УДК 004.415.2, 004.588

ТЕХНОЛОГИИ КОГНИТИВНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ: МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ

Ульянов Сергей Викторович[1], Шевченко Алла Александровна[2], Шевченко Андрей Владимирович[3]

[1]Доктор физико-математических наук, профессор;
Государственный университет «Дубна»;
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;
Ведущий научный сотрудник;
Объединенный институт ядерных исследований;
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6;
e-mail: ulyanovsv@mail.ru.

[2]Аспирант;
Государственный университет «Дубна»;
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;
e-mail: allamamaeva.d@gmail.com.

[3]Аспирант;
Государственный университет «Дубна»;
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;
e-mail: ashevchenko.uni@gmail.com.

В статье представлены теоретические основы когнитивных вычислений, а также методы и алгоритмы когнитивных вычислений в когнитивной информатике, мягких вычислениях и вычислительном интеллекте. В работе рассматриваются две парадигмы когнитивных вычислений, известные как системы автономных агентов и механизмы когнитивного поиска. Системы когнитивных вычислений включают как теорию обучения, так и теорию когнитивного процесса, стремясь полноценно реализовать естественный (природный) интеллект. Поскольку интуиция и опыт, которые использует человек при решении задач или проблем, подразумевают размышление о процессе в приближенных и неточных терминах, почти все современные компьютерные модели построены с использованием только аналитической части уравнения, формируя когнитивную модель этой проблемы или процесса. Когнитивные вычисления в качестве общей методологии и технологии обработки знаний могут применяться для разработки когнитивных компьютеров и автономных систем следующего поколения. Описан спектр приложений когнитивных вычислений, таких как автономные агентные системы и интеллектуальные поисковые машины. В качестве примера применения когнитивных вычислений приведен обучающийся интеллектуальный агент принятия решений. Следовательно, системы когнитивных вычислений предоставляют человеку поддержку в коммуникациях с машинным интеллектом в рамках одной когнитивной модели, разработанной с учетом принципов человеческого фактора, что позволяет естественно и просто взаимодействовать с пользователями.

Ключевые слова: когнитивные вычисления, квантовые сквозные ИТ, робототехника, искусственный интеллект, мягкие вычисления.

Для цитирования:
Ульянов С. В.., Шевченко А. А., Шевченко А. В. Технологии когнитивных вычислений: модели и алгоритмы // Системный анализ в науке и образовании: сетевое научное издание. 2021. № 2. С. 118–132. URL : http://sanse.ru/download/440.

COGNITIVE COMPUTING TECHNOLOGIES: MODELS AND ALGORITHMS

Ulyanov Sergey V.[1], Shevchenko Alla A.[2], Shevchenko Andrey V.[3]

[1]*Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor;*
Dubna State University;
19 Universitetskaya Str., Dubna, Moscow region, 141980, Russia;
Leading Researcher of LIT JINR;
Joint Institute for Nuclear Research;
6 Joliot-Curie Str., Dubna, Moscow region, 141980, Russia;
e-mail: ulyanovsv@mail.ru.

[2]*Postgraduate student;*
Dubna State University,
19 Universitetskaya Str., Dubna, Moscow region, 141980, Russia;
e-mail: allamamaeva.d@gmail.com.

[3]*Postgraduate student;*
Dubna State University,
19 Universitetskaya Str., Dubna, Moscow region, 141980, Russia;
e-mail: ashevchenko.uni@gmail.com.

The article presents the theoretical foundations of cognitive computing, as well as methods and algorithms of cognitive computing in cognitive computer science, soft computing and computational intelligence. The paper considers two paradigms of cognitive computing, known as systems of autonomous agents and mechanisms of cognitive search. Cognitive computing systems include both the theory of learning and the theory of the cognitive process, striving to fully realize the natural (native) intelligence. Since the intuition and experience that a person uses when solving tasks or problems imply thinking about the process in approximate and inaccurate terms, most modern computer models are built using only the analytical part of the equation, forming a cognitive model of this problem or process. Cognitive computing as a general methodology and technology of knowledge processing can be used to develop cognitive computers and autonomous systems of the next generation. The range of applications of cognitive computing, such as autonomous agent systems and intelligent search engines, is described. As an example of the application of cognitive computing, a learning intelligent decision-making agent is given. Consequently, cognitive computing systems provide a person with support in communication with machine intelligence within the framework of a single cognitive model developed with regards to the principles of the human factor, which allows for natural and simple interaction with users.

Keywords: cognitive computing, quantum end-to-end IT, robotics, artificial intelligence, soft computing.

For citation:
Ulyanov S., Shevchenko A., Shevchenko A. Cognitive computing technology : models and algorithms. *System Analysis in Science and Education*, 2021;(2):118–132(In Russ). Available from: http://sanse.ru/download/440.

Введение: Когнитивные вычисления. Модели и алгоритмы

С развитием программного обеспечения и возможностей аппаратных средств, появления отраслей больших данных и искусственного интеллекта (далее – ИИ), когнитивным вычислениям уделяется значительное внимание как в академических кругах, так и в промышленности. Современные когнитивные вычисления, однако, все еще не в состоянии полноценно реализовать естественный (природный) интеллект. В частности, современный технологический прогресс в области когнитивных вычислений сталкивается с такими проблемами, как утилитарность промышленных систем ИИ и не ориентированность их на антропоцентричность. Ожидания в отношении возможностей машины стремительно растут, поэтому для совершенствования систем на основе ИИ необходимо наращивать объемы обработки данных и повышать уровень интеллектуальности самих систем обработки.

Фундаментальные теории и методологии, лежащие в основе когнитивных вычислений, — это когнитивная информатика – интенсивно развивающаяся междисциплинарная область, исследующая фундаментальные проблемы современной информатики, вычислений, программной инженерии, ИИ, сильного вычислительного интеллекта, кибернетики, когнитивной науки, нейропсихологии, медицины, философии, лингвистики, экономики и мн. др. Когнитивная информатика изучает внутренние

механизмы обработки информации и процессы естественного интеллекта (головного мозга, далее – ГМ), теоретические основы и денотационную математику абстрактного интеллекта и их инженерные приложения с помощью когнитивных вычислений. Математические основы когнитивных вычислений основаны на современной денотационной математике – категории выразительных математических структур, оперирующих с математическими объектами высокого уровня, такими как абстрактные объекты, сложные отношения, поведенческая информация, концепции, знания, процессы, интеллект и системы. На основе когнитивной информатики и денотационной математики могут быть разработаны новые вычислительные архитектуры и технологии, известные как когнитивные вычисления, которые принимают архитектуры, отличные от фон Неймана, и расширяют традиционные вычислительные возможности от императивной обработки данных до автономной обработки знаний.

Эволюция когнитивных вычислений

Когнитивная наука является междисциплинарным предметом, изучающим распознавание, классификацию и обработку информации в ГМ. В этой области исследуют способности человека, посредством наблюдения за такими аспектами, как речь, восприятие, память, внимание, рассуждение и эмоции. Становление когнитивной системы человека формируется на основе постоянной связи с окружающим миром для получения информации о внешней среде. Человек осознает окружающую физическую среду через органы восприятия, формируя входные данные, поступающие в ГМ для дальнейшей классификации и обработки (хранение, анализ и обучение). На основе результатов обработки через нервную систему формируется поведенческий ответ. Таким образом, образуется полный замкнутый цикл, охватывающий процесс принятия решений и действий.

Когнитивная наука пересекает множество предметов и областей исследований, таких как лингвистика, психология, искусственный интеллект, философия, нейробиология и антропология. В некотором смысле достижения, полученные исследователями в области когнитивных наук до настоящего времени, тесно связаны с междисциплинарными методами исследования. На рис. 1 показан процесс эволюции когнитивных вычислений.

