

# СЛОЖНОСИСТЕМНОЕ МЫШЛЕНИЕ: МУЛЬТИФРАКТАЛЬНАЯ ДИНАМИКА РИТМОКАСКАДОВ АКТИВНОСТИ. МОДЕЛИ И РЕАЛИЗАЦИЯ

УДК 519+61:681.3

**ПРОКОПЧУК Юрий Александрович**

к.ф.-м.н., доцент, с.н.с. отдела системного анализа и проблем управления Института технической механики НАНУ и ГКАУ.

**Научные интересы:** интеллектуальные и когнитивные системы, базы знаний.

**e-mail:** itk3@ukr.net

## ВВЕДЕНИЕ

С конца XX века возникла практическая потребность создавать информационные и информационно-управляющие системы, опираясь на модели и методы, родившиеся в рамках когнитивного подхода. К таким системам относятся партнерские системы, системы смыслопорождения, саморазвивающиеся интеллектуально-рефлексивные среды, когнитивные тренажеры, когнитивная робототехника, «образные» компьютер и Интернет, мультиагентные системы, виртуальные организации и миры. Все эти системы принадлежат к классу «разумных систем» (Smart Systems). Общими для них являются глобальная структура, эволюция, процессы познания и специфика человекомашинного взаимодействия (грин-технологии). Особое внимание уделяется представлению знаний и языку «мышления», а также структурам, обеспечивающим хранение и переработку информации [1 - 22].

Подтверждением резко нарастающей концентрации усилий на когнитивных (информационных) технологиях является начатый в США в 2013 году мегапроект «Картирование мозга» с бюджетом более 3-х миллиардов долларов (показательно, что значительной частью этих средств распоряжается DARPA - Defense Advanced Research Projects Agency). При анонсировании проекта Барак Обама в обращении к согражданам заявил: «Настало время выйти на уровень научных исследований и

разработок, невиданный с момента пика космической гонки... Сейчас не время потрошить инвестиции в науку и инновации... Каждый доллар, который мы вложили в создание карты человеческого генома, вернул по 140 долларов в нашу экономику – каждый доллар!» В 2013 году начат аналогичный Европейский мегапроект под названием «Human Brain Project», бюджет которого составляет более 1 миллиарда евро. Ключевые вопросы проектов: «Как могли бы быть устроены системы, демонстрирующие часть функций, присущих сознанию, и с помощью каких простых моделей это может быть показано?». В результате выполнения проектов планируется создать принципиально новые информационные технологии поддержки решений и управления сложными, большими, сетевыми системами. Как следствие, возможно внезапное появление технологий, позволяющих обеспечить научно-техническое превосходство.

Весьма показательной в этом плане является динамика повышения степени автономности роботов военного назначения, разрабатываемых в США [1]. На период 2008–2014 гг. запланирована разработка и внедрение платформи-центрических автономных роботов наземного базирования, а на период 2014–2020 гг. – основных подсистем автономных роботов для работы в составе сетевых систем (мультиагентных) систем. Причем, к 2022 г. запланировано завершение работ по трем наиболее сложным проблемам: челове-

кошачий интерфейс, планирование поведения и ощущение (восприятие), под которым понимается не набор большого количества разнообразных датчиков, а система автоматического формирования модели окружающей среды. Полную интеграцию всех подсистем и комплексные испытания предполагается завершить к 2024 г. Поиску решений всех трех проблем в значительной степени посвящена и данная статья. Приведенные выше мегапроекты иллюстрируют когнитивную природу современной сложности управления.

Как же природа, общество, человек справляются со сложностью? Как упрощают ее? Часть ответов на эти вопросы дает синергетическая парадигма: эволюционирующие системы, сложность, самоорганизация, неустойчивость, диссипативность (забывание), подчинение одних степеней свободы системы другим (так называемым *параметрам порядка*), режимы с обострением - основные сюжеты синергетики. В аспекте информационных технологий новый вызов связан с так называемой *субъективной самоорганизацией* [2] (на заре синергетики речь шла, прежде всего, о самоорганизации в физических, химических, биологических системах, а также в экономике и социологии, во многом имеющих сходную динамику). Субъективная синергетика имеет дело с самоорганизацией в смысловом (семантическом) пространстве, в чрезвычайно размытом и разномасштабном пространстве образов, рефлексов, набросков, метафор, стратегий, ожиданий, оценок. Считается [2,10], что, несмотря на существенное влияние природных ограничений мыслительных возможностей человека, одна из ключевых способностей человека, позволившая опередить остальные виды – удивительная способность быстро выявлять параметры порядка в разных ситуациях (естественно, отбрасывая лишнее), следить за ними, а также быстро менять поведенческие стратегии в зависимости от них. Также следует отметить высочайшую пластичность мозга как системы управления и нейронный дарвинизм Дж. Эдельмана [7]. Моделированию мозга как *синергетического компьютера* большое внимание уделил основоположник синергетики Герман Хакен [10].

Достаточно ли для описания феноменов мышления синергетической парадигмы? Дэвид Дойч (David Deutsch) [3] считает, что в пределах мультиверса, частью которого является субъективная реальность, необходимо объединить многомировой (квантовый), вычислительный, эпистемологический и эволюционный принципы. Роджер

Пенроуз (Roger Penrose) и его последователи объясняют феномены мышления (сознания) исключительно на основе квантового подхода [4, 5]. Отметим, что в квантовой механике нет возможности одновременно сколь угодно точно измерить координату и импульс микрочастицы. Более того, сама процедура измерения меняет и свойства частицы, и то, что будет измерено. Сходная проблема имеет место и в субъективной самоорганизации: сам факт осмысленного измерения, решения субъектом той или иной когнитивной задачи меняет модель мира, с помощью которой решается данная задача [22]. Как и в квантовой механике, важную роль играют нелокальность и запутанность. Так образ представляется неразделяемой суперпозицией набросков, а на более высоком уровне общности – неразделяемой суперпозицией синдромов (внутренних кодов, олицетворяющих макроквантовую запутанность) [17]. Нейрофизиологи пытаются разрешить проблему синхронизации (склейки) нейронных сетей при формировании образа, основываясь на фундаментальных нелинейных явлениях [6]. Вопросы моделирования мышления в р-адических системах координат рассматриваются в [12].

