

Как исследовать эволюционное происхождение интеллекта?

Редько В.Г.

НИИ системных исследований РАН

vgredko@gmail.com

1. Введение

Как произошел интеллект человека? Можно ли с помощью математического и компьютерного моделирования представить эволюционные процессы происхождения человеческого мышления? Почему наше мышление таково, каково оно есть? Почему оно применимо в научном познании?

В настоящей статье обсуждается направление исследований, которое связано с этими интригующими вопросами. Речь пойдет о моделировании когнитивной эволюции, эволюции познавательных способностей биологических организмов, той эволюции, в процессе которой произошло наше логическое мышление.

Причем моделирование когнитивной эволюции – это междисциплинарное направление исследований, связанное с основаниями математики, с теорией познания, с когнитивной наукой, с биологическими исследованиями, с работами в области вычислительных наук.

В настоящей статье аргументируется, что актуальность исследований когнитивной эволюции связана с глубокой гносеологической проблемой: почему формальное логическое человеческое мышление, казалось бы, совсем не связанное с реальным физическим миром, применимо к познанию природы? Показано, что имеются заделы моделирования когнитивной эволюции, развиваемые в целом ряде направлений вычислительных наук. Обсуждаются перспективы моделирования когнитивной эволюции.

2. Гносеологическая проблема

Наиболее серьезные и глубокие когнитивные процессы – это процессы научного познания. Но насколько способен человек познавать внешний мир? Почему формальный логический вывод, сделанный *человеком*, применим к реальным объектам в *природе*? Поясним эти вопросы. Рассмотрим, например, физику, одну из фундаментальных естественнонаучных дисциплин. Мощь физики связана с эффективным применением математики. Но математик делает логические выводы, доказывает теоремы независимо от внешнего мира, используя свое мышление. Почему же эти выводы применимы к реальной физической природе?

Близкие вопросы давно интересовали ученых. В 1781 году появилась знаменитая «Критика чистого разума» И. Канта [1], а два года спустя вышло популярное изложение «Критики...» «Пролегомены ко всякой будущей метафизике, могущей появиться, как наука» (Термин пролегомены означает предварительные рассуждения, введение в изучение). [2]. И. Кант провел исследование познавательных процессов в определенном приближении – приближении фиксированного мышления взрослого человека. Он не задавался вопросом, *откуда* берутся познавательные способности, он констатировал факт, что они существуют, и исследовал, *как* они работают. В результате этого анализа И. Кант пришел к выводу, что существует система категорий, концепций, логических правил и методов вывода, 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: И. Кант утверждает – и в рамках данного приближения вполне логично, – что так как «чистый

разум» априорен, то наш рассудок в познавательном процессе предписывает свои законы природе [2]:

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

Наверно, во времена И. Канта было разумно ограничиться приближением фиксированного мышления взрослого человека – все сразу не охватишь. Кроме того, не было еще теории происхождения видов Ч. Дарвина. Естественно, что после появления этой теории должна была произойти ревизия концепции априорного «чистого разума». И она произошла. Очень четко ее выразил один из основателей этологии (науки о поведении животных) лауреат Нобелевской премии К. Лоренц в статье «Кантовская концепция априорности в свете современной биологии» (1941 г.) [3]. Согласно К. Лоренцу кантовские априорные категории и другие формы «чистого разума» произошли в результате естественного отбора. 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.

Фактически, И. Кант и К. Лоренц показали, что если не рассматривать эволюционное происхождение методов познания, то нет ответа на ключевой вопрос о применимости логического мышления человека к познанию природы.

3. Можно ли в принципе вести исследования когнитивной эволюции?

Как же разобраться в происхождении логических форм мышления? Можно ли промоделировать это происхождение? Какие методы использовать? Как такие исследования связаны с основаниями науки, основаниями математики? Есть ли задел работ по моделированию эволюции познавательных способностей животных? Далее обсуждаются перечисленные вопросы. Но, прежде всего, кратко остановимся на вопросе: можно ли вообще в принципе вести такие исследования?

Итак, можно ли проследить эволюционные корни логических правил, используемых в дедуктивных доказательствах? По мнению автора настоящей статьи, да, можно.

Приведем следующую аналогию. 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

$$\frac{A, A \rightarrow B}{B}$$

Перейдем от математика к собаке, у которой вырабатывают классический условный рефлекс. При выработке рефлекса в памяти собаки формируется связь «за УС должен последовать БС» (УС – условный стимул, БС – безусловный стимул). Когда после выработки рефлекса собаке предъявляют УС, то она, помня о хранящейся в ее памяти «записи» УС → БС, делает элементарный «вывод»

$$\frac{УС, УС \rightarrow БС}{БС}$$

И собака ожидает БС. Например, в опытах И.П. Павлова после выработки условного рефлекса собака после сигнала звонка (УС) ожидает появления пищи (БС), и у собаки происходит слюноотделение.

Конечно, чисто дедуктивное применение формального правила *modus ponens* математиком и основанный на обобщении опыта индуктивный «вывод», который делает собака, явно различаются. Тем не менее, и в первом и во втором случаях речь идет о следственной связи между математическими утверждениями либо событиями: из *A* следует *B*, за УС следует БС.

Итак, применение правила *modus ponens* при дедуктивном выводе аналогично «выводу» на основе классического условного рефлекса. Указанная аналогия позволяет задуматься об эволюционных корнях логических правил, используемых в математике.

Таким образом, можно анализировать эволюционные корни логического мышления и строить модели эволюционного происхождения логических правил, используемых в научном познании. Естественно, что при моделировании когнитивной эволюции целесообразно рассматривать использование познавательных способностей животных при их приспособлении к внешней среде. Познавательные свойства были полезны для животных и закреплялись в процессе естественного отбора.