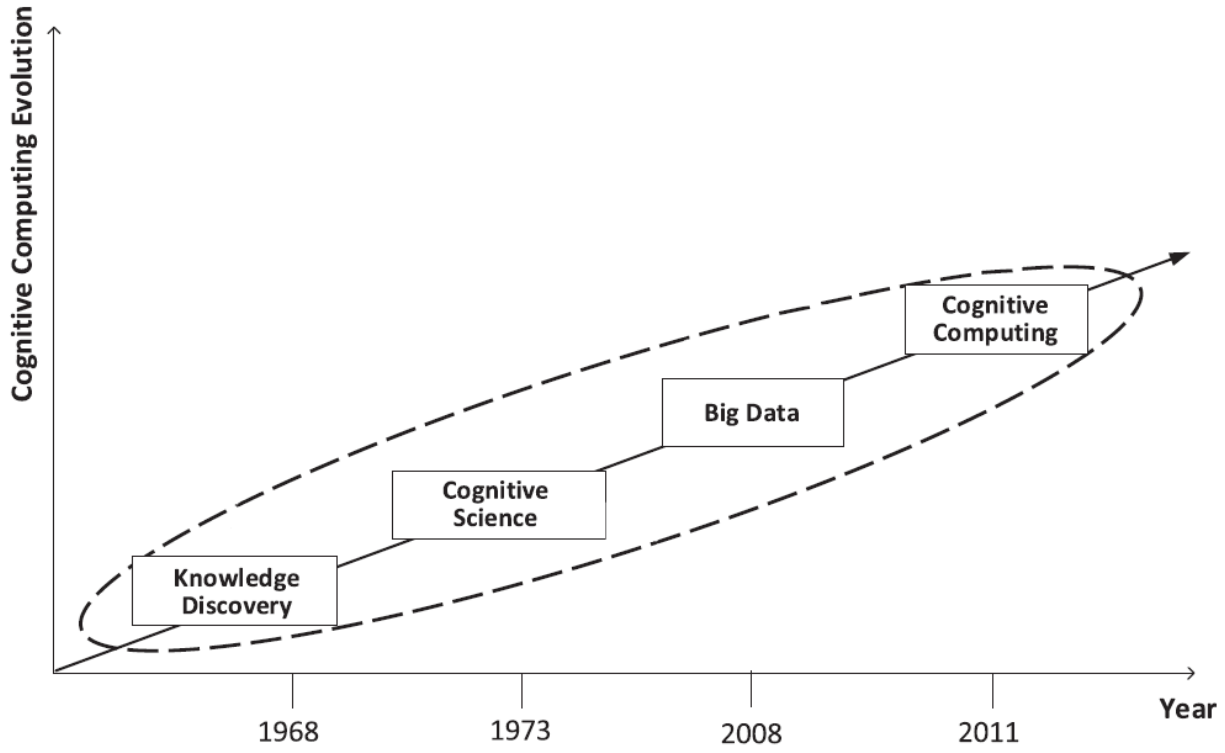

Рис. 1. Эволюция когнитивных вычислений

В частности, процесс эволюции включает следующие этапы развития:

- Открытие знаний (*Knowledge Discovery*) – выявление эффективных, новых, потенциально полезных и понятных знаний из информации.

- Когнитивная наука (*Cognitive Science*) – междисциплинарное исследование формирования и транскрибирования информации в ГМ для применения в компьютерных науках и когнитивной нейропсихологии, включая когнитивную психологию, лингвистику, философию и т. д.
- Большие данные (*Big Data*) – сложные наборы данных различного типа, поступающие в систему с большой скоростью и в огромном количестве, при этом обладая низкой ценностью полезности. Существующие программные инструменты не способны эффективно анализировать и обрабатывать такой объем данных.
- Когнитивные вычисления (*Cognitive Computing*) – когнитивный интеллект основывается на самих данных и их потенциале, что позволяет машине обладать когнитивным интеллектом, подобным ГМ.

Модели когнитивных вычислений

Системы когнитивных вычислений включают как теорию обучения, так и теорию когнитивного процесса. Поскольку интуиция и опыт, которые использует человек при решении задач, проблем, поиске, исследовании, анализе или построении систем, основанных на знаниях, подразумевают размышление о процессе в приближенных, расплывчатых и неточных терминах, почти все современные компьютерные модели построены с использованием только аналитической части уравнения, описывающего исследуемую модель. При этом формируется когнитивная модель этой проблемы или процесса. Следовательно, системы когнитивных вычислений предоставляют человеку поддержку в коммуникациях с машинным представлением в рамках одной когнитивной модели, разработанной с учетом принципов человеческого фактора, что позволяет естественно и просто взаимодействовать с пользователями.

Модель абстрактного интеллекта когнитивных вычислений

Абстрактный интеллект (далее – АИ) представляет собой исследование как естественного, так и ИИ на уровнях нейронного, когнитивного, функционального и логического. В широком смысле АИ – это любая способность человека (или системы) автономно транслировать формы абстрактной информации в ГМ (или в автономных системах). Среди парадигм АИ можно выделить:

- Естественный интеллект (далее – ЕИ) – может быть представлен в виде естественных биологических и физиологических организмов (например, ГМ).
- Искусственный интеллект (ИИ) – представляет собой когнитивно-вдохновленные искусственные модели и искусственные системы.
- Машинный интеллект (далее – МИ) – воплощает сложные машинные системы: компьютеры, роботы, автономные схемы, ИНС и автономные механические машины.

Вычислительный интеллект (далее – ВИ) – это вычислительные методологии и программные комплексы, такие как экспертные системы, нечеткие системы, автономные вычисления, системы интеллектуальных квантовых агентов, генетические / эволюционные системы и автономные системы обучения.

Для формального объяснения высокоуровневых механизмов ГМ на основе наблюдений на биологическом, физиологическом, функциональном и логическом уровнях, согласно функциональному редукционизму, строится логическая модель общей формы интеллекта, известная как АИ [1]. Логическая модель АИ и исследования парадигм АИ формируют в согласованную структуру.

Фундаментальные механизмы АИ можно описать с помощью общей абстрактной модели интеллекта (англ. *Generic Abstract Intelligence Model, GAIM,* далее – ОАМИ), что показано на рис. 2.

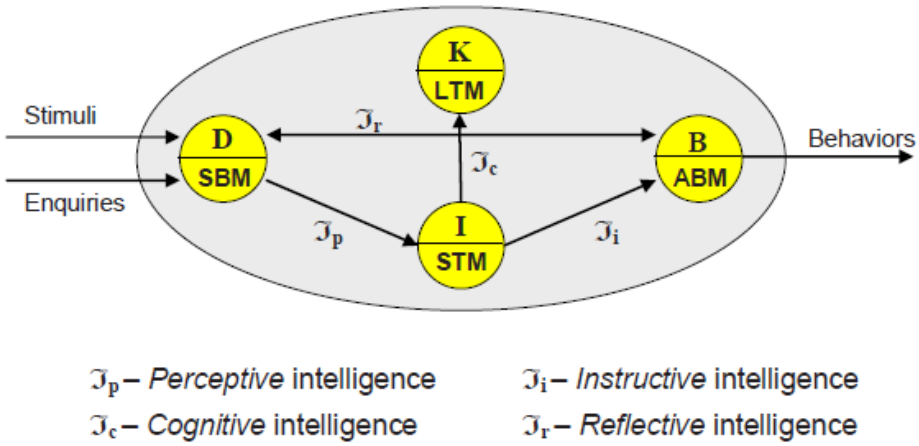

Рис. 2. Общая абстрактная модель интеллекта

В ОАМИ различные формы интеллекта описываются как движущая сила между парой абстрактных объектов в ГМ. Среди этих объектов можно выделить данные (*Data*, *D* на рис. 2), информацию (*Information*, *I* на рис. 2), знания (*Knowledge*, *K* на рис. 2) и поведение (*Behavior*, *B* на рис. 2); примечательно, что объект физически сохраняется в памяти определенного типа. Это основа нейроинформатики естественного интеллекта и физиологические доказательства того, почему естественный интеллект можно разделить на четыре формы, известные как перцептивный интеллект $\Im_p$, познавательный интеллект $\Im_i$, когнитивный интеллект $\Im_c$ и рефлексивный интеллект $\Im_r$. Когнитивные вычисления нацелены на реализацию всех форм абстрактного интеллекта в ОАМИ посредством императивных вычислений C_I, автономных вычислений C_A и восходящих когнитивных вычислений C_c. Взаимосвязь между различными формами ВИ и средствами их реализации можно описать следующим образом:

$$\begin{cases} C_I \Rightarrow \Im_i \\ C_A \Rightarrow \Im_r \\ C_C \Rightarrow \Im_c \cup \Im_p \end{cases} \tag{1}$$

