

Моделирование когнитивной эволюции – перспективное направление междисциплинарных исследований

В.Г. Редько

доктор физико-математических наук

Обсуждается перспективное направление междисциплинарных исследований – моделирование когнитивной эволюции, т.е. эволюции познавательных способностей биологических организмов, в результате которой произошли логика, мышление, интеллект человека. Характеризуются заделы исследований когнитивной эволюции и предлагаются контуры программы моделирования когнитивной эволюции. Подчеркиваются междисциплинарные связи этих исследований.

1. Введение

В настоящей работе обсуждается перспективное направление междисциплинарных исследований – моделирование когнитивной эволюции, т.е. эволюции познавательных способностей биологических организмов. 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 исследований. Обсуждаются перспективы моделирования когнитивной эволюции. Характеризуются междисциплинарные связи рассматриваемых исследований.

2. Ключевые проблемы

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 природе? В более общей формулировке проблема может быть сформулирована так: почему логика человеческого мышления применима к познанию природы?

Для того чтобы разобраться в применимости логического мышления человека к познанию природы, целесообразно проанализировать эволюцию познавательных способностей биологических организмов, исследовать эволюционные корни познавательных способностей человека.

Как же исследовать происхождение логических форм мышления? Как промоделировать это происхождение?

Как исследования эволюционного происхождения мышления могут быть 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 провести 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

$$\frac{A, A \rightarrow B}{B} \quad (1)$$

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). И когда после выработки рефлекса собаке предъявляют УС, то она, помня о хранящейся в ее памяти «записи» УС → БС, делает элементарный «вывод»:

$$\frac{УС, УС \rightarrow БС}{БС} \quad (2)$$

И собака ожидает БС.

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. Хотя контексты следственной связи, следственной зависимости в этих двух случаях различны: в первом случае B есть формальное логическое следствие A ; во втором случае в процессе наблюдений формируется и запоминается причинно-следственная связь между событиями УС и БС, следующими одно за другим во времени.

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.

При этом результат эволюции – правила логического вывода, используемые при математических доказательствах, – известны и достаточно хорошо формализованы [1]. 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 [2] предпринята весьма нетривиальная попытка пересмотра оснований математики и рассмотрена возможность построения предиктивных логических правил в контексте теории множеств и кибернетического подхода к обоснованию математики. В.Ф. Турчиным также была предложена концептуальная теория метасистемных переходов (переходов от нижних уровней кибернетических систем к более высоким уровням) [3], которая может быть использована при моделировании когнитивной эволюции.

Как же конкретно вести моделирование когнитивной эволюции? Есть ли задел таких исследований? Оказывается, что да, такой задел в той или иной форме существует в нескольких современных направлениях исследований в области вычислительных наук. Эти направления характеризуются в следующем разделе.

3. Заделы моделирования происхождения мышления

Адаптивное поведение. Направление «Адаптивное поведение» развивается с начала 1990-х годов [4]. Основной подход направления – конструирование и исследование искусственных «организмов» (в виде компьютерной программы или робота), способных приспособиваться к переменной внешней среде. Эти организмы часто называются «аниматами» (от англ. *animal* и *robot*: *animal* + *robot* = *animat*), агентами, автономными агентами. Исследователи адаптивного поведения разрабатывают такие модели, которые применимы к описанию поведения как реального животного, так и искусственного анимата [5]. Дальняя цель этих работ – анализ эволюции когнитивных способностей животных и происхождения интеллекта человека [6]. Эта цель близка к задаче моделирования когнитивной эволюции.

Искусственная жизнь. Близким направлением к «Адаптивному поведению» является интересное направление исследований «Искусственная жизнь». 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. Лэнгтон, «основное предположение искусственной жизни со-

стоит 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. То есть 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*”). Обзор ранних работ по искусственной жизни содержится в [7].

Когнитивные архитектуры. Под когнитивными архитектурами понимаются структуры и принципы функционирования познающих систем, которые можно использовать в искусственном интеллекте. Пример когнитивной архитектуры – система *Soar* (от англ. *State, Operator And Result*). Основная цель работ по *Soar* – создание системы функционирования интеллектуальных агентов, работающих в широкой области: от простейших форм до оперирования в сложных, заранее не предсказуемых условиях. Систему *Soar* предложили специалисты в области искусственного интеллекта еще в 1980 годах, тогда ее инициировали, как попытку построить унифицированную теорию познания. Обзор исследований по когнитивным архитектурам и *Soar* содержится в работах [8, 9]. В последние годы большое внимание уделяется биологически инспирированным когнитивным архитектурам [10].