При этом результат эволюции – правила логического вывода, используемые при математических доказательствах, – известны и достаточно хорошо формализованы [4]. В основе этих выводов – элементарные правила, такие как *modus ponens*. Важно подчеркнуть, что были и попытки пересмотра оснований математики в близком к исследованиям когнитивной эволюции контексте. В статье В.Ф. Турчина (1987 г.) [5] предпринята весьма нетривиальная попытка пересмотра оснований математики и рассмотрена возможность построения предиктивных логических правил в контексте теории множеств и кибернетического подхода к обоснованию математики.

Как же конкретно вести моделирование когнитивной эволюции? По мнению автора, было бы целесообразно с помощью математических и компьютерных моделей представить общую картину эволюции когнитивных способностей животных и эволюционного происхождения интеллекта человека.

Есть ли задел моделирования когнитивной эволюции? Оказывается, что да, такой задел есть. В настоящее время в нескольких научных направлениях ведутся исследования, которые могут быть использованы при моделировании когнитивной эволюции. Эти направления таковы: «Адаптивное поведение», «Искусственная жизнь», «Когнитивные архитектуры», научные основы искусственного интеллекта. В основном это работы по основанным на биологических аналогиях математическим и компьютерным моделям автономных агентов с когнитивными свойствами. Кратко охарактеризуем эти направления.

4. Заделы исследований когнитивной эволюции

Адаптивное поведение. Направление исследований «Адаптивное поведение» сформировалось в начале 1990-х годов [6]. Основной подход этих исследований – конструирование и изучение искусственных «организмов» (в виде компьютерной программы или робота), способных приспосабливаться к переменной внешней среде. Исследователи адаптивного поведения разрабатывают такие модели, которые применимы к описанию поведения как реального животного, так и искусственного модельного организма. Дальняя цель этих работ – анализ эволюции когнитивных способностей животных в контексте происхождения интеллекта человека – близка к задаче моделирования когнитивной эволюции. Работы отечественных исследователей адаптивного поведения представлены в сборнике [7].

Хотя «официально» направление «Адаптивное поведение» сформировалось в начале 1990-х годов, были явные провозвестники этого направления. Приведем примеры из истории отечественной науки.

В 1960-х годах блестящий кибернетик и математик М.Л. Цетлин предложил и исследовал модели автоматов, способных адаптивно приспосабливаться к окружающей

среде. Работы М.Л. Цетлина инициировали целое научное направление, получившее название «коллективное поведение автоматов» [8].

В 1960-70-х годах под руководством талантливого кибернетика М.М. Бонгарда был предложен весьма нетривиальный проект «Животное», характеризующий целенаправленное адаптивное поведение искусственных организмов [9].

Хороший обзор ранних работ по адаптивному поведению представлен в книге М.Г. Гаазе-Рапопорта, Д.А. Пospelова «От амебы до робота: модели поведения» [10].

Искусственная жизнь. Близким направлением к «Адаптивному поведению» является интересное направление исследований «Искусственная жизнь», оно сформировалось в конце 1980-х годов [11]. Основной мотивацией исследований искусственной жизни служит желание понять и промоделировать формальные принципы организации биологической жизни. Как сказал руководитель первой международной конференции по искусственной жизни К. Лангтон, «основное предположение искусственной жизни состоит в том, что "логическая форма" организма может быть отделена от материальной основы его конструкции».

Сторонники направления «Искусственная жизнь» часто считают, что они исследуют более общие формы жизни, чем те, которые существуют на Земле. Т.е. 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”). Искусственная жизнь – это синтетическая биология, которая по аналогии с синтетической химией пытается воспроизвести биологическое поведение в различных средах. Это жизнь, созданная человеком, а не природой (“life made by Man rather than by Nature”). Исследования искусственной жизни направлены не только на теоретические исследования свойств жизни, но и (аналогично синтетической химии) на практические приложения, такие как подвижные роботы, медицина, нанотехнология, исследования «жизни» социальных и экономических систем. Обзор ранних работ в этом направлении содержится в [12].

Когнитивные архитектуры. Под когнитивными архитектурами понимаются структуры и принципы функционирования познающих систем, которые можно использовать в искусственном интеллекте. Обзор исследований в этом направлении содержится в работе [13]. В последние годы большое внимание уделяется биологически инспирированным когнитивным архитектурам [14].

Автономные агенты. Это близкое к когнитивным архитектурам направление исследований, в котором большое внимание уделяется основанным на биологических аналогиях автономным агентам и компьютерным моделям агентов, обладающих когнитивными и некоторыми интеллектуальными свойствами. Обзор исследований по автономным агентам содержится в работе [15].

Необходимо подчеркнуть, что автономные агенты вполне могут рассматриваться как объединяющее понятие для указанных направлений. Работы по автономным агентам ведутся как со стороны биологических наук – агенты вполне естественно могут моделировать биологические организмы, – так со стороны вычислительных наук – можно изучать модели и искусственные аналоги (например, роботы) организмов. Вполне естественно изучать познавательные свойства и знания автономных когнитивных агентов. Также разумно исследовать эволюцию популяций агентов и коммуникации и обмен информацией между агентами.

5. Примеры моделей автономных когнитивных агентов

Приведем два примера моделей автономных агентов, обладающих когнитивными свойствами.