Модель АИ когнитивных вычислений может быть уточнена с помощью поведенческой модели. Все пространство поведения когнитивных вычислений B_{CC} представляет собой многоуровневую иерархическую структуру, которая охватывает императивное поведение B_I, автономное поведение B_A и восходящее когнитивное поведение B_C:

$$\begin{aligned} B_{CC} \mathrel{\hat{=}} (B_I, B_A, B_C) \\ (= \quad & \{B_e, B_t, B_{int}\} && // B_I \\ \| & \{B_e, B_t, B_{int}, B_g, B_d\} && // B_A \\ \| & \{B_e, B_t, B_{int}, B_g, B_d, B_p, B_{inf}\} && // B_C, \\ ) & \end{aligned} \tag{2}$$

где B_I моделируется с помощью поведения, управляемого событиями, временем и прерываниями; B_A моделируется поведением, основанным на целях и принятии решений; B_C моделируется поведением, основанным на восприятии и умозаключениях. Поведенческая модель когнитивных вычислений $B_C ST$ является реализацией императивного интеллекта I_I, автономного интеллекта I_I и когнитивного интеллекта I_I, что можно выразить как:

$$C_c ST \mathrel{\hat{=}} \begin{cases} \Im_I = \{B_e, B_t, B_{int}\} \\ \Im_A = \{B_e, B_t, B_{int}, B_g, B_d\} \\ \Im_C = \{B_e, B_t, B_{int}, B_g, B_d, B_p, B_{int}\} \end{cases}. \tag{3}$$

Очевидно, что интеллектуальное поведение систем когнитивных вычислений является иерархическим и инклюзивным на уровнях императивного, автономного и когнитивного интеллекта, то есть:

$$\Im_J \subseteq \Im_A \subseteq \Im_C. \tag{4}$$

Соответственно, любое разумное поведение более низкого уровня является подмножеством поведения более высокого уровня. Другими словами, любой интеллект более высокого уровня является естественным продолжением интеллекта более низкого уровня. Это указывает на то, что подход к реализации когнитивных вычислений на высшем уровне ВИ заключается в воплощении и реализации набора архитектур и поведения параллельных вычислений с помощью императивных, автономных и когнитивных механизмов.

Нечеткие множества и когнитивные модели

Переход от абсолютного членства (как в Булевой логике, где 0 – не принадлежит, а 1 – принадлежит) к частичному (в диапазоне принадлежности [0,1]) имеет глубокие последствия для значения истины в системе, основывающейся на нечеткой логике. В системе рассуждений и исследований, основанной на нечеткой логике, концепции, связанные с данными, вытекают из их природы. В булевой логике нельзя применять активную трансформируемую качественную семантику, поскольку нельзя разделить пространство данных переменной на набор перекрывающихся состояний с различной степенью принадлежности. Однако в нечеткой логике область определения переменной может быть разделена на наборы перекрывающихся нечетких множеств. Каждый набор определяет семантическое состояние данных. Кроме того, эта базовая семантика может быть преобразована с помощью прилагательных и наречий для расширения существующей семантики.

Нечеткое множество, в отличие от Булевой логики, определяет функцию, которая сопоставляет элементы выборки с их степенью принадлежности к этой выборке. На рис. 3 показана структура типичного нечеткого множества.

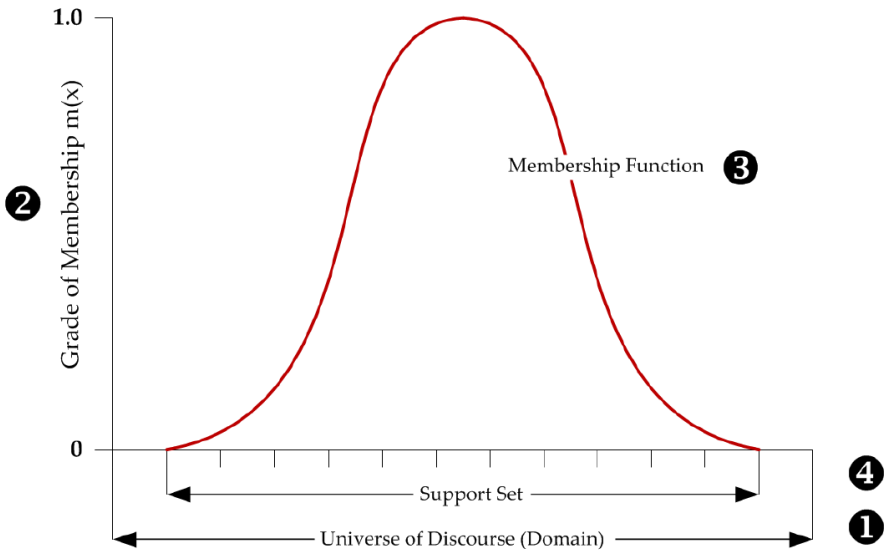

Рис. 1. Структура нечеткого множества

Вселенная дискурса или *Область нечеткого* множества (см. рис. 3 (1)) – это диапазон значений, на который проецируется определение нечеткого множества. Значения вне этого диапазона имеют либо полную принадлежность, либо не принадлежат нечеткому множеству (в зависимости от функции принадлежности нечеткого множества). *Степень принадлежности* (см. рис. 3 (2)) в нечетком множестве всегда находится в диапазоне от нуля до единицы, где 1 указывает на принадлежность к множеству, а 0 – на отсутствие этой принадлежности, а значение между 0 и 1 – частичная принадлежность. *Функция принадлежности* (см. рис. 3 (3)) связывает значение в области нечеткого множества со степенью принадлежности к нечеткому множеству.

Нечеткие множества можно разделить на две категории: те, которые определяют физические величины, и те, которые определяют абстрактные идеи. Большинство нечетких наборов определяют семантическое или лингвистическое значение физических данных, извлекаемых из значений поля в событии. Другие нечеткие наборы определяют значение абстрактных данных. Категория абстрактных

идей характеризируется психометрическими величинами, такими как риск, проблемы или идеи, связанные с настроениями.

Замечание. Во-первых, все нечеткие множества берут свое значение из контекста, следовательно, не существует стандартных или универсальных нечетких множеств. Во-вторых, семантическое значение нечеткого множества основано на форме его функции принадлежности. Это означает, что функция, которая сопоставляет данные предметной области со степенью принадлежности, определяет, как нечеткое множество детерминирует концепцию.

Набор нечетких множеств, определяющих семантику поля события, называется нечетким множеством терминов. Это средство, с помощью которого поле события (или вычисляемое поле) преобразуется в лингвистическую переменную, которая проецирует данные на множество перекрывающихся нечетких множеств, описывающих семантику данных. В лингвистической переменной множество нечетких терминов не гарантирует уникальность данных – вместо этого функции принадлежности смежных нечетких множеств перекрываются. Это перекрытие является как естественным следствием теории нечетких множеств, так и правильным отражением того, как концепции в реальном мире существуют вместе с разной степенью силы. Однако, во-первых, это означает, что нечеткая логика не подчиняется закону непротиворечивости (также называемому законом исключенного третьего). Во-вторых, эта особенность нечеткой логики позволяет нечеткой системе моделировать очень широкий спектр понятий и представлять их естественные отношения. Таким образом, перекрытие является важной частью когнитивной модели, используемой в нечетких системах (таких как концептуальный поиск).