Краткий анализ подходов показывает, что построение когнитивных моделей с прицелом на информационные приложения следует вести в рамках *парадигмы сложности*, позволяющей объединить все известные фундаментальные принципы, включая фрактальную картину мира и теорию самоорганизованной критичности (отсюда и термин «сложносистемное мышление») [8]. По мнению автора один из аспектов парадигмы сложности, относящийся к субъективной реальности, раскрывает парадигма предельных обобщений (ППО) [17-22]. ППО ориентирует, в частности, на установление *адекватной степени формализации* явления: «недостаточная формализация» приводит к многовариантности (неопределенности) там, где ее не должно быть, а «излишняя формализация» дает единственное развитие там, где возможны многие варианты.

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основными задачами исследования являются:

- выявление и модельное представление специфического способа познания эволюционирующего «познающего субъекта», а также специфического способа организации целенаправленного поведения, деятельности;

- поиск в рамках когнитивного подхода аналога кибернетического оптимального управления, формулировка и конкретизация экстремального принципа в теории поведения;
- адаптация выявленных структур и процессов для использования в информационных приложениях и системах управления.

### РИТМОКАСКАДЫ АКТИВНОСТИ НА ОНТОГЕНЕТИЧЕСКОМ УРОВНЕ

Элементарным тестом называются произвольные модальности, характеристики, категории, свойства, качества, радикал, квалиа (qualia), признаки явлений действительности и субъективной реальности. Тесты отвечают за первичное различие (коды-различения). Любой тест может принимать определенные значения. Под значениями понимаются как собственно значения, а также коды, метки, пейсмекеры, ссылки, указатели на комплексные структуры и процессы. Множество значений теста  $\tau$  обозначим  $\{\tau\}$ . Множество значений теста  $\tau$  с обобщающими связями в декогерентном представлении называется оргграфом значений и обозначается [18]

$$Gv(\tau) = \{a \rightarrow_e b\}_{\tau}, \quad (1)$$

где  $a, b$  – значения теста ( $b$  обобщает  $a$ ;  $a$  детализирует  $b$ );  $e$  – структурная энергия. В рамках оргграфа имеет место суперпозиция всех значений теста  $\tau$ . Фундаментальная триада  $(a \rightarrow_e b)$ , реализуя сильные связи, является простейшим системопаттерном и базовым конструктором смысла (различием).

В рекогерентном представлении триады  $(a \rightarrow_e b)$  могут быть нежесткими, а «мерцающими», что приводит к макроквантовым эффектам [19]. Пример оргграфа значений  $Gv(\text{Тест})$  с мерцающими связями (пунктирные линии) показан на рис. 1 (связи некоторых значений для наглядности опущены). В квантовой информатике подобные мерцающие связи ассоциируются с кубитом (квантовое обобщение бита). Ниже будет приведен конфигурактор данного оргграфа (в формате оргграфа доменов).

Если мерцание происходит между двумя значениями  $b$  и  $c$ , то триада преобразуется к виду  $(a \rightarrow_e b | c)$ . В общем случае, выражение (1) принимает вид

$$Gv(\tau) = \{a \rightarrow_e b | \dots | c\}_{\tau}, \quad (2)$$

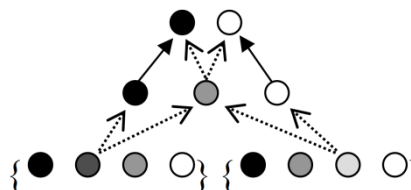


Рисунок 1 – Пример «мерцающих» связей в оргграфе

Отметим, что в рекогерентном представлении не только связи, но и каждое значение можно рассматривать как кубит [19]. В работе [18] введено понятие конуса обобщения  $Gv^{\uparrow}(\tau)$  для произвольного значения  $\tau$ . Конус обобщения можно трактовать как макроквантовую суперпозицию активности всех значений конуса.

Оргграфы значений дуалистичны – будучи материальными, они же работают как источники физических полей. Так, если триада  $(a \rightarrow_e b)$  проводит активность только в прямом направлении, то генерируется импульс-солитон – одиночный «нервный» импульс. Активный оргграф значений (и набросков), следовательно, есть многоликое семейство солитонов (метафора – «оргграф-оркестр»). Функции таких солитонов могут выступать как способы регуляции знаковых взаимодействий в рамках виртуальной сплошной среды (ВСС). Этот механизм «запоминает» последовательность значений тестов (как например, нуклеотидов в гене) и может, вероятно, передавать информацию об этом дистантно. Без дальней (волновой) миграции сигнала невозможна реализация ассоциативно-контекстных регуляций синтеза набросков образов. Здесь необходима волновая континуальность.

Триада  $(a \rightarrow_e b)$  может быть также вихрем (рис. 2а, связка: обобщение – детализация – обобщение) или элементарным когнитивным (рефлексивным) осциллятором – ЭКО (рис. 2б).

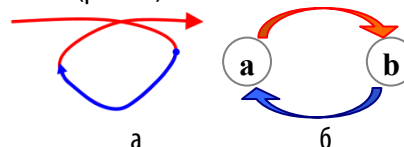


Рисунок 2 – Вихрь и элементарный когнитивный осциллятор  
а – вихрь; б – когнитивный осциллятор

Верхняя стрелка символизирует обобщение, а обратная нижняя – детализацию. Верхняя стрелка есть

всегда, а нижняя стрелка может отсутствовать (вариант солитона). Собственно солитоны, вихри и ЭКО являются теми кирпичиками (атомами), которые лежат в основе формирования многих когнитивных структур и процессов, включая рефлексивные процессы. ЭКО является примером нового типа обратной связи в когнитивных системах. На рис. 3. показано возможное склеивание (иерархическая синхронизация) двух ЭКО. Подобное слияние образует *цепочки значений* (цепочки знаков, символов), которые играют самостоятельную роль, обнаруживая сходство с фрактальной структурой ДНК. Такие знаковые структуры превращаются в *солитонные модулированные поля*.