Интеллектуальные автономные агенты. Это близкое к когнитивным архитектурам направление исследований, в котором большое внимание уделяется биологически обоснованным автономным агентам и компьютерным моделям агентов, обладающих когнитивными и некоторыми интеллектуальными свойствами. Обзор исследований по автономным агентам содержится в работе [11]. Необходимо подчеркнуть, что автономные агенты могут рассматриваться как объединяющее понятие для указанных направлений исследований: агенты вполне естественно могут моделировать биологические организмы и искусственные аналоги организмов. Также естественно изучать познавательные свойства и знания автономных агентов.

Близкие работы по научным основам искусственного интеллекта. Такие работы включают исследования когнитивных систем роботов [12], изучение нестандартных логик [13], исследование познавательных методов, используемых человеком [14].

Примеры моделей адаптивного поведения автономных агентов, иллюстрирующие некоторые срезы отмеченных исследований, кратко излагаются в следующем разделе.

4. Примеры моделей адаптивного поведения автономных агентов

4.1. Модели мозга и поведения 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*,

...). В последние годы идут исследования адаптивного поведения искусственного организма NOMAD (Neurally Organized Mobile Adaptive Device), система управления которого построена на базе этих моделей.

Работы по NOMAD'у – исследование поведения адаптивного роботоподобного устройства, использующего модели мозга (авторы называют его также Brain-based device), 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 работ по NOMAD'у [15] 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 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 достаточно короткое время.

Поведение NOMAD'а в лабиринте Морриса моделировалась следующим образом [15]. NOMAD представлял собой подвижное роботоподобное 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.

Сенсорная система NOMAD'а включала зрение, 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 видимые NOMAD'у разноцветные полосы – ориентиры. В начале каждого из экспериментов NOMAD помещался в разные участки комнаты, задача NOMAD'а была найти скрытую платформу. Обучение нейронных сетей NOMAD'а 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 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 устройства, хорошо продуманное с биологической точки зрения.

4.2. Бионическая модель поискового поведения

Одно из актуальных направлений исследований в рамках моделирования адаптивного поведения автономных агентов – имитация поискового поведения животных. В работе [16] исследовано поисковое поведение на примере личинок ручейников, обитающих на дне водоемов. Личинки носят на себе защищающий их «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.

В [16] построена компьютерная модель поискового поведения личинок ручейников, строящих чехол-домик из частиц разного размера и ведущих поиск скоплений подходящих частиц. Модель использует понятие мотивации к прикреплению частиц к домику. Динамика регулирующей поведение мотивации $M(t)$ описывается уравнением:

$$M(t) = k_1 M(t-1) + \xi(t) + I(t), \quad (3)$$

время t дискретно, k_1 – параметр, характеризующий медленную релаксацию мотивации ($0 < k_1 < 1$, $1 - k_1 \ll 1$), $\xi(t)$ – случайные вариации мотивации, величина $I(t)$ характеризует направленное изменение мотивации при тестировании модельной личинкой частиц:

$$I(t) = k_2 (S_{curr} - S_{last}) / S_{last}, \quad (4)$$

где k_2 – положительный параметр, S_{curr} – площадь тестируемой в данный момент частицы, S_{last} – площадь последней протестированной ранее частицы. Если мотивация $M(t)$ достаточно велика, то происходит сбор и приращение частиц к домику, если $M(t)$ мала, то модельная личинка ищет новое место с подходящими размерами частиц.

Важно, что в модели использовались знания личинки о размерах последних протестированных и приращенных частиц.

Построенная модель качественно согласуется с биологическими экспериментальными данными: как в эксперименте, так и в модели к домику преимущественно прикрепляются крупные частицы, есть сильный разброс числа прикрепляемых частиц и момента

начала прикрепления, число прикрепляемых частиц в обоих случаях невелико.

Очерченные модели – это только два примера из многочисленных исследований автономных агентов с когнитивными свойствами.

Еще одно направление работ, близкое к изучению когнитивной эволюции – биологические исследования познавательных способностей живых организмов. Это направление характеризуется в следующем разделе.