Антропоцентрические вычисления

Когнитивные вычислительные системы обучаются, взаимодействуют с людьми и естественным образом адаптируются, расширяя и объединяя возможности человека и машины. Эти системы представляют собой синергию «умной» эвристики, механизма естественного языка, искусственного интеллекта (ИИ) и антропоцентрических вычислений (далее – АЦВ). Общая природа АЦВ в контексте когнитивных вычислений состоит из нескольких элементов:

1. Исследователь данных или аналитик. В зависимости от типа когнитивных вычислений роль пользователя может варьироваться от конечных пользователей встроенных вычислительных систем (например, пользователей экспертных систем и систем бизнес-политик) до бизнес-менеджеров, специалистов по стратегическому планированию, бизнес-аналитиков и системных аналитиков, менеджеров проектов, специалистов по обработке данных и ученых, работающих в области ВИ.

2. Когнитивная модель. Это набор концепций, которые пользователь исследует, анализирует или трансформирует в набор семантических правил ЕСЛИ-ТО-ИНАЧЕ. Когнитивная модель может содержать двусмысленность, конфликты, расплывчатые идеи, приблизительные оценки ценности и параметров, а также общее, если не всегда точное, представление о влиянии времени.

3. Механизм когнитивных вычислений. Основываясь на идее качественной семантики, которая сама по себе основана на теории нечетких множеств и теории нечетких систем, структура когнитивных вычислений может представлять и аналитически управлять неточными семантическими концепциями, например «несколько длинные», «быстро меняющиеся», «близкие к», «далеко» и т. д.

4. Пространство совместимости сопоставляет результаты процесса когнитивных вычислений с когнитивной моделью пользователя, то есть для каждого экземпляра (или кластера экземпляров) механизм когнитивной аналитики создает значение, которое указывает на совместимость результата с когнитивной моделью пользователя. Это значение называется индексом совместимости.

5. Адаптивный контур обратной связи обеспечивает возможность коррекции входных воздействий в процессе управления.

Примечание. *Семантика* – это одно из основных направлений лингвистических исследований, изучающий природу значения единиц языка. Существует три школы семантики. Члены школы

интерпретирующей семантики изучают структуры языка независимо от условий их использования. Напротив, сторонники *генеративной семантики* настаивают на том, что значение предложений определяется функцией их использования. Еще одна группа, *психометрическая семантика*, утверждает, что семантика не будет развиваться, пока теоретики не примут во внимание психологические вопросы о том, как люди формируют концепции и как они соотносятся со значениями слов.

Качественная семантика – сочетание генеративной и психометрической семантики, используемой в концептуальном поиске. Основываясь на теории нечетких систем и принципах когнитивного моделирования, качественная семантика формирует значения исходя из природы данных, определяемых набором лингвистических переменных в форме перекрывающихся нечетких множеств.

Цель структуры когнитивных вычислений – максимально точно воспроизвести модель когнитивного процесса. Сочетание качественной семантики, представления концепций в терминах нечетких множеств и хеджирования, а также способности выражать сложные и неточные идеи в терминах, которыми можно функционально манипулировать с помощью механизма машинного интеллекта, позволяет системе когнитивных вычислений удовлетворять этой цели. Структура когнитивных вычислений развивается от онтологии (на нижнем уровне) до лингвистического словаря, состоящего из качественной семантики или концепций, зависящих от контекста (на верхнем уровне). Способность исследовать и моделировать данные с концептуальной точки зрения связывает когнитивную модель человека с соответствующей когнитивной моделью, формируемой вычислительной системой. На рис. 4 схематично показана архитектура вычислительной среды.

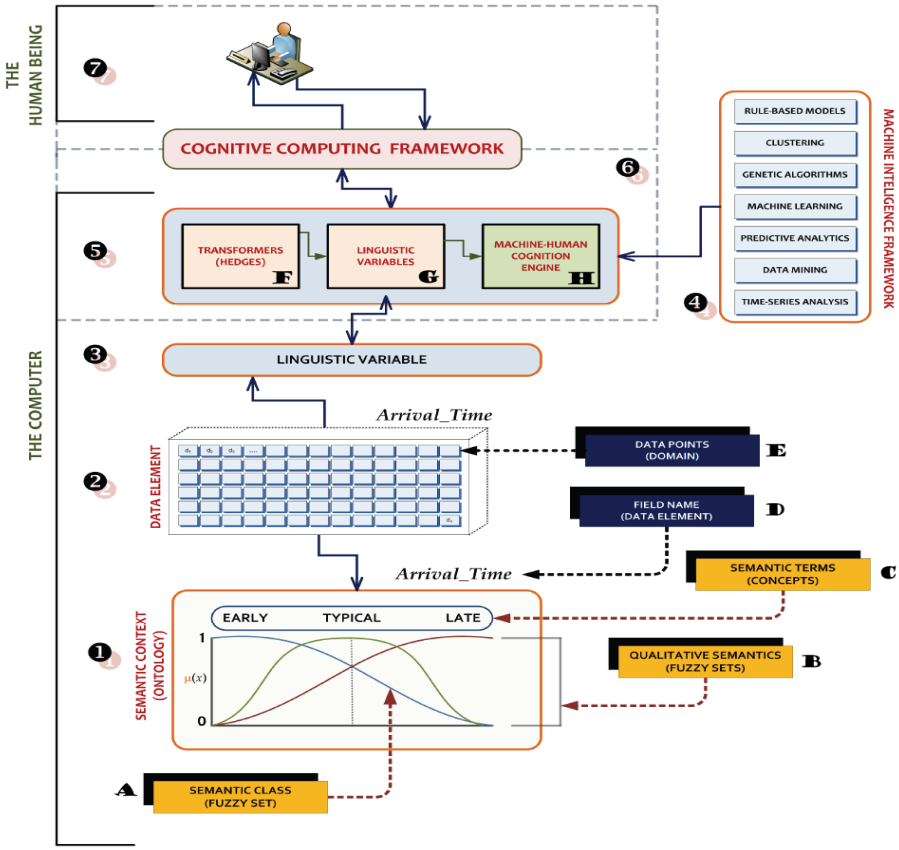

Рис. 2. Когнитивная вычислительная среда

Элемент данных (см. рис. 4 (2)) может иметь один или несколько *семантических контекстов* (см. рис. 4 (1)). Контекст вычислительной среды определяет качественную семантику (см. рис. 4 (*B*)), отношения между семантикой, а также устанавливает словарный запас. Онтология контекста содержит набор *семантических классов* (см. рис. 4 (*A*)), каждый из которых определяется одним нечетким набором данных.

Семантические термины (см. рис. 4 (*C*)) определяют названия концепций, используемых для доступа к полю. *Элемент данных* (см. рис. 4 (2)) – это именованное поле в событии, записи или каком-либо другом структурированном или неструктурированном наборе входных данных. *Имя элемента*

(см. рис. 4 (*D*)) данных также становится именем по умолчанию для базового онтологического контекста и состоит из точек данных (см. рис. 4 (*E*)). Каждая определенная точка попадает в границы минимального и максимального значений поля. В момент, когда набор концепций определен, происходит преобразование поля в *лингвистическую переменную* (см. рис. 4 (3)) – фундаментальное представление данных в механизме когнитивных вычислений.