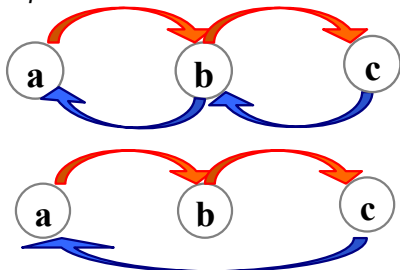


Рисунок 3 – «Склеивание» или синхронизация двух последовательных ЭКО

В общем случае на базе орграфа значений путем синхронизации активности могут возникать сколь угодно сложные ритмокаскады, аттракторы (например, «бугорковые» аттракторы в нервной системе), группы солитонов, вихрей и ЭКО (рис. 4 и рис. 5).

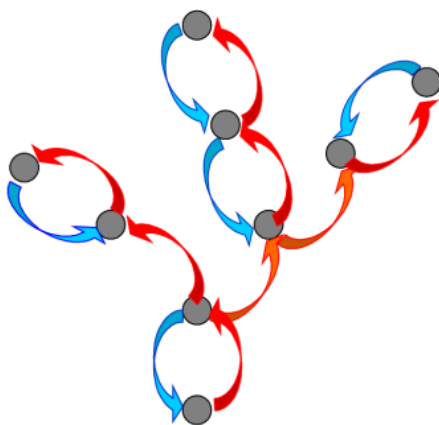


Рисунок 4 – Возбуждение солитонов, вихрей и ЭКО на орграфе

На рис. 4 показаны как солитоны (фронты и солитонные пакеты, «бегущий фронт», «бегущие импульсы»), так и ЭКО. Некоторый ЭКО может выступать при восприятии (моделировании) конкретной ситуации в

качестве фиксированного базового ритма-водителя. Активность, показанная на рис. 5, представляет собой динамическое ядро [21], которое может существовать относительно долго, что важно для синхронизации с ЭКО других орграфов.

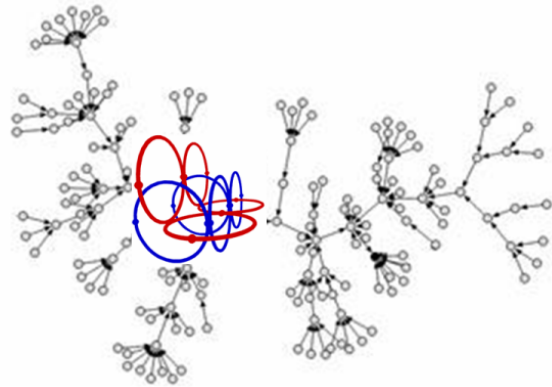


Рисунок 5 – Множественные контуры активности на базе орграфа значений

Поскольку значение – это своего рода атом когнитивной системы, перечислим основные способы активизации значения:

- точечная передача активности: триада (a →<sub>e</sub> b);
- метаболизм в рамках интеллектуальной материи (ВСС);
- механизм синхронизации на основе распределенного поля;
- макроквантовое запутывание кубитов-значений: (τ, ¬τ).

Три последних способа до настоящего времени не реализованы в существующих вычислительных структурах. Таким образом, ВСС обеспечивает процессы метаболизма, механизмы синхронизации, нелокальной передачи структурной энергии и, соответственно, информации между орграфами значений. ВСС присущи основные дуализмы: локальное – нелокальное, реактивное – активное, дискретное – непрерывное, детерминированное – случайное.

В работах [17, 18] введена сущность *орграф набросков*:

$$Gs(W) = \{P \rightarrow_e P'\}_w, \quad (3)$$

где  $W$  – произвольное явление действительности, образ;  $P, P'$  – наброски;  $e$  – структурная энергия (проводимость связи). Причем  $|I(P')| < |I(P)|$ , где

$I$  – оператор вычисления информации (происходит диссипация информации). Триады  $(P \rightarrow_e P')$ , как и триады  $(a \rightarrow_e b)$ , могут быть жесткими, а «мерцающими» (квантовыми), что приводит к рекогерентности или макроквантовым эффектам [19]. Рекогерентное обобщение выражения (3) может быть представлено следующим образом:

$$Gs(W) = \{P \rightarrow_e Q \mid \dots \mid Q'\}_W, \quad (4)$$

где  $P, Q, Q'$  – наброски. Наряду с фундаментальной триадой  $(a \rightarrow_e b)$  элементарные акты означивания  $(\{a\} \rightarrow_e \{b\})$ ,  $(P \rightarrow_e p)$  или  $(P \rightarrow_e P')$  являются базовым конструктом смыслопорождения и текстопорождения. Рекогерентную модель ВСС в целом можно интерпретировать как «Принцип квантовой внутренней модели» (Quantum Internal Model Principle).

В работах [17, 18] введена также сущность *орграф доменов теста*  $\tau$ :

$$G(\tau) = \{T \rightarrow_e T'\}_\tau, \quad (5)$$

где  $e$  – структурная энергия (проводимость связи). Для фиксации того, что в качестве множества результатов теста  $\tau$  используется домен  $T$ , применяется нотация:  $\tau / T$ . Орграф доменов является одновременно орграфом значений и орграфом набросков. Он представляет собой адаптацию орграфа значений для применения в информационных технологиях. Орграфы доменов также как орграфы значений и орграфы набросков могут иметь квантово-семантическое представление ( $QS$ -формат). Так конфигуратор  $QS$ -орграфа  $G(Test)$ , который изображен на рис. 1, имеет вид [19]:

$$\begin{aligned} Test \{ \\ D1 \{Черный \wedge 1 \frac{1}{2}; Белый \wedge 0 \frac{1}{2}\} \\ D2 \# D3 D4 \{Черный \wedge 1 \frac{3}{4}; Серый \wedge \frac{1}{2} \frac{3}{4} \frac{1}{4}; Белый \wedge 0 \frac{1}{4}\} \\ D3 \# \{Черный \wedge 1; Темно серый \wedge \frac{3}{4}; Серый \wedge \frac{1}{2}; Белый \wedge 0\} \\ D4 \{Черный \wedge 1; Серый \wedge \frac{1}{2}; Светло серый \wedge \frac{1}{4}; Белый \wedge 0\} \\ G(Test) = \{D3 \rightarrow D2; D4 \rightarrow D2; D2 \rightarrow D1\}. \end{aligned}$$

При декогеренции орграф  $G(Test)$  переходит в смесь из 8 обычных орграфов-близнецов ( $8 = 2^3$ ).