5. 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) или врановым птицам.

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 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).

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. Живые пчелы летели из улья на поляну, руководствуясь указаниями пчелы-робота. Подробнее об этой передаче символической информации см. обзор Ж.И. Резниковой [17].

Муравьи могут передавать информацию друг другу со скоростью около 1 бита в минуту и запоминать небольшие целые числа. В семье рыжих лесных муравьев можно выделить рабочие группы, состоящие из одного разведчика и 3-8 фуражиров. Каждый разведчик, найдя пищу, вступает в контакт со своей группой и передает информацию фуражирам, 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 [17, 18]. Зная глубину лабиринта и время контакта, Ж.И. Резникова и Б.Я. Рябко определяли количество информации, передаваемой разведчиками фуражирам, и скорость пере-

дачи 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 всегда поворачиваться в левую ветку, то разведчики могли использовать «сжатую» информацию и передавать ее фуражирам с большей скоростью. Образно говоря, муравьи «освоили» как информацию по Шеннону, так и информацию по Колмогорову (подробнее см. [17-19]).

Кроме этого, 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 орудия труда. Обычно в природе новокаледонские вороны 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 проволочка, 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 довольно быстро 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. Отметим, что самец не перенял опыт самки, он наблюдал за ней и иногда отнимал у нее пищу.

Таким образом, ворона сама, без какого-либо обучения, без каких-либо инструкций, изобрела способ изготовления орудия труда. Подробнее 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-х следующих частей. 1) Сначала надо было подтянуть к себе шнуром и освободить от шнура маленькую палочку, которая висела на шнуре. 2) Затем с помощью малень-

кой палочки требовалось 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 последовательных шагов, на которых надо было использовать 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 те вороны, которые имели опыт использования всех трех инструментов по отдельности, выполняли задание с первого раза, а те, которые предварительно освоили инструменты частично, выполняли задание не всегда с первого раза, но, тем не менее, тоже быстро научились с ним справляться.

Таким образом, вороны научились продумывать план решения новой задачи, мысленно связывая в плане ранее освоенный опыт.

6. Контуры программы будущих исследований когнитивной эволюции

Как же использовать очерченные заделы и знания при моделировании когнитивной эволюции? Каковы эволюционные уровни, на которых стоит остановиться? Как от простых форм поведения автономных агентов идти к логическим формам, используемым в научном познании? Предложим контуры программы будущих исследований, нацеленных на моделирование когнитивной эволюции. При этом постараемся выделить наиболее существенные этапы, ведущие к логическому мышлению.

А. Моделирование поведения автономных агентов с несколькими естественными потребностями: питания, размножения, безопасности. 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 (см. выше, раздел 2). И целесообразно разобраться в системах подобных выводов, понять, насколько эффективна логика поведения животных и насколько она подобна нашей, человеческой логике.

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

7. Начальные шаги моделирования когнитивной эволюции

7.1. Компьютерная модель автономных агентов, имеющих естественные потребности

В работе [22] была построена и исследована компьютерная модель автономных агентов, обладающих естественными для живых организмов потребностями питания, безопасности и размножения. Предполагалось, что агент имеет определенный ресурс R , который уменьшался при выполнении действий и увеличивался при питании. Кроме того, ресурс агента существенно уменьшался, когда на агента напал активный хищник. Потребностям агента соответствовали три фактора: фактор питания F_F , фактор безопасности F_S , фактор размножения F_R . Для каждого фактора имелся порог T_F , T_S и T_R , при превышении фактором которого удовлетворялась соответствующая потребность.

Между потребностями вводилась следующая иерархия: 1) пищевая потребность (наиболее приоритетна), 2) потребность безопасности, 3) потребность размножения (наименее приоритетна). Потребность считалась ведущей, если она была наиболее приоритетной из всех потребностей, для которых фактор меньше своего порога.

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 ведущей потребностью. Агент мог

выполнять одно из следующих действий A_k : 1) поиск пищи, 2) питание, 3) подготовка к размножению, 4) размножение, 5) оборона, 6) покой. Каждое правило имело свой вес W_k , веса правил настраивались методом обучения с подкреплением [23]. Агент выполнял действия, соответствующие правилам с наибольшими весами.