Платформа машинного интеллекта (см. рис. 4 (4)) основана на широком спектре компонентов машинного интеллекта, информатики и бизнес-моделирования. Все эти компоненты основаны на моделировании с помощью лингвистических переменных в среде когнитивных вычислений. Это делает все модели антропоцентрическими и совместимыми друг с другом. Платформа когнитивного моделирования (см. рис. 4 (5)) обеспечивает семантический (лингвистический) механизм, связывающий текущий контекст онтологии с текущей моделью, а также реализовывает модель в соответствии с характером исследования или анализа. Компонентные элементы осуществляют обработку семантических процессов с помощью преобразователей (см. рис. 4 (*F*)), лингвистических переменных (см. рис. 4 (*G*)) и комбинации когнитивной вычислительной системы и основных механизмов вывода (см. рис. 4 (*H*)). *Платформа когнитивных вычислений* (см. рис. 4 (6)), в свою очередь, объединяет все возможности машинного интеллекта и антропоцентричных вычислений в единый источник доступа, обеспечивая согласованный и отзывчивый интерфейс как для людей, так и для других машин.

Пользователь (см. рис. 4 (7)) взаимодействует со структурой когнитивных вычислений с помощью простых функций или специальных языков запросов. Возможность взаимодействия с системой когнитивных вычислений посредством простых команд (и получения ответа с определенной степенью совместимости с когнитивной моделью) делает антропоцентрические вычислительные модели гибкими и простыми в использовании.

Алгоритмы когнитивных вычислений

Когнитивные вычисления в качестве общей методологии и технологии обработки знаний могут применяться для разработки когнитивных компьютеров и автономных систем следующего поколения.

Рассмотрим две парадигмы когнитивных вычислений, известные как системы автономных агентов и механизмы когнитивного поиска, которые имитируют интеллектуальные возможности более высокого порядка искусственного и естественного интеллекта, выходящие за пределы традиционных императивных вычислений.

Механизмы когнитивного поиска

Поиск – это не только базовая вычислительная операция, но и фундаментальный когнитивный процесс ГМ. Изучение когнитивных поисковых систем — еще одна прикладная парадигма когнитивных вычислений.

Поиск SE – это когнитивный процесс выявления и извлечения части знаний в памяти с помощью заданного понятия cST, в котором может быть найдено эквивалентное или подобное понятие c_iST:

$$SE\ R_{iN=1}^{nN} \mathrel{\widehat{=}} cST = c_iST \vee cST \cong c_iST \rightarrow c'ST = cST \uplus c_iST \qquad (5)$$

где nN – максимальное количество элементов в обозначенном пространстве поиска в долговременной памяти, а $cST = c_iST \vee cST \cong c_iST$ – эквивалентное или подобное понятие в соответствии с алгеброй понятий.

Фундаментальная проблема поисковых технологий заключается в том, что поиск – это гибридный и сложный процесс, охватывающий следующие аспекты:

- понимание запросов;
- алгоритмы поиска;
- представление результатов.

Анализ и сопоставление интеллектуального поиска с помощью когнитивных вычислительных систем и традиционного поиска представлены в табл. 1.

Табл. 1. Сравнение технологий поиска

Функция	Традиционный поиск	Когнитивный поиск
Запрос	Синтаксически ориентированный	Семантически ориентированный
	Угадывание символов пользовательских запросов	Интерактивный семантический анализ пользовательского запроса
Поиск	Совпадение символов	Семантическое или концептуальное совпадение
	Нахождение всех эквивалентных строк	Поиск всех синонимов или похожих слов
Результат	Список (например, ссылок)	Список концепций, обогащенных объектами и атрибутами
	Ранжирование по частоте слов	Ранжирование по концептуальной и семантической схожести
	–	Извлечение знаний, построение концепций

Денотационные математические средства, такие как алгебра понятий и визуальная семантическая алгебра, а также реализация вспомогательных функций на основе машинного обучения и сложного вычислительного интеллекта, необходимы для поддержки строгого текстового и визуального семантического анализа совместно с лингвистическими или предметными базами знаний [2, 3]. Таким образом, когнитивные вычисления обеспечивают комплекс теоретических и технических подготовки для разработки и внедрения интеллектуальных поисковых систем следующего поколения.

Автономные агентские системы

Система автономных агентов (далее – САА) – это композиция распределенных агентов, обладающих способностью автономных вычислений, возможностью принятия решений и взаимодействия с партнерами и средой. САА также можно назвать интеллектуальным программным обеспечением, для отображения его сущности и взаимосвязи с аппаратным и программным обеспечением в когнитивных вычислениях. Модель когнитивных вычислений САА ($\S AAS\ ST$), представляет собой распределенную структуру под управлением операционной системой агента (англ. *Agent Operating System*) ($AOS\ ST$) и набором интеллектуальных функций, реализованных для обеспечения интеллектуального поведения агента (англ. *Agent Intelligent Behaviors*) ($AIB\ ST$), как показано на рис. 5.

Модель $\S AAS\ ST$, реализованная на основе алгебры процессов реального времени [4], показывает, что естественный и искусственный интеллекты разделяют одни и те же основы когнитивной информатики на основе абстрактного интеллекта и когнитивных вычислений. Другими словами, на логическом уровне естественного интеллекта ГМ использует те же механизмы, что и искусственный и вычислительный интеллекты. Различия между естественным и искусственным интеллектами только в средствах реализации и в степени интеллектуальных способностей.

Пример. Обучающийся интеллектуальный агент принятия решений как реализация когнитивных вычислений. Обучающийся интеллектуальный агент принятия решений (англ. *Learning Intelligent Decision Agent*, далее – *LIDA*) – это основанная на биологии когнитивная архитектура системного уровня для моделирования разума. Более чем десятилетние исследования *LIDA* привели к созданию широкого спектра механизмов обучения, включая декларативное, мотивационное, процедурное, перцептивное, пространственное, сенсомоторное и основанное на внимании. Эти механизмы обучения могут значительно различаться по своим процессам и реализациям; однако все они должны соответствовать набору основных принципов, называемые концептуальными обязательствами *LIDA* [5]. *LIDA* реализует и конкретизирует многие важные аспекты функциональной теории сознания и теории глобального рабочего пространства (англ. *Global Workspace Theory*, далее – ТГРП) – информационной сети, где любая информация может быть связана с любой другой информацией [6].