Любые преобразования, движения, вывод, импульсы, вычислительные модели в системе координат  $\{Gv(\tau)\}$  или  $\{G(\tau)\}$  можно описать с помощью *динамических системопаттернов* (или просто системопат-

тернов) вида [17]:

$$f / \mu: \{a / A\}, e / E \rightarrow \{b / B\}, \mu \in \{\mu\}_f, \quad (6)$$

где  $\{a / A\}$  – входные тесты;  $\{b / B\}$  – выходные тесты;  $e / E$  – требуемая структурная энергия, ресурсы;  $\mu$  – механизм реализации. Важно отметить, что системопаттерн может быть как активным, так и реактивным. Любой системопаттерн может реализовать агент или группа агентов (рой, стая, колония).

Любая триада  $(a \rightarrow_e b)$ ,  $(P \rightarrow_e P')$ ,  $(T \rightarrow_e T')$ , являясь частным случаем системопаттерна  $f / \mu$ , может генерировать солитон, вихрь, осцилляторное рефлексивное звено – рефлексивную петлю, индукционный контур на соответствующем уровне общности. В этом проявляется интегральный принцип рекурсивности – соотносимость знания с самим собой (знание начинает взаимодействовать само с собой). На рис. 2б и рис. 6 показаны масштабируемые осцилляторы, на базе которых могут возникать произвольные динамические структуры, ритмокаскады активности в рамках орграфов значений, набросков, доменов и в целом – в рамках ВСС. Важные примеры мультифрактальных структур рассмотрены в [21], а именно: динамические ядра, спиральная когнитивная метадинамика (СКД).

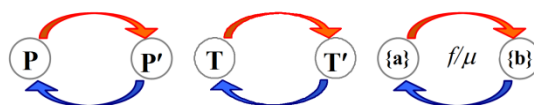


Рисунок 6 – Масштабируемые когнитивные и когнитивно-поведенческие осцилляторы

На каждом иерархическом, квазизамкнутом уровне осцилляторы могут задавать автоколебательные эндогенные ритмо-вводители (говоря синергетическим языком — параметры порядка), которые универсальным образом порождают богатый спектр эндогенных внутренних ритмов системы. Таким образом, законы холизма, законы самосборки реальности не локальны ни в пространстве, ни во времени, но функционально самоподобны на разных масштабах.

Концепция орграфов значений, доменов и набросков, системопаттернов указывает на то, что в рамках ВСС действуют глобальные холистические пространственно-временные законы, в частности два фундаментальных холистических механизма связности Универсума [13]. Первый механизм опосредован динамиче-

ским хаосом в нелинейных системах и заключается в возможности синергетической синхронизации слабо связанных, удаленных нелинейных систем [6] (в нашем случае – когнитивных осцилляторов разного уровня общности). Второй механизм основан на существовании макроквантовых корреляций - Принцип квантовой внутренней модели (ПКВМ). Паттерны в орграфах задают третий механизм (сильной) связи.

Рассмотрим вопрос существования экстремально-го принципа в теории поведения, основываясь на ППО, СКД, функциональном дарвинизме, гомеостатическом подходе, синдромном принципе управления (СПУ) [17, 21] в сочетании с мультифрактальным ритмокаскадом активности (МРА), включая фрактальное время.

**ППО, СКД, СПУ и ритмокаскады активности.**

Для анализа и синтеза поведения важную роль играет концепция Z-задач, где  $Z = \{1, \dots, N\}$  – множество заключений (различий, образов, диагнозов, прогнозов, управлений). Z-задачи вместе с другими тестами формализуют акты различения (дифференциации). *Акт различения* – это системоквант “мысле-действия” когнитивной системы, базовая функция наблюдателя, поэтому мыслительный многоконтурный процесс можно свести к замкнутым циклам трансформ различений, превращений одних различений в другие. Для решения той или иной когнитивной задачи (Z-задачи) формируется множество прецедентов с известными исходами  $\Omega = \{\alpha(\{z/T\}, z/Z)\}$ , где Z – множество заключений;  $\alpha$  – прецеденты;  $\{z/T\}$  – множество значений тестов. Множество Z является базовым доменом z-теста с орграфом  $G(z)$ . Z-задачи образуют Z-поток.

Когнитивная самоорганизация в рамках контекста  $K = \langle \Omega(Z), \{G(z)\}, G(z) \rangle$  позволяет установить полное множество предельных синдромов  $\{S^*\}_{Full}$ . Математическая модель когнитивной самоорганизации в рамках каждого слоя познания СКД приведена в [21]. Любой синдром имеет вид:  $S = (\{a/A\} \rightarrow z/Z)$ , где  $z/Z$  – заключение. Предельный синдром нельзя ни редуцировать, ни обобщить.

Пусть фиксирована Z-задача и выбрана цель  $z/Z$ , которую необходимо достичь. В рамках синдромного принципа управления для организации целенаправленного поведения используются предельные синдромы, выступающие в качестве параметров порядка [22].

Под управлением понимается выбор целевого множества синдромов из  $\{S^*\}_{Full}$  и его достижение с помощью когнитивно-поведенческих системопаттернов, формирующих системоквант. Раскроем данную схему.