Нейробиологическая модель адаптивного поведения, разработанная в Институте нейронаук. В Институте нейронаук, руководимом лауреатом Нобелевской премии Дж. Эдельманом (сайт института: <http://www.nsi.edu>), более 25 лет ведутся разработки поколений моделей работы мозга (Darwin I, Darwin II,...). Основное внимание при этом уделяется попыткам понимания работы мозга путем построения моделей мозга.

Приведем пример конкретной нейробиологической модели, разработанной в Институте нейронаук. Речь пойдет о роботоподобном устройстве Дарвин X, система управления которого построена на базе моделей мозга. Иначе это устройство называется NOMAD (Neurally Organized Mobile Adaptive Device).

Принципы моделирования NOMAD'a 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 работ по NOMAD'у [16] было промоделировано 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 разные рисунки, которые мышь видит и может использовать для ориентировки. В определенном месте бассейна есть скрытая от зрения мыши платформа (находящаяся неглубоко под водой), 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 рисунки на бортах бассейна и, ориентируясь по рисункам, находить платформу за достаточно короткое время.

Поведение NOMAD'a в лабиринте Морриса моделировалась следующим образом [16]. NOMAD представлял собой подвижное устройство на колесах, управляемое нейронной сетью, состоящей из 90000 нейронов, в которой было выделено 50 различных нейронных областей, в частности, были выделены несколько областей гиппокампа. В сети было $1.4 \cdot 10^6$ синаптических контактов между нейронами. Программно нейронная сеть была реализована на основе компьютерного кластера. При моделировании детально исследовались процессы, происходящие в разных нейронных областях.

Сенсорная система NOMAD'a 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 находился 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'a была найти скрытую платформу. Обучение нейронных сетей NOMAD'a осуществлялось по модифицированному правилу Хебба (увеличение или уменьшение веса синаптической связи между активными нейронами) на основе поощрений (получаемых при нахождении скрытой платформы) и наказаний (получаемых при приближении к стенам комнаты).

Было продемонстрировано, что

- 1) NOMAD самостоятельно обучается находить платформу, ориентируясь по полосам на стенах комнаты, причем обучается достаточно 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 связи между отдельными нейронными областями, отражающие причинно-следственные зависимости.

Итак, изложенная модель представляет собой интересное компьютерное исследование самообучающегося адаптивного устройства, хорошо продуманное с биологической точки зрения и дающее понимание функционирования определенных структур мозга.

Бионическая модель поискового адаптивного поведения. Одно из актуальных направлений исследований в рамках моделирования адаптивного поведения – имитация поискового поведения животных. В нашей работе [17] исследовано поисковое поведение на примере личинок ручейников *Chaetopteryx villosa*, обитающих на дне водоемов. Личинки носят на себе защитный «домик» – трубку из песчинок и других частиц, собираемых со дна водоемов. Частицы скрепляются между собой по краям с помощью клейкой белковой нити. Строительство домика требует меньше времени, усилий и белка, если личинки используют относительно крупные и плоские частицы. Однако поиск крупных частиц на дне водоема требует затрат времени и энергии, не известных личинке заранее. Задача осложняется еще и тем, что личинки при поиске частиц не пользуются зрением и могут обнаружить частицу и определить её размер только на ощупь, что требует дополнительных затрат времени.

В [17] построена компьютерная модель поискового поведения личинок ручейников, строящих чехол-домик из частиц разного размера и ведущих поиск скоплений подходящих частиц. Модель сопоставлялась с результатами биологического эксперимента, в котором личинки строили чехол-домик из крупных и мелких частиц.

При этом удачная модель была построена не сразу. Сначала мы попробовали построить модель так, чтобы модельные личинки максимизировали скорость роста площади домика. Такая модель работала, но она не соответствовала биологическому эксперименту. В биологическом эксперименте личинки строили домик в основном из крупных частиц (экономя усилия и склеивающую частицы нить), а в модели домик строился преимущественно из мелких частиц.

После этого мы учли, что поисковое поведение личинок можно представить как чередование двух тактик: 1) сбор и прикрепление частиц на одном и том же участке и 2) поиск нового участка с подходящими частицами. Переключение между поведенческими тактиками инерционно: личинка не сразу покидает участок, на котором она нашла крупные частицы, а затем встречала только мелкие, так как на этом участке крупные частицы могут еще встретиться, и не всегда сразу начинает сбор частиц, если встретила только одна крупная частица, так как эта частица могла встретиться случайно.

Основываясь на понимании такого инерционного переключения между тактиками поведения, мы ввели и использовали понятие мотивации M к прикреплению частиц. И считали, что если мотивация M была достаточно велика, то происходил сбор и прикрепление частиц к домику, если M была мала, то модельная личинка искала новое место с подходящими размерами частиц. Динамика регулирующей поведение мотивации M учитывала инерцию переключения между тактиками поведения, случайные вариации и направленное изменение мотивации. Направленное изменение M состояло в следующем: если модельная личинка тестировала крупную частицу после мелкой, то мотивация M к прикреплению следующих частиц повышалась, если, наоборот, тестировалась мелкая частица после крупной, то M понижалась. Важно, что в модель вводились знания личинки о размерах последних протестированных и прикрепленных частиц и эти знания использовались личинками.

Новая модель, основанная на понятии мотивации M к прикреплению частиц и на знаниях о размерах последних протестированных и прикрепленных частиц, оказалась

удачной. Она хорошо согласовывалась с биологическими экспериментальными данными: как в эксперименте, так и в модели к домику преимущественно прикреплялись крупные частицы, среднее число прикрепленных частиц практически совпадало у реальных и модельных личинок.

Когнитивные свойства личинок в нашей модели были простыми: личинки использовали знания о размерах протестированных и прикрепленных частиц. Но, тем не менее, эти когнитивные свойства, хоть и простые, были весьма существенными.