The Computational Intelligent Model of AAS

$$
\begin{aligned}
\S AAS\mathbf{ST} \triangleq\ & AOS\mathbf{ST} && \text{// Agent operating system}\\
\|\ & AIB\mathbf{ST} && \text{// Agent intelligent behaviors}\\
=\ \{\ & \text{// } AOS\mathbf{ST}\\
& <SE\mathbf{ST}: \mathop{R}_{ptr\mathbf{P}=0}^{n-1} SENSORS[ptr\mathbf{P}]\mathbf{ST}> && \text{// Layer 1: Sensation engine}\\
\|\ & <ME\mathbf{ST}: \mathop{R}_{addr\mathbf{P}=0}^{5} MEM[addr\mathbf{P}]\mathbf{ST}> && \text{// Layer 2: Memory engine}\\
& \quad = <SBM\mathbf{ST} \| STM\mathbf{ST} \| CSM\mathbf{ST} \| LTM\mathbf{ST} \| ABM\mathbf{ST}>\\
\|\ & <PE\mathbf{ST}: \mathop{R}_{i\mathbf{P}=0}^{7} PROC[i\mathbf{N}]\mathbf{ST}> && \text{// Layer 3: Perception engine}\\
& \quad = <Attention\mathbf{ST} \| Motivation\mathbf{ST} \| Emotion\mathbf{ST} \| Attitude\mathbf{ST}\\
& \qquad | SensOfSpatiality\mathbf{ST} \| SensOfTime\mathbf{ST} \| SensOfMotion\mathbf{ST}>\\
\|\ & <AE\mathbf{ST}: \mathop{R}_{ptr\mathbf{P}=0}^{n_{SERVO}\mathbf{H}-1} SERVOS[ptr\mathbf{P}]\mathbf{ST}> && \text{// Layer 4: Action engine}\\
\|\ & <CE\mathbf{ST}: \mathop{R}_{i\mathbf{P}=0}^{10} PROC[i\mathbf{N}]\mathbf{ST}> && \text{// Layer 5: Meta-cognition engine}\\
& \quad = <ObjectIdentification\mathbf{ST} \| Abstraction\mathbf{ST} \| ConceptEstablishment\mathbf{ST}\\
& \qquad | Search\mathbf{ST} \| Categorization\mathbf{ST} \| Comparison\mathbf{ST} \| Memorization\mathbf{ST}\\
& \qquad \| Qualification\mathbf{ST} \| Quantification\mathbf{ST} \| Selection\mathbf{ST}>\\
\|\ & <IE\mathbf{ST}: \mathop{R}_{i\mathbf{P}=0}^{6} PROC[i\mathbf{N}]\mathbf{ST}> && \text{// Layer 6: Meta-inference engine}\\
& \quad = <Deduction\mathbf{ST} \| Induction\mathbf{ST} \| Abduction\mathbf{ST} \| Analogy\mathbf{ST}\\
& \qquad | Analysis\mathbf{ST} \| Synthesis\mathbf{ST}>\\
\|\ & <HCE\mathbf{ST}: \mathop{R}_{i\mathbf{P}=0}^{7} PROC[i\mathbf{N}]\mathbf{ST}> && \text{// Layer 7: Higher cognition engine}\\
& \quad = <Comprehension\mathbf{ST} \| Learning\mathbf{ST} \| Planning\mathbf{ST} \| ProblemSolving\mathbf{ST}\\
& \qquad | DecisionMaking\mathbf{ST} \| Creation\mathbf{ST} \| PattenRecognition\mathbf{ST}>\\
\|\ & <\S t\mathbf{TM}> && \text{// Relative clock}\\
\}\ & \\
\|\ \{\ & \text{// } AIB\mathbf{ST}\\
\|\ & < \mathop{R}_{k\mathbf{N}=0}^{n_e\mathbf{N}-1} @e_k\mathbf{S} \hookrightarrow P_k\mathbf{ST}> && \text{// } \textit{Event}\text{-driven behaviors } (B_e)\\
\|\ & < \mathop{R}_{k\mathbf{N}=0}^{n_t\mathbf{N}-1} @t_k\mathbf{TM} \hookrightarrow P_k\mathbf{ST}> && \text{// } \textit{Time}\text{-driven behaviors } (B_t)\\
\|\ & < \mathop{R}_{k\mathbf{N}=0}^{n_{int}\mathbf{N}-1} @int_k\odot \hookrightarrow P_k\mathbf{ST}> && \text{// } \textit{Interrupt}\text{-driven behaviors } (B_{int})\\
\|\ & < \mathop{R}_{k\mathbf{N}=0}^{n_g\mathbf{N}-1} @g_k\mathbf{ST} \hookrightarrow P_k\mathbf{ST}> && \text{// } \textit{Goal}\text{-driven behaviors } (B_g)\\
\|\ & < \mathop{R}_{k\mathbf{N}=0}^{n_d\mathbf{N}-1} @d_k\mathbf{ST} \hookrightarrow P_k\mathbf{ST}> && \text{// } \textit{Decision}\text{-driven behaviors } (B_d)\\
\|\ & < \mathop{R}_{k\mathbf{N}=0}^{n_p\mathbf{N}-1} @p_k\mathbf{ST} \hookrightarrow P_k\mathbf{ST}> && \text{// } \textit{Perception}\text{-driven behaviors } (B_p)\\
\|\ & < \mathop{R}_{k\mathbf{N}=0}^{n_{int}\mathbf{N}-1} @inf_k\mathbf{ST} \hookrightarrow P_k\mathbf{ST}> && \text{// } \textit{Inference}\text{-driven behaviors } (B_{inf})\\
\}\ & \\
\end{aligned}
$$

Рис. 3. Модель когнитивных вычислений САА

При разработке *LIDA* особое внимание уделяется роли чувств в реализации многих когнитивных процессов. Вопреки представлению о чувствах как о неадаптивных реакциях на окружающую среду, чувства необходимы для быстрой ситуационной оценки, эффективного выбора действий, сосредоточения и обучения. Также, при проектировании *LIDA* долговременная память представляется не как монолитный и единый механизм, а как множество модулей, представляющих различные типы структур знаний, например, перцептивные, автобиографические, пространственные, процедурные и т. д. Несмотря на достижения в области разработки концептуальной модели *LIDA*, механизмы обучения остаются недоопределенными и, в значительной степени, нереализованными. На рис. 6 показаны модули *LIDA* и их взаимодействие. Архитектура модулей *LIDA* зависит от природы и цели исследований.

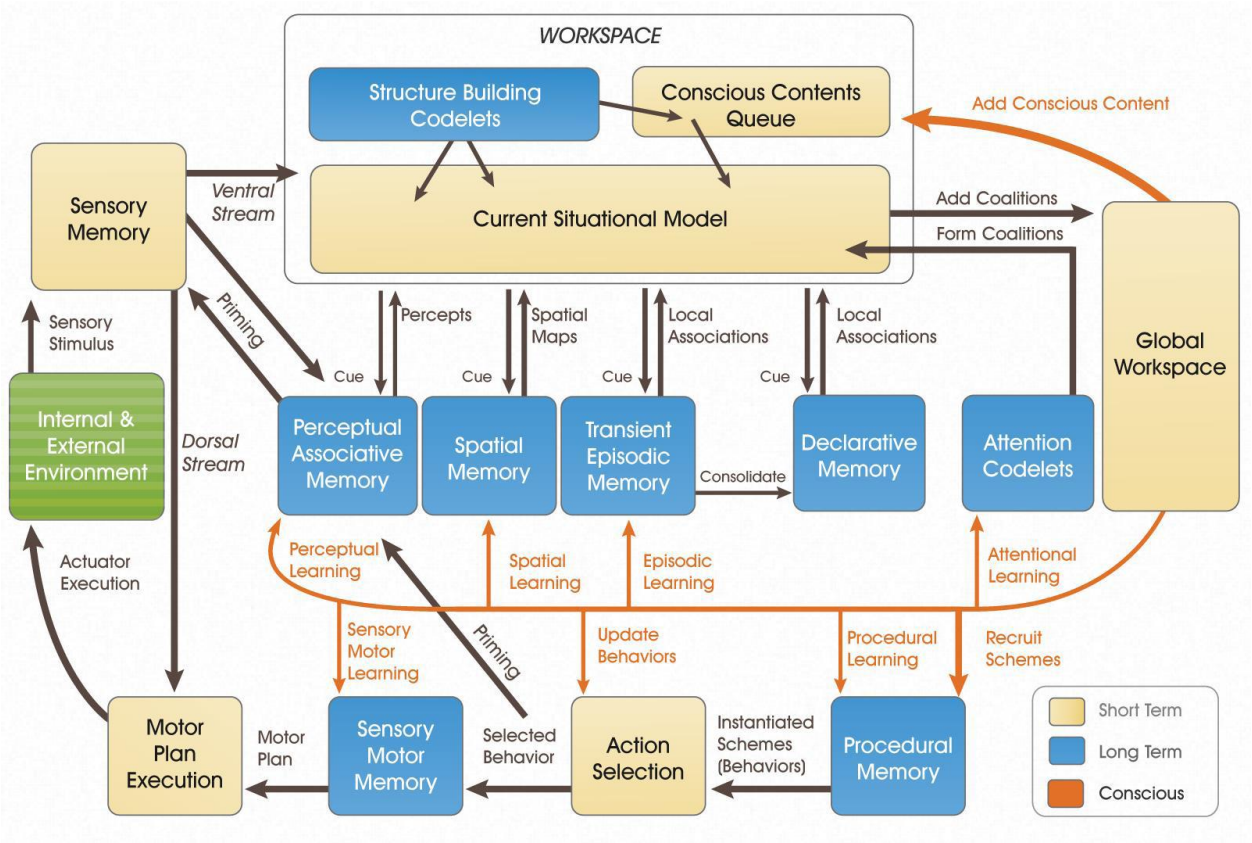

Рис. 4. Схема модели LIDA. Осознанная трансляция инициирует обучение во всех модулях долговременной памяти

Автономные агенты должны постоянно адаптироваться к окружающей среде. В *LIDA* это определено посредством серии когнитивных циклов, каждый из которых разделен на три фазы: восприятие и понимание, внимание, действие и обучение (см. рис. 7). Сложные когнитивные процессы, такие как планирование, обдумывание и решение проблем, могут потребовать нескольких когнитивных циклов.