Предельные синдромы  $S^*$  обеспечивают как максимальную (предельную) наблюдаемость в задаче различения, так и максимальную управляемость. Степень управляемости ( $Dc$  - Degree of controllability) синдрома  $S(\{z/T\}, z/Z)$  определяется минимальной степенью (субъективной) управляемости всех входящих тестов (степенью достижимости целевых значений), а именно:

$$Dc(S) = \min_{\tau \in S} \{Dc(\tau/T)\}. \tag{7}$$

Выбор целевых синдромов по критерию максимальной (субъективной) управляемости происходит в соответствии с выражением

Дано  $\{S\}, \{R\}$   $\{S\}_U = \arg \max_{S \in \{S\}} (\min_{\tau \in S} \{Dc(\tau/T)\}). \tag{8}$

На практике  $Dc(\tau/T)$  можно оценивать, например, в баллах от 0 до 10. Наряду с синдромами могут учитываться вероятностные закономерности или предвестники  $\{R\}$  [17]. Исходное множество  $\{S\} \cup \{R\}$  представляет собой некоторую функциональную систему (ФС). Пример программной ФС для оценки течения постинфарктного периода показан на рис. 7 [17]: синдромы расположены по окружности, показаны связи между синдромами (связи задают автоматизмы в передачи активности).

Покажем, что на основе (8) формируется мультифрактальная структура управления активностью познающего субъекта/агента. Данная структура представляет собой *иерархию параметров порядка*.

Введем следующие обозначения:  $\{S\}_U \cup \{R\}_U \equiv \{z/T\}_U = \{a/A, b/B, \dots, x/X\}_U$ . Целевые значения достигаются с помощью системопаттернов:  $f_a/\mu_a: -a/A \rightarrow a/A; f_b/\mu_b: -b/B \rightarrow b/B; \dots; f_x/\mu_x: -x/X \rightarrow x/X$ . Системопаттерны уровня Z-задачи обозначим  $F_z = \{f/\mu\} = \{f_a/\mu_a; f_b/\mu_b; \dots; f_x/\mu_x\}$ . Необходимо найти механизмы  $\mu_a, \mu_b, \dots, \mu_x$ .

*Примечание.* СПУ предполагает также стабилизацию уже достигнутых целевых значений тестов. Стабилизация осуществляется за счет устранения «плохих» предвестников  $\{R\}$  [17].

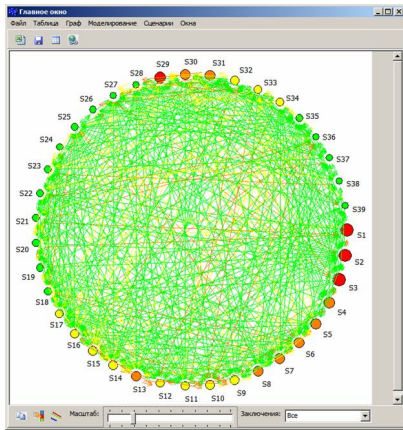


Рисунок 7 – ФС для оценки течения заболевания

Каждая оппозиция  $\{a/A; -a/A\}, \{b/B; -b/B\}, \dots, \{x/X; -x/X\}$  автоматически формирует новую Z-задачу, а именно:

$$Z_a = \{a/A; -a/A\}; \dots; Z_x = \{x/X; -x/X\}. \quad (9)$$

Для каждой новой Z-задачи формируется своя база прецедентов, свое предельное множество синдромов (путем самоорганизующейся критичности), с помощью (8) находится свое множество целевых синдромов (и предвестников) и соответствующее множество исполнительных системопаттернов. Описанный процесс можно проиллюстрировать следующими схемами:

$$\begin{aligned} Z_a &\Rightarrow \Omega(Z_a) \Rightarrow \{S^i\}_{Z_a} \Rightarrow F_{Z_a}; \\ ; Z_x &\Rightarrow \Omega(Z_x) \Rightarrow \{S^i\}_{Z_x} \Rightarrow F_{Z_x}. \end{aligned} \quad (10)$$

Функциональная система  $F_{Z_a}$  детализирует механизм  $\mu_a$  паттерна  $f_a$  и т.д. Далее процесс повторяется на новом уровне детализации и так до бесконечности. Важно отметить, что совокупность оценок  $Dc(\underline{a}/T)$  в рамках каждой Z-задачи своя и более того в разные моменты времени может быть разной (зависит, в частности от эмоций). Ясно, что схема (10) характерна для периода обучения, т.е. когда субъект впервые сталкивается с такой задачей. При повторном решении задач схемы становятся автоматизмами.

Итоговый ритмокаскад Z-задачи назовем Z-Stream (рис. 8). Противоречия внутри Z-Stream снимаются в период развертывания за счет фрактальности времени (детализация ниже). Представленный ритмокаскад полностью отвечает концепции СКД: развертывание структуры управления (решения) идет от верхних уровней познания к нижним.

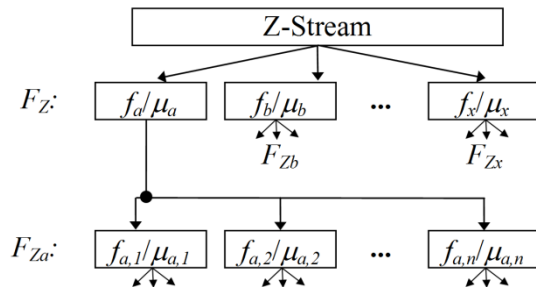


Рисунок 8 – Ритмокаскад активности в рамках Z-Stream

Количество исполнительных системопаттернов Z-задачи определяется величиной  $|\{\underline{a}/T\}_v|_z$ . Если данная величина постоянна для всех узлов ритмокаскада, то ритмокаскад будет иметь вид p-адического дерева (пример 2-адического ритмокаскада для целевого значения  $\underline{a}$  показан на рис. 9). Модели мышления на основе p-адических деревьев исследуются в [12].

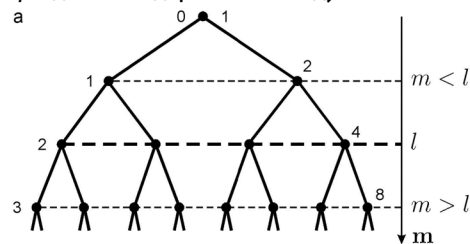


Рисунок 9 – p-адический ритмокаскад  $Z_a$ -Stream

В общем случае ритмокаскад имеет вид стохастического дерева Кейли. Пример такого ритмокаскада для целевого значения  $\underline{a}$  показан на рис. 10.