Моделирование показало, что в результате обучения происходит формирование циклов поведения, в которых последовательно удовлетворяются потребности питания, безопасности и размножения. Подробнее см. [22].

7.2. Модель формирования обобщенных эвристик и простых обобщенных образов

Формирование обобщенных эвристик и простых обобщенных образов в процессе обучения автономных агентов при поиске агентами пищи в двумерной клеточной среде было продемонстрировано в компьютерной модели [24]. Модель предполагала, что в части клеток были порции пищи. При съедании пищи ресурс агента пополнялся. Система управления агента была основана на правилах вида $S \rightarrow A$, веса правил оптимизировались методом обучения с подкреплением. В результате обучения агент самостоятельно формировал обобщающие эвристики: 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». В модели вводилась процедура усреднения, в результате которой агент формировал внутренние понятия «имеется пища в моей клетке», «имеется пища в клетке впереди меня», «имеется пища в клетке справа/слева от меня». Фактически эти понятия использовались в обобщающих эвристиках, которые формировались автономным агентом в процессе его самообучения.

Таким образом, построены первые модели, соответствующие предложенной программе (раздел 6), хотя пока эти модели целесообразно рассматривать только как начальный этап более полноценных исследований.

8. Междисциплинарные связи исследований когнитивной эволюции

Укажем потенциальные междисциплинарные связи будущих исследований когнитивной эволюции и тем самым подчеркнем перспективность этих исследований.

- Эти исследования связаны с основаниями науки, с основаниями математики, с серьезной проблемой: почему логические выводы, математические доказательства применимы к реальной природе.
- Данные исследования интересны с гносеологической точки зрения – они нацелены на прояснение причин применимости человеческого мышления в познании природы.

- В ряде направлений исследований вычислительных наук и в биологических работах развивается задел по моделированию когнитивной эволюции.
- Эти исследования интересны с точки зрения развития когнитивных наук, так как они связаны с наиболее важными когнитивными процессами – процессами научного познания.

9. Заключение

Итак, имеется ряд заделов моделирования когнитивной эволюции в направлениях «Адаптивное поведение», «Искусственная жизнь», «Когнитивные архитектуры», в научных основах разработок искусственного интеллекта. Еще одно близкое направление работ – биологические исследования, направленные на изучение «элементарного мышления животных» (раздел 5). Хотя работ на стыке биологии и вычислительных наук, направленных на моделирование «интеллектуального» поведения животных, пока еще явно недостаточно.

Выше наиболее четко очерчен подход к исследованию эволюционного происхождения логического мышления, используемого в математических доказательствах (раздел 2). Существенное достоинство этого подхода – ясен конечный результат эволюции: правила логического вывода, используемые при математических доказательствах, известны и достаточно хорошо формализованы.

Сопоставляя пункты контуров программы моделирования когнитивной эволюции (раздел 6) с отмеченными и другими известными моделями, можно заключить, что имеются отдельные небольшие элементы, соответствующие каждому из пунктов. Образно говоря, у нас уже есть некоторые очень небольшие фрагменты картины, но мы еще не видим всей картины когнитивной эволюции. Четкая последовательность серьезных, канонических моделей, которые показывали бы общую картину происхождения мышления, должна сформироваться в будущем.

Работа выполнялась при поддержке РФФИ, проект 13-01-00399.

Литература

1. Математическая теория логического вывода. Под ред. А.В. Идельсона и Г.Е. Минца. – М.: Наука, 1967.
2. V.F. Turchin A constructive interpretation of the full set theory // *Journal of Symbolic Logic*. – V. 52. No. 1. 1987, pp. 172-201.
3. В.Ф. Турчин Феномен науки. Кибернетический подход к эволюции. – М.: Наука, 1993.
4. From Animals to Animats. Proceedings of the First International Conference on Simulation of Adaptive Behavior. Eds. J.-A. Meyer, S.W. Wilson. – Cambridge: MIT Press, 1991.
5. В.А. Непомнящих Поиск общих принципов адаптивного поведения живых организмов и аниматов // *Новости искусственного интеллекта*. – № 2. 2002. С. 48-53.

