110.
57. Witkowski M. An action-selection calculus // Adaptive Behavior. 2007. Vol. 15. No. 1. PP. 73-97.
58. Вайнцвайг М.Н., Полякова М.П. О моделировании мышления // От моделей поведения к искусственному интеллекту. Серия «Науки об искусственном» (под ред. Редько В.Г.). М.: УРСС, 2006. С. 280-286.

Статья поступила 23 августа 2007 г.