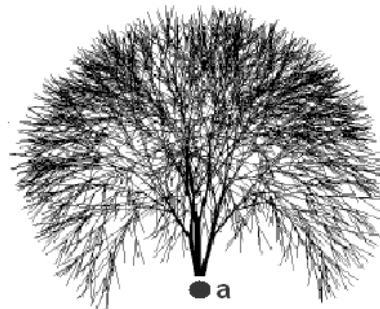


Рисунок 10 – Пример стохастического ритмокаскада

Системоквант и системопаттерн, включая синдром, обладают свойством *сильной антиципации* (представление о результате того или иного процесса, возникающее до его реального достижения и служащее средством обратной связи при построении действия). В

самом общем плане антиципация трактуется как способность агента действовать и принимать конкретные решения с определенным временно-пространственным упреждением в отношении ожидаемых, будущих событий. Антиципацию следует рассматривать как частный случай, как одну из форм более широкого, родового по отношению к ней понятия «опережающего отражения», предложенного П. К. Анохиным. Представленная выше концепция «разумных решений» показывает, что процессы антиципации, активного прогнозирования оказываются включенными практически во все структурные компоненты организации поведения, выступая в качестве необходимого условия формирования цели деятельности, ее планирования, постановки задач и определения адекватного состава действий. Другими словами антиципация раскрывается как специфический когнитивно-регуляторный процесс, в основе которого лежат интегральные механизмы работы естественного и искусственного «мозга» (ППО, СКД, СПУ, МРА, ПКВМ, функциональный дарвинизм, гомеостаз и т.д.).

### ГОМЕОСТАТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РАЗВЕРТЫВАНИЮ РИТМОКАСКАДА

Развертывание во времени любого системокванта активности определяется в соответствии с гомеостатической концепцией (текущего наличия ресурсов/энергии и эмоций). Механизм субъективного выбора (8) определяет только структуру системокванта. В наихудшем случае с точки зрения ресурсов реализуется подвижное управление. При избытке ресурсов могут быть запущены все системопаттерны ФС (радикалы-агенты) одновременно.

На рис. 11 показан пример *критического пути* в ФС (коды агентов/радикалов расположены на окружности с указанием связей): имеется две основных группы радикалов/агентов (группы выделены темными-красными кругами), каждая из которых ситуативно запускается первой. Чаще всего группа одна. Критический путь детализирует модель «собственного поведения» Гейнца фон Фёрстера в рамках ФС (сама ФС также является следствием этой модели [22]). Результатом является высокая пластичность ФС: если основные группы радикалов/агентов не решают задачу, то согласно связям и имеющимся ресурсам (законам гомео-

статики) запускаются остальные радикалы ФС.

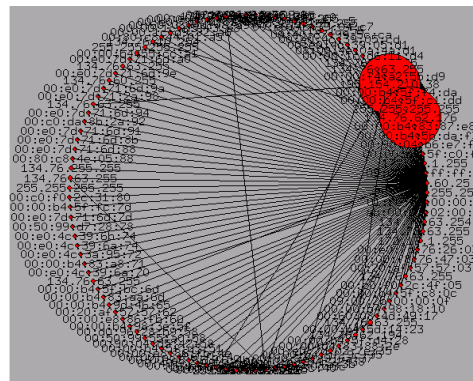


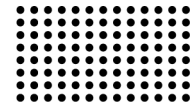
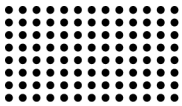
Рисунок 11 – Пример «критического пути» в ФС

Действительно, помимо умения выделять параметры порядка специалист-профессионал демонстрирует огромное разнообразие активностей при решении одной и той же задачи. В силу большой избыточности профессиональных возможностей имеет место высокая стабильность в ситуации свободного выбора, в сочетании со способностью к быстрой реорганизации в условиях любого воздействия, затрудняющего достижение результата. Подобная способность характерна и для большинства функциональных систем организма когнитивно-поведенческого уровня. Рисунок 11 иллюстрирует такую способность.

Механизм критических путей позволяет резко снизить размерность задачи управления в стандартных ситуациях управления (при отсутствии нештатных ситуаций). Вместе с тем, несмотря на наличие критических путей, ФС в целом благодаря пластичности и избыточности (Multy-Version Computing) реализует алгоритм контроля отказоустойчивости. Таким образом, обеспечивается решение двух на первый взгляд противоречивых задач. Следовательно, на основе концепции иерархии ФС и гомеостатики может быть дано конструктивное определение термина «отказоустойчивость» интеллектуальных систем.

Системоквант из одновременно работающих ФС в рамках ВСС показан на рис. 12. Каждая ФС изображена серым кругом (множество радикалов, агентов, системопаттернов), в центре которого расположен пейскекер – запускающий нейрон [17]. Степень активности той или иной ФС отображается цветом пейскекера (черный цвет – ФС неактивна). ФС или *процессоры* мо-





гут розглядатися як малі автономні бессознательные системи, кожна з яких керує окремою функцією.

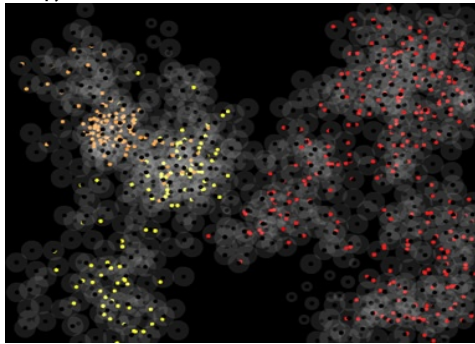


Рисунок 12 – Ілюстрація кадра активності ВСС

Ієрархія серед радикалів або ФС обумовлює мультифрактальну природу їх реалізації.

Проілюструємо додатково гомеостатичний ефект в активності ФС або серед радикалів. На рис. 13 показано приклад динаміки розгортання в часі системокванта Z-Stream (загальнення нейрофізіологічної моделі [16]). По вертикальній осі відкладено умовні номери радикалів, агентів, по горизонтальній осі – час.