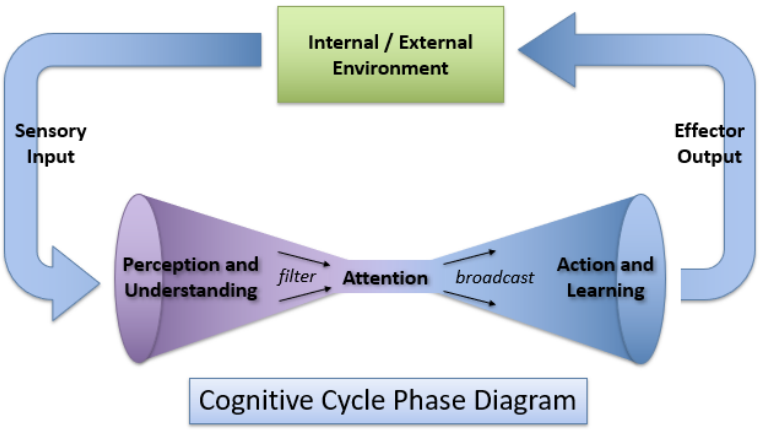

Рис. 5. Фазовая диаграмма когнитивного цикла

Во время каждого когнитивного цикла агент *LIDA* сначала оценивает текущую ситуацию, обновляя представление как о внешних, так и о внутренне генерируемых характеристиках. Это этап восприятия и понимания цикла. Затем, с помощью конкурентного процесса, агент выделяет наиболее требующую внимания ситуацию. Это решение транслируется остальным модулям системы, что делает ее текущим содержанием сознания. Это этап внимания. Содержимое трансляции мобилизует внутренние ресурсы, из которых происходит выбор потенциального действия. Это позволяет обучаться на всем диапазоне доступной памяти. Это этап выбора действия и обучения.

Рис. 6 более подробно иллюстрирует когнитивный цикл *LIDA*. Цикл начинается во время восприятия сенсорных стимулов из источников во внешней и внутренней среде агента, которые интерпретируются в сенсорной памяти (англ. *Sensory Memory*). Детекторы низкоуровневых функций в сенсорной памяти начинают процесс распознавания поступающих стимулов. Затем перцептивная ассоциативная память (англ. *Perceptual Associative Memory*, далее – ПАМ) обрабатывает эти низкоуровневые функции, распознавая особенности более высокого уровня, такие как объекты, категории, отношения, действия, чувства, события, ситуации и т. д. При предсознательном распознавании эти сущности составляют текущее восприятие, которое асинхронно передается в рабочую область (англ. *Workspace*), таким образом предсознательная модель текущей ситуации постоянно обновляется. Это восприятие и элементы из текущей ситуационной модели (англ. *Current Situational Model*, далее – ТСМ) служат для обозначения переходных процессов и декларативных воспоминаний (англ. *Declarative Memory*) (автобиографических и семантических). Содержимое пространственной памяти (англ. *Spatial Memory*) служит для конкретизации событий из эпизодических воспоминаний. В дополнение к текущему восприятию и текущей ситуационной модели, рабочее пространство содержит очередь осознанного содержания (англ. *Conscious Contents Queue*), очередь недавнего содержания сознания [7]. Обновленная версия ТСМ состоит из восприятий, ассоциаций и сохранившихся частей предыдущей модели. Для этого процесса обычно требуются кодлеты (*codelets*) для корректного построения структуры. Вновь собранная модель представляет более полное понимание агентом текущей ситуации в окружающей среде. Это завершает этап понимания данного познавательного цикла.

Примечание. В архитектуре *LIDA* термин «кодлет» (англ. *codelet*) обычно относится к любому небольшому специализированному процессору или работающему фрагменту компьютерного кода. Кодлеты соответствуют процессорам в теории глобального рабочего пространства [6].

Для агента, работающего в сложной, динамически изменяющейся среде, содержимое ТСМ может быть слишком большим, поэтому необходимо определить наиболее важные части ТСМ. Эти части формируют коалиций структур из ТСМ. Такие коалиции образуются кодлетами внимания (англ. *Attention Codelets*), функциональность которых заключается в переносе определенных структур в глобальное рабочее пространство (англ. *Global workspace*). Наиболее важная коалиция транслируется по всей структуре, завершая соответствующий этап цикла. Таким образом, функциональный механизм сознания *LIDA* действует как фильтр внимания.

Хотя содержимое, транслируемое функциональным механизмом сознания, доступно всей структуре, основным получателем является процедурная память (англ. *Procedural Memory*), в которой хранятся шаблоны возможных действий, включая их контекст и возможные результаты. Она также хранит значение активации для каждого такого шаблона, который пытается измерить вероятность того, что действие, предпринятое в его контексте, приведет к ожидаемому результату. Шаблоны, контексты которых в достаточной степени пересекаются с содержанием трансляции функционального механизма сознания, создают копии самих себя, учитывая специфику контекста. Тем не менее, созданные ранее шаблоны остаются доступными для анализа и обрабатываются механизмом выбора действия (англ. *Action Selection*). Затем, выбранное действие поступает в сенсорно-моторную память (англ. *Sensory Motor Memory*), где оно выполняется по соответствующему плану действий (англ. *Motor Plan Execution*). Предпринятые действия влияют на окружающую среду и, таким образом, завершают этап действия и обучения.

В архитектуре *LIDA* вся когнитивная обработка происходит через непрерывную итерацию таких когнитивных циклов. Из-за асинхронного и параллельного характера большинства процессов этапы последовательных когнитивных циклов могут пересекаться: например, этап действия и обучения одного цикла и этап восприятия и понимания следующего цикла могут происходить одновременно. Последовательная природа сознания, необходимая для поддержания стабильной интерпретации окружающего мира, возникает из синхронной работы ГРП. Выбор действий также является синхронным, что позволяет упорядоченно выполнять последовательности действий. За исключением модулей ГРП и механизма выбора действия, все другие модули *LIDA* работают асинхронно, что является одним из принципов *LIDA*.

Для того, чтобы наделить когнитивные вычислительные модели способностью функционировать в реалистичных средах в условиях неопределенности, необходимо рассмотреть вероятностные модели пространственного познания, реализуемые в ГМ. На рис. 8 показан обзор всех используемых методов и реализации на основе них пространственной модели и механизмов.

