

ОБ ИССЛЕДОВАНИИ КОГНИТИВНОЙ ЭВОЛЮЦИИ *

В.Г. Редько

НИИ Системных исследований РАН
E-mail: vcredko@gmail.com

Аннотация. Обсуждается подход к исследованию когнитивной эволюции на основе моделей адаптивного поведения. Характеризуются современные исследования в области адаптивного поведения. Предлагается программа будущих исследований когнитивной эволюции.

1. ИНФОРМАТИКА И БИОЛОГИЯ – НАУКИ 21-ГО ВЕКА. ЧТО НА СТЫКЕ?

На стыке информатики и биологии есть ряд глубоких проблем, имеющих мировоззренческое значение, исследованию которых до сих пор уделяется несоизмеримо малое внимание по сравнению с их значимостью.

Действительно, в процессе биологической эволюции возникли чрезвычайно сложные и вместе с тем удивительно эффективно функционирующие живые организмы. Эффективность, гармоничность и согласованность работы «компонент» живых существ обеспечивается биологическими управляющими системами. Но каковы эти управляющие системы? Как и почему они эволюционно возникли? Какие информационные процессы обеспечивают работу этих управляющих систем? Как животные познают внешний мир и используют это познание для управления своим поведением? Как эволюционное развитие познавательных способностей животных привело к возникновению интеллекта человека? До какой степени исследования причин возникновения естественного интеллекта могут способствовать развитию искусственного интеллекта?

Среди спектра подобных вопросов особое место занимают две крупные проблемы, исследование которых важно с точки зрения развития научного миропонимания:

- проблема происхождения молекулярно-генетических систем управления живыми организмами в процессе происхождения жизни,
- проблема происхождения интеллекта человека.

В докладе обсуждаются подходы к анализу второй из этих проблем на основе моделей адаптивного поведения. Относительно первой проблемы отметим, что есть ряд моделей (квазивидов, гиперциклов, сайзеров), которые позволяют представить гипотетические этапы происхождения молекулярно-генетических систем управления в процессе предбиологической эволюции (см. обзор этих моделей в [1]).

Наиболее естественный подход к исследованию проблемы происхождения интеллекта – построение математических и компьютерных моделей «интеллектуальных изобретений» биологической эволюции, таких как безусловный рефлекс, привыкание, классический условный рефлекс, инструментальный условный рефлекс, цепи рефлексов,..., логика [2]. То есть, целесообразно с помощью моделей представить общую картину когнитивной эволюции – эволюции когнитивных способностей животных и эволюционного происхождения интеллекта человека.

Есть ли задел таких исследований? Оказывается, что да, есть. Есть направление исследований «Адаптивное поведение», дальняя цель которого очень близка к задаче моделирования когнитивной эволюции.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 07-01-00180).

2. НАПРАВЛЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ «АДАПТИВНОЕ ПОВЕДЕНИЕ»

Направление исследований «Адаптивное поведение» активно развивается с начала 1990-х годов [3]. 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) или «агентами».

Направление исследований «Адаптивное поведение» рассматривается как бионический подход к разработке систем искусственного интеллекта.

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.

Программа-максимум соответствует задаче моделирования когнитивной эволюции.

В настоящее время исследования адаптивного поведения включают в себя работы по следующим темам:

- сенсорные системы и управление,
- обучение и адаптация,
- выбор действий, навигация и внутренние модели мира,
- антиципаторное адаптивное поведение,
- нейроэволюция (настройка нейронных сетей аниматов эволюционными методами),
- возникновение языка и коммуникаций при адаптивном поведении,
- коллективное и социальное поведение,
- биологически инспирированное адаптивное поведение роботов,
- поведение и мышление как сложные адаптивные системы.

3. ПРИМЕРЫ МОДЕЛЕЙ АДАПТИВНОГО ПОВЕДЕНИЯ

3.1. Модели мозга и поведения в Институте нейронаук Дж. Эдельмана. В Институте нейронаук Дж. Эдельмана (<http://www.nsi.edu>) уже более 25 лет ведутся разработки поколений моделей работы мозга (Darwin I, Darwin II,...) и исследования адаптивного поведения искусственного организма NOMAD (Neurally Organized Mobile Adaptive Device), построенного на базе этих моделей.

Работы по NOMAD'у – исследование поведения адаптивного устройства на основе моделей мозга, принципы моделирования которого состоят в следующем:

- 1) Устройство помещается в реальную физическую среду
- 2) Имеется некоторая поведенческая задача, которую должно решать устройство
- 3) Поведение устройства контролируется модельной нервной системой, которая отражает архитектуру мозга и динамику процессов в мозге
- 4) Поведение устройства и процессы в модельной нервной системе должны допускать сравнение с экспериментальными биологическими данными

В одной из последних работ по NOMAD'у [4] промоделировано нетривиальное поведение мыши в лабиринте Морриса.