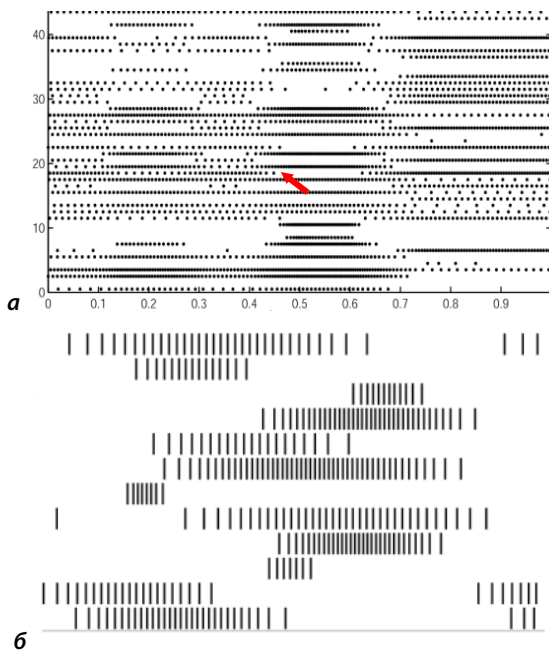


Рисунок 13 – Приклад розгортання в часі системокванта Z-Stream  
а – первичний системоквант; б – системоквант виділений стрілкою фрагмента системопатерна

На рис. 14 показано часову залежність загальної енергії системокванта  $E(t)$ , яка впливає на гомеостаз працюючої ФС (рис. 13а) як параметр порядку. Візуально видно кореляція активності з  $E(t)$ .

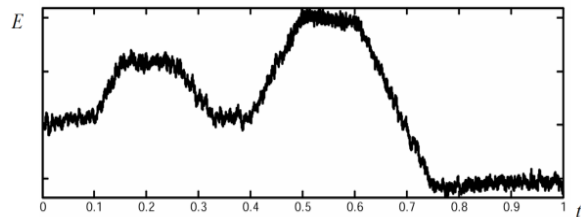


Рисунок 14 – Приклад залежності загальної енергії системокванта від часу

Приведений приклад ілюструє *фрактальність в часі* («дырявость», квантованість, самоподібність на будь-якому масштабі) виконання будь-якого системокванта. Фрактальність, як часового ряду розгортання, так і по рівнях для будь-якого системопатерну пояснюється функціональним самоподібністю ітерацій його побудови та реалізації. Дійсно, в усіх вікнах доступу незалежно від рівня вистраиваються ізоморфні фрагменти ритмокаскадних дерев. В такому випадку, при наявності нескінченного числа ієрархічних рівнів система управління «вирощує» мультифрактальний темпоральний об'єкт – повне дерево ритмокаскадів активності поточного системокванта. Слід зауважити, що крім ресурсів в процес визначення структури та розгортання системокванта (переключення активності) суттєвий внесок вносять емоції.

### ЦЕЛЕПОЛАГАННЯ В МОДЕЛІ ДІЯЛЬНОСТІ

В роботі [20] приведена *когнітивна модель діяльності*, яка деталізує описану вище схему застосовно до довільної діяльності (найбільш складному виду поведінки). Для уточнення механізму формування списку цілей-потребностей  $\{z/Z\}$  і механізму гомеостазу розглянемо верхній рівень цілеполагання.

Нехай  $Z(t) = \{z/Z\}_t$  – список фокусів уваги, інтересів, мотивів, цілей, завдань, потребностей (кратко – цілей) з вказанням домену. Домен  $Z$  у кожній цілі свої. Одні цілі можуть бути досягнуті за секунди або години, інші – за місяці або навіть роки. Системоквант

целей-задач формируется следующим образом:

$$Z(t_z + 1) = Z(t_z) \setminus D_z(t_z + 1) \cup A_z(t_z + 1), \quad (11)$$

$$D_z(t_z + 1) \& A_z(t_z + 1) = \text{argopt}_{Z(t)} K_z(t_z + 1), \quad (12)$$

$$E_z(t + 1) = \text{Fun}(E_z(t), \{V(t)\}, M(t)), \quad (13)$$

Циклически:  $\text{Ref}(Z(t) \vee Z'(t));$

$$K_z(t) \vee K'_z(t) \rightarrow Z(t), K_z(t)?, \quad (14)$$

где  $Z(t) = \{z/Z\}_t$  – список актуальных фокусов внимания, интересов, мотивов, целей, задач, потребностей с указанием домена;  $Z'(t)$  – список альтернативных или отклоненных на данный момент целей, задач, потребностей;

$(t_z, t_z + 1)$  – интервал постоянства системокванта  $Z(t_z)$ , шаг переменный;  $t_z$  – индекс интервала (индекс «z» означает, что время масштаба управления задачами);  $t$  – астрономическое время;

$D_z$  – список удаляемых целей-задач-фокусов («прерванные» по причине нехватки ресурсов задачи переходят из активной фазы решения в пассивную фазу);

$A_z$  – список добавляемых целей-задач-фокусов;

$K_z$  – принцип субоптимальности (рациональности) в момент  $(t_z + 1)$  с учетом суперпозиции целей-задач и параметра порядка  $E_z(t)$ ;  $K'_z$  – альтернативный принцип субоптимальности, который отклонен в данный момент;

$E_z$  – главный параметр порядка, задает общую энергию (текущие доступные ресурсы), которая распределяется по разным целям-задачам (коррелирует с психической напряженностью); зависит как от экономии ресурсов, так и от притока внешних ресурсов;

$\{V(t)\}$  – факторы внешней среды (могут меняться как непрерывно, так и скачкообразно); отдельные факторы могут характеризовать доступность тех или иных видов ресурсов (людских, вычислительных и т.п.);

$M$  – внимание, мотивация и эмоциональная компонента (повышенный эмоциональный уровень и хорошая мотивация помогают при решении когнитивных задач, запоминании);

$\text{Ref}()$  – циклический оператор рефлексии (автомониторинг), который основан на переживаниях субъекта относительно правильности выбора принципа субоптимальности и задач текущего системокванта.