В этом разделе были очерчены два примера моделей, близких к моделированию когнитивной эволюции. Далее перейдем к биологическим экспериментам, демонстрирующим нетривиальные познавательные способности живых организмов, иногда эти способности называют элементарным мышлением животных.

6. Биологические эксперименты по элементарному мышлению животных

В последние годы проведены интересные биологические исследования, показывающие, что элементарные формы мышления присущи не только высшим животным, но и достаточно простым, например, насекомым (пчелам, муравьям), а также врановым птицам, которые способны самостоятельно создавать и целесообразно использовать «орудия труда». В данном разделе кратко характеризуются биологические экспериментальные данные и некоторое связанное с ними моделирование.

Пчелы сообщают другим пчелам, где искать медоносные цветы. Еще в 1920-е годы Карл фон Фриш начал исследования способа передачи пчелами информации друг другу. К. фон Фриш обратил внимание на то, что возвращающиеся в улей пчелы-сборщицы совершают танец, привлекающий внимание других пчел. Угол, составленный между осью танца и вертикалью, соответствует углу между направлением на пищу и направлением на солнце. Причем этот угол для танцующей пчелы меняется в соответствии с движением солнца. Скорость танца соответствует расстоянию между пищей и ульем. Танцующая пчела также пахнет, ее запах характеризует медоносный цветок. Другие пчелы наблюдают этот танец и затем находят те цветы, с которых прилетела танцующая пчела (на расстоянии до нескольких километров). Долгое время результаты К. фон Фриша вызывали споры, которые продолжались и после того, как в 1973 г. К. фон Фриш получил за свое открытие Нобелевскую премию.

Интересно, что в 1990-е годы Б. Андерсен и А. Михельсен создали искусственную пчелу-робота, которая также танцевала и с помощью танца передавала информацию живым пчелам. Размер робота был близок к размеру пчелы. И живые пчелы воспринимали этого робота вполне естественно. Живые пчелы летели из улья на поляну, руководствуясь указаниями пчелы-робота. Подробнее об этой передаче символической информации см. обзор Ж.И. Резниковой [18].

Муравьи могут передавать информацию со скоростью около 1 бита в минуту и запоминать небольшие целые числа. В семье рыжих лесных муравьев можно выделить рабочие группы, состоящие из одного муравья-разведчика и 3-8 муравьев-фуражиров. Каждый разведчик, найдя пищу, вступает в контакт со своей группой и передает фуражирам информацию, где нужно искать пищу. В экспериментах и расчетах Ж.И. Резниковой и Б.Я. Рябко исследовалось поведение муравьев с помощью специально изготовленных ветвящихся лабиринтов небольшой глубины: каждый путь разветвлялся на два, было до 5-6-ти развилок в лабиринте. Было установлено, что муравьи-разведчики могли запомнить путь к кормушке, а затем путем контактов с фуражирами передавать им информацию о том, в каком месте лабиринта находится пища [18, 19]. Зная глубину лабиринта и время контакта, Ж.И. Резникова и Б.Я. Рябко определяли количество

информации, передаваемой разведчиками фуражирам, и скорость передачи этой информации. В результате оказалось, что скорость передачи информации составляла около 1 бита в минуту.

Причем, если путь был достаточно простой, например, в каждой развилке лабиринта надо было поворачиваться только в левую ветку, то разведчики могли использовать «сжатую» информацию и передавать ее фуражирам с большей скоростью. То есть, муравьи-разведчики не только передавали информацию муравьям-фуражирам, но и обладали способностью сжимать информацию и передавать ее фуражирам в сжатом виде. Образно говоря, муравьи способны не только использовать информацию по Шеннону, но информацию по Колмогорову.

Кроме этого, была продемонстрирована способность муравьев к простому счету чисел. Исследовалась передача информации между муравьями-разведчиками и фуражирами для более простых лабиринтов-гребенок, состоящих из одного основного канала, от которого ответвляются в одну сторону одинаковые каналы (до 40 веток) [19]. Пища находилась в одном из ответвлений. Муравьи оказались способными запоминать и передавать друг другу сведения о номере ветки, т.е. они умели определенным образом считать.

Новокаледонские вороны могут изобретать способ изготовления орудий труда.

Обычно в природе новокаледонские вороны (Новая Каледония – остров к востоку от Австралии) могут обкусывать веточки так, что получаются простые орудия: заостренные палочки или крючки. На заостренную палочку ворона может насаживать личинки насекомых, а крючком вытаскивать личинок из-под коры.

В университете Оксфорда проводили исследования с воронами, находившимися долгое время в неволе [20]. Двум воронам (молодой самке и самцу постарше) предлагали добывать ведро с пищей со дна прозрачного вертикального цилиндра. Рядом с цилиндром были прямая проволока и проволока, согнутая крючком. Ведро можно было вытащить крючком, но не прямой проволокой. Раньше с проволокой вороны дела не имели. Тем не менее, они сразу поняли, что ведро можно вытащить с помощью крючка.

Неожиданность произошла, когда самец утащил крючок. Тогда самка сначала попыталась подцепить ручку ведра прямым куском проволоки (что было безуспешно), а потом научилась делать из прямой проволоки крючок, зажимая один конец проволоки в одной из щелей экспериментальной установки и загибая проволоку. А затем с помощью изготовленного ей крючка доставала ведро с пищей. В дальнейшем, если крючок убирали, а оставляли прямую проволоку, ворона сразу делала крючок и доставала пищу.

А что делал самец? Казалось бы, он должен был перенять опыт самки. Но, по-видимому, психология у него была другая. Самец не перенял опыт самки, он наблюдал за ней и примерно в трети случаев отнимал у нее пищу.