Исследования поведения мыши или крысы в лабиринте Морриса – один из канонических биологических экспериментов, который состоит в следующем. Имеется бассейн с непрозрачной жидкостью (например, это может быть вода, подкрашенная молоком), на бортах бассейна есть рисунки, которые мышь видит и может использовать для ориентировки. В определенном месте бассейна есть скрытая платформа, которую мышь может найти и тем самым спастись – не утонуть. Мышь бросают в бассейн, она плавает некоторое время и либо находит платформу и спасается, либо начинает тонуть (тогда ее спасает экспериментатор). После ряда экспериментов мышь начинает использовать ориентиры на бортах бассейна и находить платформу за короткое время.

Поведение NOMAD'а в лабиринте Морриса моделировалась следующим образом. NOMAD представлял собой подвижное устройство на колесах, управляемое нейронной сетью, состоящей из 90000 нейронов ($1,4 \cdot 10^6$ синапсов), в которой было выделено 50 различных нейронных областей, в частности, были выделены несколько областей гиппокампа.

Сенсорная система NOMAD'а включала зрение, обонятельную систему, позволяющую отслеживать свои собственные следы, систему инфракрасных приемников-излучателей, обеспечивающую избегание столкновений, и специальный детектор скрытой от зрения платформы, позволяющий обнаруживать эту платформу только тогда, когда NOMAD находится непосредственно над ней.

NOMAD помещался в комнату, в которой была скрытая платформа; на стенах комнаты были разноцветные полосы – ориентиры. В начале каждого из компьютерных экспериментов NOMAD помещался в разные участки комнаты, задача NOMAD'а была найти скрытую платформу по ориентирам. Обучение нейронных сетей NOMAD'а осуществлялось по модифицированному правилу Хебба на основе подкреплений (получаемых при нахождении скрытой платформы) и наказаний (получаемых при приближении к стенам комнаты).

Было продемонстрировано, что

- 1) NOMAD обучается находить платформу быстро (за 10-20 попыток);
- 2) в модельном гиппокампе формируются нейроны места, активные только тогда, когда NOMAD находится в определенных участках комнаты.
- 3) в модельном гиппокампе формируются причинно-следственные зависимости между отдельными нейронными областями.

3.2. Модель эволюционного возникновения коммуникаций в коллективе роботов. В работе [5] исследовалась следующая проблема. Есть четыре робота, каждый из которых управляется рекуррентной нейронной сетью, состоящей из 5-ти нейронов. На входы нейронов поступают сигналы от 8-ми инфракрасных датчиков, обеспечивающих восприятие окружающего робот пространства, и от 4-х датчиков, воспринимающих звуковые сигналы с разных сторон. Нейронная сеть имела 3 выходных нейрона, два из которых определяли скорость движения двух колес, а третий нейрон – интенсивность силы звука, издаваемого в данный момент роботом. В ограниченной области пространства имелось две кормушки, и роботам нужно было, используя свои нейронные сети и звуковые сигналы разной интенсивности, как можно быстрее распределиться по кормушкам: по 2 робота на каждую из кормушек.

Нейронные сети роботов оптимизировались эволюционным путем. В результате в течение 2000 поколений у роботов сформировались сигналы 5 различных видов (т.е. разной интенсивности). Используя эти сигналы, роботы достаточно устойчиво находили требуемое распределение по кормушкам.

В целом в [5] продемонстрировано, что в эволюционирующей популяции роботов, управляемых рекуррентными нейронными сетями, может формироваться система коммуникаций, позволяющая решать достаточно нетривиальную задачу распределения роботов по кормушкам.

3.3. Бионическая модель поискового адаптивного поведения. Одно из актуальных направлений исследований в рамках моделирования адаптивного поведения – имитация поискового поведения животных. В работе [6] исследовалось поисковое поведение на примере личинок ручейников *Chaetopteryx villosa* – насекомых, обитающих на дне водоемов. Личинки носят на себе «домик» – трубку из песка и других частиц. Личинки предпочитают строить домик из крупных частиц. Однако поиск крупных частиц на дне водоема требует затрат времени и энергии, не известных ручейнику заранее, поэтому представляет для ручейников трудную задачу.

В [6] построена компьютерная модель адаптивного поведения личинок ручейников, строящих чехол-домик из частиц разного размера и ведущих поиск скоплений подходящих частиц. Ручейники имеют две тактики поведения: А) искать и прикреплять к домику частицы в своей локальной окрестности, Б) перемещаться на новое место. Модель характеризуется как своей спецификой, обусловленной памятью о размерах последних обработанных частиц, так и

общими свойствами инерционного переключения между тактиками поведения. Обнаруженная в данном моделировании инерционность в переключении между тактиками поведения соответствует известному принципу доминанты; она должна быть полезна и для искусственных автономных адаптивных систем при формировании поведения с несколькими тактиками или целями.

3.4. Проект «Мозг Анимата». В наших работах предложен проект «Мозг Анимата» [7], который нацелен на формирование общей схемы построения моделей адаптивного поведения. Проект основан на теории функциональных систем П.К. Анохина.