6. J.Y. Donnat, J.-A. Meyer Learning reactive and planning rules in a motivationally autonomous animat // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part B: Cybernetics*. – V. 26. No.3. 1996, pp.381-395.
7. В.Г. Редько Эволюция, нейронные сети, интеллект: Модели и концепции эволюционной кибернетики. – М.: УРСС, 2005.
8. P. Langley, J.E. Laird, S. Rogers Cognitive architectures: Research issues and challenges // *Cognitive Systems Research*. – V.10. No. 2. 2009, pp. 141-160.
9. J.E. Laird The Soar Cognitive Architecture. – Cambridge et al.: The MIT Press, 2012.
10. Biologically Inspired Cognitive Architectures 2012. Proceedings of the Third Annual Meeting of the BICA Society. Eds. A. Chella, R. Pirrone, R. Sorbello, K.R. Johansdottir. – Heidelberg et al: Springer, 2012.
11. D. Vernon, G. Metta, G. Sandini A survey of artificial cognitive systems: Implications for the autonomous development of mental capabilities in computational agents // *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. – V. 11. No. 2. 2007, pp. 151-180.
12. Л.А. Станкевич Искусственные когнитивные системы // XII Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2010»: Лекции по нейроинформатике. – М.: НИЯУ МИФИ, 2011. С. 106-160.
13. В.К. Финн О машинно-ориентированной формализации правдоподобных рассуждений в стиле Ф. Бэкона – Д.С. Милля // *Семиотика и информатика*. 1983. М.: ВИНТИ. Вып. 20. С. 35-101.
14. O. Anshakov, T. Gergely Cognitive Reasoning: A Formal Approach. – Heidelberg et al: Springer, 2010.
15. J.L. Krichmar, A.K. Seth, D.A. Nitz, J.G. Fleischer, G.M. Edelman Spatial navigation and causal analysis in a brain-based device modeling cortical-hippocampal interactions // *Neuroinformatics*. –V. 3. No. 3. 2005, pp. 197-221.
16. В.А. Непомнящих, Е.Е. Попов, В.Г. Редько Бионическая модель адаптивного поискового поведения // *Известия РАН. Теория и системы управления*. – № 1. 2008. С. 85-93.
17. Ж.И. Резникова Современные подходы к изучению языкового поведения животных // Сборник «Разумное поведение и язык. Коммуникативные системы животных и язык человека». – М.: «Языки славянских культур», 2008. С. 293-337.
18. Ж.И. Резникова, Б.Я. Рябко Теоретико-информационный анализ «языка» муравьев // *Журнал общей биологии*. – Т. 51. № 5. 1990. С. 601-609.
19. Ж.И. Резникова, Б.Я. Рябко Передача информации о количественных характеристиках объекта у муравьев // *Журнал высшей нервной деятельности*. – Т. 45. №3. 1995. С. 500-509.
20. A.A.S. Weir, J. Chappell, A. Kacelnik Shaping of hooks in New Caledonian crows // *Science*. – V. 297. No. 5583. 2002, pp. 981-983.
21. A.H. Taylor, D. Elliffe, G.R. Hunt, R.D. Gray Complex cognition and behavioural innovation in New Caledonian crows // *Proceedings of the Royal Society. B*. – V. 277. No. 1694. 2010, pp. 2637-2643.
22. А.Г. Коваль В.Г. Редько Поведение модельных организмов, обладающих естественными потребностями и мотивациями // *Математическая биология и биоинформатика* (электронный журнал). – Т. 7. № 1. 2012. С. 266-273.
URL: [http://www.matbio.org/2012/Koval2012\(7_266\).pdf](http://www.matbio.org/2012/Koval2012(7_266).pdf).
23. Р.С. Саттон, Э.Г. Барто Обучение с подкреплением. – М.: Бином, 2011.
24. Г.А. Бесхлебнова, В.Г. Редько Модель формирования обобщенных понятий автономными агентами // Четвертая международная конференция по когнитивной науке: Тезисы докладов: В 2-х томах. Томск: ТГУ, 2010. Т. 1. С. 174-175.

Modeling of cognitive evolution – perspective direction of interdisciplinary investigations

V.G. Red'ko

Abstract. Perspective direction of interdisciplinary investigations, namely, modeling of cognitive evolution is discussed. Backgrounds for this direction of investigations are characterized. Sketch program of future modeling of cognitive evolution is proposed. Initial models of these investigations are shortly described. Interdisciplinary relations of modeling of cognitive evolution are underlined.