Таким образом, ворона сама, без какого-либо обучения, без каких-либо инструкций, изобрела способ изготовления орудия труда. Подробнее об очерченном эксперименте см. [20] и сайт исследователей новокаледонских ворон университета Оксфорда:

<http://users.ox.ac.uk/~kgroup/index.html>, <http://users.ox.ac.uk/~kgroup/tools/introduction.shtml>.

Новокаледонские вороны могут мысленно составлять планы цепочек целенаправленных действий. Еще одно интересное исследование с новокаледонскими воронами провели исследователи из Новой Зеландии [21]. Задание для ворон состояло из 3 следующих частей. 1) Сначала надо было подтянуть к себе шнуром и освободить от шнура маленькую палочку, которая висела на шнуре. 2) Затем с помощью маленькой палочки достать из одного зарешеченного контейнера длинную палочку. 3) Наконец, с помощью длинной палочки надо было достать пищу из второго контейнера. Причем, без короткой палочки нельзя было достать длинную, а короткой палочкой нельзя было

дотянуться до пищи во втором контейнере. То есть весь процесс добывания пищи должен был состоять из трех четко определенных последовательных шагов, на которых надо было использовать все три «инструмента»: шнур, маленькую палочку, длинную палочку.

Предварительно вороны тренировались в более простых условиях: они могли использовать часть или все эти инструменты по отдельности. Когда им нужно было выполнить полное задание из трех шагов, то более тренированные вороны, которые имели опыт использования всех трех инструментов по отдельности, выполняли задание с первого раза. А менее тренированные вороны, которые предварительно освоили инструменты частично, выполняли задание не всегда с первого раза, но, тем не менее, тоже достаточно быстро научились с ним справляться.

Таким образом, вороны научились продумывать план решения новой задачи, мысленно связывая в плане отдельные элементы ранее освоенного опыта. Причем менее тренированные сумели не только мысленно объединить в плане элементы решения, но и догадаться до того, как выполнить недостающий элемент задания.

«Пространственный интеллект», запоминание и использование когнитивных карт. Многие животные (птицы, грызуны, насекомые), ориентируясь в пространстве или запасая корм, формируют в своей памяти когнитивные карты местности. Например, колумбийские сойки, обитающие на юго-западе США, в конце лета начинают собирать семена сосны. Наполнив подъязычный мешок, сойка улетает на расстояние до нескольких километров, чтобы припрятать семена на южных склонах холмов, где зимой бывает мало снега. Птица может запастись до 33 000 семян, по 4–5 штук в одном месте, т. е. получается несколько тысяч тайников. Зимой и весной птица наведывается в те места, в которых она прятала пищу в конце лета, и выкапывает пищу из своих складов. Итак, сойка запоминает и использует весьма нетривиальную когнитивную карту местности. Подробнее о различных формах пространственного интеллекта животных см. [18].

В заключение раздела подчеркнем, что экспериментальные биологические работы и моделирование когнитивных свойств биологических организмов по смыслу близки друг к другу, и возможно налаживание серьезных и интересных перспективных междисциплинарных связей между этими исследованиями. Можно двигаться навстречу друг другу представителям разных дисциплин: биологам и специалистам точных наук. Более того, целесообразно сочетание между экспериментальными (биологические эксперименты) и теоретическими (моделирование когнитивных способностей) исследованиями, подобное эффективному сочетанию работ между экспериментальной и теоретической физикой.

7. Контуры программы будущих исследований когнитивной эволюции

Возвращаемся к основному обсуждаемому направлению исследований – моделированию когнитивной эволюции.

Отталкиваясь от анализа биологических экспериментов по когнитивным свойствам живых организмов, от уже разработанных моделей познавательных способностей организмов, можно предложить следующие этапы моделирования когнитивной эволюции.

А) Моделирование адаптивного поведения автономных агентов с несколькими естественными потребностями: питание, размножение, безопасность. Это могло бы быть моделирование достаточно естественного и полноценного поведения простых модельных организмов. Моделирование в этом направлении уже начато, см. ниже.

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 произносимые

животными, но реально используемые ими. Использование понятий приводит к существенному сокращению и требуемой памяти, и времени обработки информации, поэтому оно должно быть эволюционно выгодным.

В) Исследование процессов формирования причинных связей в памяти животных. 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: $\{УС, УС \rightarrow БС\} \Rightarrow БС$ или «Если имеет место условный стимул, и за условным стимулом следует безусловный, то нужно ожидать появления безусловного стимула». В определенной степени 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.

Перечисленные пункты очерчивают круг исследований от моделирования простейших форм поведения к логическим правилам, используемым в математике. Опираясь на эти пункты, мы начали соответствующее моделирование.

8. Начальные шаги моделирования

Модель автономных агентов с естественными потребностями. В работе [22] построена и исследована компьютерная модель автономных агентов, обладающих естественными для живых организмов потребностями: питание, безопасность и размножение. Эта модель соответствует пункту А предложенных выше контуров программы.

В модели предполагалось, что в каждый такт времени одна из потребностей агента была наиболее приоритетной. Система управления агента была основана на наборе правил вида: $S_k \rightarrow A_k$ (в ситуации S_k нужно выполнить действие A_k). Ситуация S_k определялась активностью хищника рядом с агентом, предыдущим действием агента и приоритетной потребностью. Каждый такт времени агент мог выполнять одно из следующих действий A_k : 1) поиск пищи, 2) питание, 3) подготовка к размножению, 4) размножение, 5) оборона от хищника, 6) покой. Каждое правило имело свой вес W_k . Веса правил W_k настраивались методом обучения с подкреплением [23] в соответствии с результатами действий, направленными на удовлетворение приоритетных потребностей. Отметим, что метод обучения с подкреплением – хорошо известный метод обучения, он основан на получаемых агентом положительных и отрицательных наградах, получаемых агентом при поощрениях и наказаниях. Причем в этом методе предусмотрена процедура переоценки

последовательно выполняемых действий, направленная на максимизацию суммарной награды, которую можно получить в будущем.