Предполагается, что система управления аниматом имеет иерархическую архитектуру. Базовым элементом системы управления является отдельная функциональная система (ФС). Верхний уровень соответствует основным потребностям организма: питания, размножения, безопасности, накопления знаний. Более низкие уровни соответствуют тактическим целям поведения. Блоки всех этих уровней реализуются с помощью ФС. Управление с верхних уровней может передаваться на нижние уровни и возвращаться назад.

Предполагается простая формализация ФС на основе нейронных сетей, которые обучаются с помощью метода обучения с подкреплением (без учителя, на основе только поощрений и наказаний, получаемых из внешней среды). Каждая ФС состоит из двух нейронных сетей: Модель и Критик. Роль Модели – прогноз будущих ситуаций. Роль Критика – оценка качества ситуаций. На основе прогнозов и оценок выбираются действия, которые приводят к ситуациям с максимальными значениями качества, сами оценки качества ситуаций постепенно уточняются в процессе обучения. Для проверки работоспособности ФС нами было проведено компьютерное моделирование эволюции популяции адаптивных агентов, система управления которых базировалась на таких же нейронных сетях: Модель и Критик (см. ниже).

3.5. Модель эволюции популяции адаптивных агентов [8]. Была исследована модель эволюции популяции самообучающихся агентов. Модель отрабатывалась на примере агентов-брокеров, которые предсказывают изменения биржевого курса акций и используют эти предсказания для выбора действий. Система управления агента состоит из двух нейронных сетей: Модель и Критик. Веса синапсов нейронных сетей могли адаптироваться как с помощью обучения, так и в процессе эволюции. Проведено сравнение трех вариантов модели, в которых включены 1) либо обучение и эволюция одновременно, 2) либо отдельно эволюция, 3) либо отдельно обучение. Показано, что в данной модели может наблюдаться эффект Болдуина, т.е. первоначально приобретаемые навыки агентов в процессе эволюции становятся наследуемыми.

Опыт работы с моделью продемонстрировал важность вопроса о том, какие системы управления автономных агентов являются эволюционно устойчивыми. В частности, проведенное моделирование продемонстрировало, что нейросетевые системы управления могут быть эволюционно нестабильны, если процесс обучения неустойчив относительно возмущений весов синапсов нейронных сетей.

4. КОНТУРЫ ПРОГРАММЫ БУДУЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ современных исследований адаптивного поведения показывает, что хотя проделана большая работа, ученые еще очень далеки от понимания того, как возникали и развивались системы управления живых организмов, как развитие этих систем способствовало эволюции когнитивных способностей животных, и как процесс когнитивной эволюции привел к возникновению интеллекта человека. Иными словами, у нас есть некоторые небольшие фрагменты картины, но мы еще видим всей картины. Есть определенные подходы к исследованиям, но само исследование интеллектуального адаптивного поведения, природы естественного интеллекта, эволюционного происхождения интеллекта еще не проведено. То есть, есть огромная область чрезвычайно интересных исследований, которые только-только начинаются.

Предложим эскизный план будущих исследований, направленных на решение проблемы происхождения интеллекта.

А) Разработка моделей адаптивного поведения аниматов с несколькими естественными потребностями: питания, размножения, безопасности. Такие модели естественно развивать на основе проекта «Мозг анимата».

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 причинных связей в памяти животных. Повидимому, запоминание причинно-следственных связей между событиями во внешней среде и адекватное использование этих связей в поведении – одно из ключевых 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 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 --> БС} => БС или «Если имеет место условный стимул, и за условным стимулом следует безусловный, то нужно ожидать появления безусловного стимула». Можно говорить, что такие выводы подобны выводам математика, доказывающего теоремы. И целесообразно разобраться в системах подобных выводов, понять, насколько адаптивна логика поведения животных и насколько она подобна нашей, человеческой логике.

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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Редько В.Г. Эволюция, нейронные сети, интеллект: Модели и концепции эволюционной кибернетики. Серия «Синергетика: от прошлого к будущему». М.: УРСС, 2005. 224 с.
2. Воронин Л.Г. Эволюция высшей нервной деятельности. М.: Наука. 1977. 128 с.
3. От моделей поведения к искусственному интеллекту. Серия «Науки об искусственном» (под ред. Редько В.Г.). М.: УРСС, 2006. 456 с.
4. Krichmar J.L., Seth A.K., Nitz D.A., Fleischer J.G., Edelman G.M. Spatial navigation and causal analysis in a brain-based device modeling cortical-hippocampal interactions // *Neuroinformatics*, 2005, Vol.3, No 3, PP. 197-221.
5. Marocco D., Nolfi S. Origins of communication in evolving robots // In 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. PP. 789-803.
6. Непомнящих В. А., Попов Е. Е., Редько В. Г.. Бионическая модель адаптивного поискового поведения // Изв. РАН. Теория и системы управления, 2008. №1. С. 58-66.

7. 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.
8. 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.