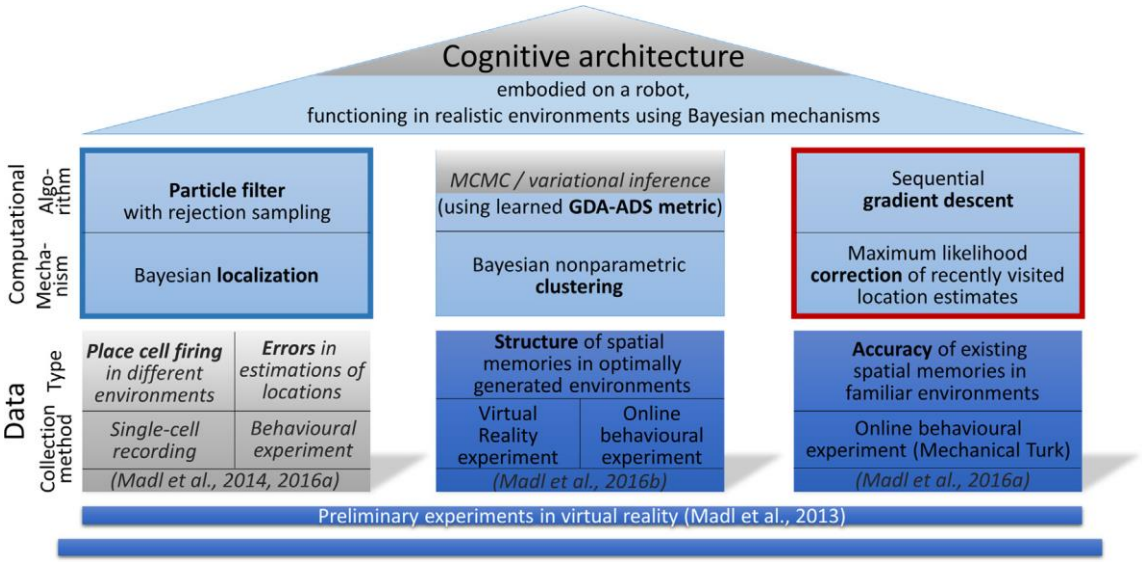

Рис. 6. Когнитивная архитектура робота, функционирующего в реалистичной среде с использованием байесовских механизмов

Для реализации возможности планирования новых путей достижения целей агент (будь то биологический или искусственный), должен обладать способностью определить себя, свою цель и возможные препятствия даже в условиях зашумления. С вероятностной точки зрения эту проблему определения можно описать как байесовскую сеть (см. рис. 8*B*). Во избежание необходимости вычислений для каждого посещенного места и каждого наблюдаемого ориентира, их можно разделить на подгруппы. В частности, в первом приближении решением этой проблемы может быть разделение на:

- применение байесовских сигналов для интеграции зашумленных наблюдений в оценку местоположения;
- байесовскую локализацию для поддержания этого местоположения во времени;
- коррекцию на основе максимального правдоподобия для запоминания последней оценки местоположения при его повторном посещении.

Эти вероятностные модели для определения собственного местоположения и местоположения объектов составляют основу когнитивного программного агента, способного функционировать в реалистичном симуляторе робота. На рис. 9 представлен обзор того, как байесовские механизмы, описанные выше, могут быть реализованы в пространствах соответствующих областей ГМ.

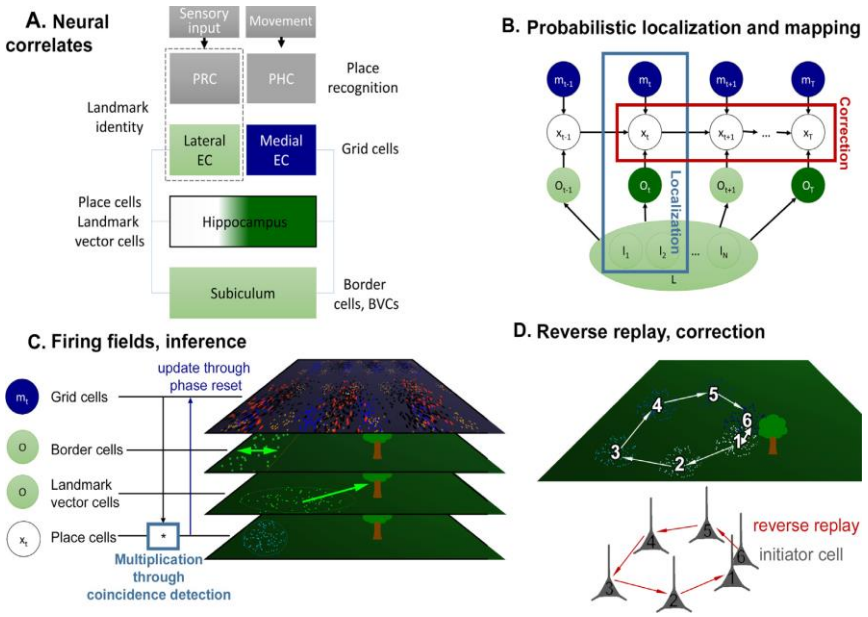

Рис. 7. Вероятностная пространственная локализация и отображение, реализуемое ГМ

На рис. 9*A* представлены нейронные корреляты локализации, где *PRC* – перириналь**ная кора (англ. *Perirhinal cortex*), *PHC* – парагиппокампальная кора (англ. *Parahippocampal cortex*), *EC* — энториналь**ная кора (англ. *Entorhinal cortex*). На рис. 9*B* отображена вероятностная графическая модель проблемы одновременной локализации и отображения. Рис. 9*C* иллюстрирует поля возбуждения нейронов в момент локализации. Цветные точки представляют собой всплески соответствующих нейронов в рецептивных точках. Нейронная решетка, а также информация о нейронах границ и нейронах векторов ориентиров интегрируются в нейроны места при обнаружении совпадений для получения оптимальной оценки местоположения. Эта оценка используется для обновления представлений нейронной решетки посредством обнуления фазы для борьбы с накоплением ошибок интеграции пути. Рис. 9*D* демонстрирует цикл (поля возбуждения нейронов 1–6), данные в котором возможно скорректировать путём распознавания тех же мест в позициях 1–6 с помощью обратного воспроизведения.

Заключение

- Когнитивные вычисления представляют собой набор автономных и перцептивных теорий и технологий обработки знаний, имитирующих механизмы ГМ, выходя за пределы традиционной императивной обработки данных.
- Рассмотрены теоретические основы когнитивных вычислений, а также методы и алгоритмы когнитивных вычислений в когнитивной информатике, мягких вычислениях и вычислительном интеллекте.
- Описан спектр приложений когнитивных вычислений, таких как автономные агентные системы и интеллектуальные поисковые машины.
- Приведен практический пример обучающегося интеллектуального агента принятия решений как реализация когнитивных вычислений.

Список литературы

1. Wang Y. On Abstract Intelligence: Toward a Unifying Theory of Natural, Artificial, Machinable, and Computational Intelligence // Int. J. Softw. Sci. Comput. Intell. 2009. Vol. 1. Pp. 1–17.
2. Wang Y. On Concept Algebra // International Journal of Cognitive Informatics and Natural Intelligence. 2008. Vol. 2. Pp.1–19. DOI:10.4018/jcini.2008040101.
3. Wang Y. On Visual Semantic Algebra (VSA): A Denotational Mathematical Structure for Modeling and Manipulating Visual Objects and Patterns // Int. J. Softw. Sci. Comput. Intell. 2009. Vol 1. Pp. 1–16. DOI: 10.4018/jssci.2009062501.
4. Wang Y. The Real-Time Process Algebra (RTPA) // Annals of Software Engineering. 2002. Vol. 14. Pp.235–274. DOI:10.1023/A:1020561826073.
5. Franklin S., Madl T., D'Mello S., Snaider J. LIDA: A systems-level architecture for cognition, emotion, and learning // IEEE Transactions on Autonomous Mental Development. 2014. Vol. 6. Issue 1. Pp. 19–41. DOI: 10.1109/TAMD.2013.2277589.
6. Baars B.J.A Cognitive Theory of Consciousness. New York : Cambridge University Press, 1988.
7. Franklin S., Madl T., Strain S., Faghihi U., Dong D. et al. LIDA cognitive model tutorial // Biologically Inspired Cognitive Architectures. 2016. Vol. 16. Pp. 105–130. DOI:10.1016/j.bica.2016.04.003.