В результате компьютерного моделирования было показано, что формируется цикличность поведения агента. В цикле агент сначала накапливает свой энергетический ресурс путем питания, затем его действия направлены на максимизацию безопасности, т.е. защиты от хищников, а когда обе потребности (пищевая и потребность безопасности) удовлетворены, агент размножается. При размножении агент отдает часть своего ресурса рожденному потомку, поэтому ему необходимо пополнить свой ресурс посредством питания. После размножения действия агента снова направлены на питание, и цикл «питание → оборона → размножение» повторяется.

Таким образом, было показано, что происходит формирование циклов поведения агентов, в которых последовательно удовлетворяются потребности питания, безопасности и размножения. Подробнее об этой модели рассказано в [22].

Модель формирования обобщенных эвристик и простых обобщенных образов.

Формирование обобщенных эвристик и простых обобщенных образов (пункт *Б* контуров программы) в процессе обучения агентов при поиске агентами пищи в двумерной клеточной среде было продемонстрировано в модели [24]. Схема такого агента показана на рис. 1. Модель предполагала, что в части клеток были порции пищи. При съедании пищи ресурс агента пополнялся. Система управления агента, как и в предыдущей модели, была основана на правилах вида $S \rightarrow A$ (S – ситуация, A – действие), веса правил оптимизировались методом обучения с подкреплением.

В результате обучения агент формировал обобщающие эвристики. Эти эвристики таковы: если имеется пища в той же клетке, в которой находится агент, то нужно съесть пищу; если в клетке агента нет пищи, но есть пища в клетке впереди или справа/слева от агента, то нужно выполнить действие «перемещение вперед» или «поворот направо/налево». Использование эвристик приводило к формированию последовательных цепочек действий, приводящих к пополнению ресурса агента.

Дополнительно в компьютерную программу вводилась процедура усреднения: вычислялось среднее число применений данного действия для той или иной ситуации. В результате усреднения агент самостоятельно формировал простые обобщенные образы или внутренние понятия: «имеется пища в моей клетке», «имеется пища в клетке впереди меня», «имеется пища в клетке справа/слева от меня».

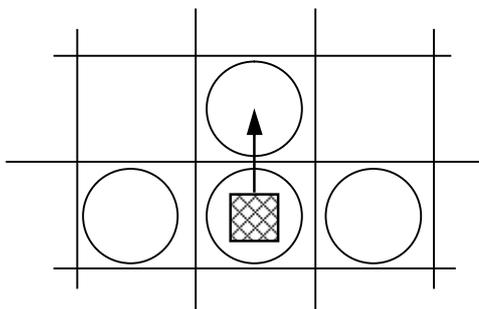


Рис. 1. Схема агента в двумерной клеточной среде. Агент обозначен квадратом, стрелкой показано его направление «вперед». Окружностями отмечены клетки, из которых агент получает информацию о наличии или отсутствии пищи в клетке.

Рассмотренные в настоящем разделе модели очень упрощенные и их целесообразно рассматривать как начальный этап более полноценных исследований, нацеленных непосредственно на моделирование когнитивной эволюции.

9. Пример попутного прикладного направления исследований – идея проекта на Нобелевскую премию мира

До сих пор рассматривались исследования, направленные на изучение фундаментальной проблемы – проблемы происхождения мышления. Но при серьезных исследованиях неизбежно попутно возникают и связанные с ними прикладные направления. Отметим одно из возможных прикладных направлений: устранение причин агрессивной конкуренции на основе моделирования эволюции конкурирующих агентов, которые могут вести борьбу между собой.

Вымирание генов агрессивности в эволюционирующей популяции конкурирующих агентов. В работах [25, 26] была построена и исследована компьютерная модель адаптивного поведения агентов в эволюционирующей популяции. В модели рассматривался двухмерный клеточный мир, в клетках могли находиться агенты и их пища. Агенты были такие же, как показано на рис. 1, но они не только искали пищу, но и могли бороться друг с другом. В каждый такт времени агент выполнял одно из следующих действий: 1) питаться, 2) двигаться на одну клетку вперед, 3) повернуть налево, 4) повернуть направо, 5) отдыхать, 6) делиться (размножаться), 7) ударить агента в клетке спереди (напасть), 8) защищаться.

Каждый агент обладал внутренним энергетическим ресурсом R , который пополнялся, когда агент выполнял действие «питаться» и расходовался при выполнении других действий. При нападении одного агента на второго (выполнении действия «ударить») нападающий агент отнимал ресурс у второго агента, если второй агент не выполнял действие «защищаться»; но если второй агент защищался, то первый агент просто расходовал значительный ресурс. Также два агента теряли оба значительный ресурс, если они нападали друг на друга.

Система управления агента представляла собой однослойную нейронную сеть, на вход сети подавалась сенсорная информация о ближайшем окружении агента и о его внутреннем ресурсе, выходы сети определяли действия агента. Входы нейронной сети представляли собой рецепторы или сенсоры агента, выходы сети – эффекторы агента (рис. 2).

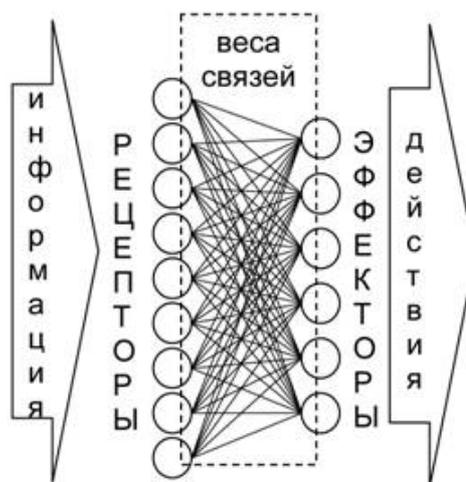


Рис. 2. Структура нейронной сети агента.

Структура нейронной сети и веса синаптических связей между входом и выходом сети определяли геном агента. При делении потомок агента наследовал измененный

мутациями геном, т.е. нейронную сеть агента-родителя. При мутациях модифицировались как веса синаптических связей, так и структура нейронной сети, в частности, могли исчезать и появляться отдельные рецепторы или эффекторы. Популяция агентов эволюционировала во времени за счет вариаций структуры и весов синапсов нейронных сетей и отбора тех агентов, которые достаточно быстро набирают ресурс и размножаются.

При моделировании в некоторых компьютерных экспериментах наблюдались неожиданные пики в зависимостях численности популяции агентов от времени (рис. 3).

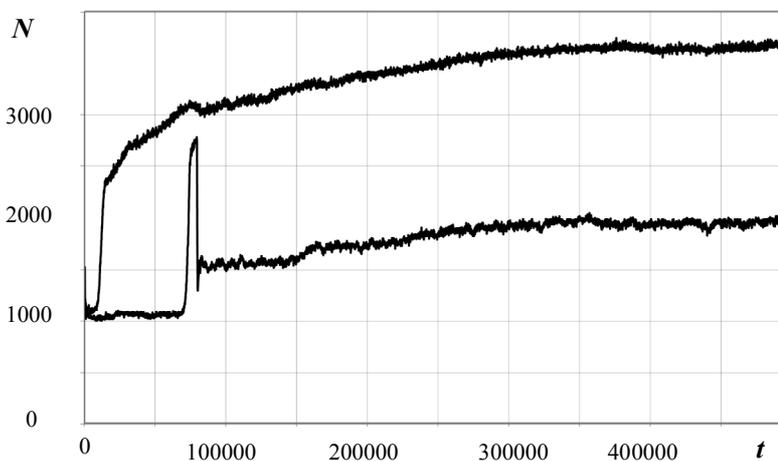


Рис. 3. Зависимость численности популяции N от времени t в полной модели (нижняя кривая) и в случае «глобального пацифизма» (верхняя кривая).

Анализ системы управления агентов показал, что пики соответствовали тем моментам времени, когда в нейронной сети агентов отсутствовали эффекторы, ответственные за борьбу между агентами. Для подтверждения этого полная компьютерная модель (с борьбой между агентами) сравнивалась с моделью, в которой эффекторы борьбы были полностью устранены из системы управления агентов. В случае такого «глобального пацифизма» установившаяся численность популяции была примерно в 2 раза выше, чем для обычных агентов, имеющих средства для борьбы между собой. Наличие агрессивной конкуренции приводило к тому, что агенты тратили свой ресурс R именно на борьбу друг с другом; этим агентам не хватало ресурса на «созидательную» жизнь, для активного накопления ресурса и расходования его на процессы размножения, приводящие к возрастанию численности популяции. Устранение борьбы между агентами, исчезновение «генов агрессивности» приводило к увеличению численности популяции агентов.

Наблюдавшийся при этом эффект исчезновения «генов агрессивности» носил кратковременный характер: наблюдавшиеся пики в численности популяции были довольно узкими. Кратковременность связана с тем, что мутационное появление новых агрессивных агентов (с эффекторами борьбы) быстро приводило к тому, что агрессивные агенты вели активную борьбу с «мирными» агентами (не имевшими эффекторов борьбы) и выживали их из популяции.

На основе изложенной модели возможен анализ процессов исчезновения агрессивной конкуренции для различных социально-экономических приложений: для популяций конкурирующих фирм, регионов, государств. Например, если рассматривать эволюцию агентов как эволюцию государств, то можно думать о научном обосновании концепции глобального пацифизма, можно даже предложить идею проекта на Нобелевскую премию мира «Разработка научных основ всемирного разоружения».

10. Заключение

Возвращаемся к обсуждению общей постановки моделирования когнитивной эволюции. Как аргументировано выше, моделирование когнитивной эволюции – новое междисциплинарное направление исследований. Это направление связано с широким кругом дисциплин:

- с основаниями математики,
- с теорией познания,
- с анализом познавательных способностей биологических организмов,
- с когнитивными исследованиями,
- с научными основами искусственного интеллекта.

Существенно, что в настоящее время уже имеются разносторонние заделы работ по моделированию когнитивной эволюции (см. раздел 4). Причем идейно эти заделы можно объединить концепцией моделирования когнитивных автономных агентов, что интересно как со стороны биологических наук, так и со стороны вычислительных наук. Предпосылки моделирования когнитивной эволюции связаны с интереснейшими исследованиями когнитивных способностей биологических организмов (раздел 6), причем эти способности вполне можно сопоставлять с элементами мышления человека.

Отталкиваясь от известных моделей когнитивных автономных агентов можно предложить контуры программы будущих исследований когнитивной эволюции. Пункты программы очерчивают круг исследований от моделирования простейших форм поведения к логическим правилам, используемым в математике. Сопоставляя пункты контуров программы будущих исследований когнитивной эволюции с известными моделями, можно заключить, что уже имеются отдельные элементы, соответствующие каждому из пунктов. Образно говоря, у нас уже есть некоторые небольшие фрагменты картины, но мы еще не видим всей картины. Четкой последовательности серьезных, канонических моделей, которые показывали бы общую картину происхождения логического мышления, пока еще нет.

Еще раз подчеркнем, что исследования когнитивной эволюции нацелены на понимание причин применимости логического мышления в научном познании, на укрепление фундамента науки.

Литература

1. Кант И. Критика чистого разума. Соч. в 6-ти томах. Т.3. М.: Мысль, 1964. С. 69-695.
2. Кант И. Пролегомены ко всякой будущей метафизике, могущей появиться как наука. Соч. в 6-ти томах. Т.4, часть 1. М.: Мысль, 1965. С. 67-210.
3. Lorenz K. Kant's doctrine of the a priori in the light of contemporary biology // *Learning, Development and Culture* (Plotkin H., Ed.). N.Y. 1982. Лоренц К. Кантовская концепция а priori в свете современной биологии // Сб. Эволюция. Язык. Познание. (Отв. ред. И. П. Меркулов). М.: Языки русской культуры, 2000. С. 15-41.
4. Математическая теория логического вывода (Под ред. Идельсона А.В. и Минца Г.Е.). М.: Наука, 1967.
5. Turchin V.F. A constructive interpretation of the full set theory // *Journal of Symbolic Logic*, 1987. V. 52. No. 1. PP. 172 -201.
6. From Animals to Animats. Proceedings of the First International Conference on Simulation of Adaptive Behavior (Meyer J.-A., Wilson S.W., Eds). Cambridge, MA: The MIT Press, 1991.
7. От моделей поведения к искусственному интеллекту (Под ред. Редько В.Г.). М.: УРСС, 2006, 2010.
8. Цетлин М.Л. Исследования по теории автоматов и моделирование биологических систем. М.: Наука, 1969.

9. Бонгард М.М., Лосев И.С., Смирнов М.С. Проект модели организации поведения – «Животное» // Моделирование обучения и поведения. М.: Наука, 1975. С.152-171.
10. Гаазе-Рапопорт М.Г., Поспелов Д.А. От амебы до робота: модели поведения. М.: Наука, 1987, М.: УРСС, 2004, 2011.
11. Artificial Life: The Proceedings of an Interdisciplinary Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems (Langton C.G., Ed.). Redwood City CA: Addison-Wesley, 1989.
12. Редько В.Г. Эволюция, нейронные сети, интеллект. Модели и концепции эволюционной кибернетики. М.: УРСС, 2005.
13. Langley P., Laird J.E., Rogers S. Cognitive architectures: Research issues and challenges // Cognitive Systems Research. 2009. V.10. No. 2. PP. 141-160.
14. Biologically Inspired Cognitive Architectures 2012. Proceedings of the Third Annual Meeting of the BICA Society (A. Chella, R.Pirrone, R. Sorbello, K.R. Johansdottir, Eds). Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer, 2012.
15. Vernon D., Metta G., Sandini G. A survey of artificial cognitive systems: Implications for the autonomous development of mental capabilities in computational agents // IEEE Transactions on Evolutionary Computation (special issue on Autonomous Mental Development). 2007. V. 11. No. 2. PP. 151-180.
16. 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. V. 3. No. 3. PP. 197-221.
17. Непомнящих В.А., Попов Е.Е., Редько В.Г. Бионическая модель адаптивного поискового поведения // Известия РАН. Теория и системы управления. 2008. № 1. С. 85-93.
18. Резникова Ж.И. Современные подходы к изучению языкового поведения животных // Сборник «Разумное поведение и язык. Коммуникативные системы животных и язык человека», 2008. М.: «Языки славянских культур». С. 293 - 337. См. также: <http://www.reznikova.net/Lang09.pdf>
19. Резникова Ж. И., Рябко Б. Я. Теоретико-информационный анализ «языка» муравьев // Журнал общей биологии. 1990. Т. 51. № 5. С. 601-609.
20. Weir A.A.S., Chappell J., Kacelnik A. Shaping of hooks in New Caledonian crows // Science. 2002. V. 297. No. 5583. PP. 981-983.
21. Taylor A.H., Elliffe D., Hunt G.R., Gray R.D. Complex cognition and behavioural innovation in New Caledonian crows // Proc. R. Soc. B. 2010. V. 277. PP. 2637–2643.
22. Коваль А.Г. Редько В.Г. Поведение модельных организмов, обладающих естественными потребностями и мотивациями // Математическая биология и биоинформатика (электронный журнал). 2012. Т. 7. № 1. С. 266-273. URL: [http://www.matbio.org/2012/Koval2012\(7_266\).pdf](http://www.matbio.org/2012/Koval2012(7_266).pdf)
23. Саттон Р.С., Барто Э.Г. Обучение с подкреплением. М.: Бином, 2011.
24. Бесхлебнова Г.А., Редько В.Г. Модель формирования обобщенных понятий автономными агентами // Четвертая международная конференция по когнитивной науке: Тезисы докладов: В 2 томах. Томск: ТГУ, 2010. Т. 1. С. 174-175.
25. Бурцев М.С. Модель эволюционного возникновения целенаправленного адаптивного поведения. 2. Исследование развития иерархии целей // Препринт ИПМ РАН, 2002, № 69.
26. Бурцев М.С., Редько В.Г. Влияние агрессии на эволюцию в многоагентной системе // Сб. трудов 9-ой Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем». М., ИПУ. 2002.