Ясно, что  $D_z(t_z + 1) \subseteq Z(t_z)$ , так как удаляемые цели принадлежат списку текущих целей. Момент  $(t_z + 1)$  может наступить, как прогнозируемо (по плану), так и неожидан-

но в связи с изменившимися внутренними и внешними потребностями и обстоятельствами. Если момент времени  $(t_z + 1)$  запланирован, то на уровне целеполагания имеем управление с фиксированным правым концом. Список целей может быть противоречивым.

Согласованное формирование  $D_z(t_z + 1)$  и  $A_z(t_z + 1)$  в рамках принципа оптимальности  $K_z$  может определяться следующими критериями: МАХ безопасности жизнедеятельности; МАХ функциональной устойчивости; МАХ длительности жизненного цикла; МАХ первенства в приоритетных направлениях (наука, экономика); МАХ коммуникаций (научных, творческих, социальных); МАХ положительных эмоций.

Приведем пример. Пусть периодограммы жизненных циклов трех задач соответствуют тем, что показаны на рис. 15.

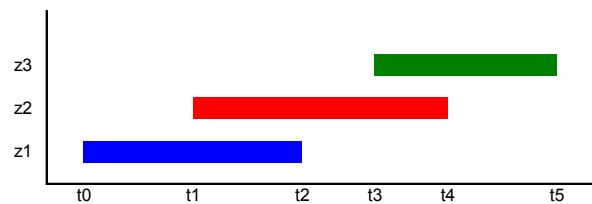


Рисунок 15 – Периодограммы задач

Соответствующие системокванты целей-задач будут иметь вид:

$$Z(t_0) = \{z_1\} \text{ на интервале } [t_0, t_1);$$

$$Z(t_1) = \{z_1, z_2\} \text{ на интервале } [t_1, t_2);$$

$$Z(t_2) = \{z_2\} \text{ на интервале } (t_2, t_3);$$

$$Z(t_3) = \{z_2, z_3\} \text{ на интервале } [t_3, t_4);$$

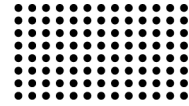
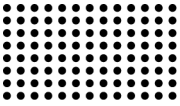
$$Z(t_4) = \{z_3\} \text{ на интервале } (t_4, t_5].$$

Последовательность смены системоквантов целей-задач-фокусов отображается цепочкой:

$$Z(t_0) \rightarrow Z(t_1) \rightarrow Z(t_2) \rightarrow Z(t_3) \rightarrow Z(t_4).$$

Оператор рефлексии нацеливает на перманентное переосмысление всех механизмов принятия решений. Таким образом, он является ключевым элементом мета-когнитивных технологий. Действие оператора рефлексии может привести к смене системокванта, а также изменению интенсивностей решения задач.

Каждой цели  $z \in Z(t)$  соответствует энергия  $e_z(t)$  или интенсивность решения задачи. Интенсивность рефлексии обозначим  $e_{ref}(t)$ . Интенсивность пропорциональна выделяемым ресурсам всех видов и является локальным параметром порядка цели-задачи. Управ-



ляя интенсивностями можно снять противоречия между различными задачами. Другими словами, между интенсивностями – локальными параметрами порядка – существуют взаимотормозные связи и они чрезвычайно важны, они определяют все наше поведение. Потребуем выполнения следующих ограничений ( $t$  – астрономическое время):

$$\forall z \in Z(t_z), \forall t \in (t_z, t_z + 1), e_z(t) > 0;$$

$$\forall z \notin Z(t_z), \forall t \in (t_z, t_z + 1), e_z(t) = 0; \quad (15)$$

$$\sum_{z \in Z(t)} e_z(t) + e_{ref}(t) \leq E_z(t); \forall t, E_z(t) > 0, \quad (16)$$

где  $E_z(t)$  задает общие текущие доступные ресурсы (энергию) в момент времени  $t$ . Суть условия (15) состоит в том, что любая задача, которая включена в системоквант, требует выделения ненулевой энергии на сопровождение. Любая задача, которая не включена в системоквант, имеет нулевую интенсивность. Условие (16) означает ограниченность доступных ресурсов и является основой гомеостаза. Непредвиденное снижение или рост  $E_z(t)$  может повлечь за собой смену системокванта целей. Условия (15) и (16) означают также, что список «зависших задач» (энергии для решения которых недостаточно, но субъект держит их в фокусе внимания) не может быть большим. Представленная модель допускает стохастичность выбора целей.

Опишем один из вариантов согласования текущих интенсивностей решения задач (гомеостаза). В основе данного варианта лежит предположение, что величина взаимной информации между условиями среды и реакциями системы является объективной мерой адаптации системы [15]. Взаимная информация между любыми двумя переменными  $x$  и  $y$  определяется выражением:

$$I(x, y) = \log [p(x/y) / p(x)] = I = \log [p(x, y) / p(x) \cdot p(y)], \quad (17)$$

где  $p(x)$  и  $p(y)$  – вероятности значений  $x$  и  $y$ ;  $p(x/y)$  – условная вероятность события  $x$  при условии наступления события  $y$ ;  $p(x, y)$  – вероятность сочетания значений  $x$  и  $y$ . Это выражение имеет достаточно ясный физический смысл: если событие (условие)  $y$  повышает вероятность события  $x$  (так, что  $p(x/y)$  больше  $p(x)$ ), то значит между событиями  $x$  и  $y$  есть связь. И мерой этой связи служит взаимная информация  $I(x, y)$ .

*Принцип информационной согласованности.* Будем считать, что в любой момент времени  $t$  в рамках текущего системокванта  $Z(t)$  система, как правило,

выбирает такие реакции  $r(t)$ , которые обеспечивают условную максимизацию средней взаимной информации между системой и условиями среды («стимулами»)  $x(t)$ :

$$\forall t, \forall x(t) \in X, \sum_r p(r/x) \cdot \log [p(r/x) / p(r)] \rightarrow \max, \quad (18)$$

при ограничении

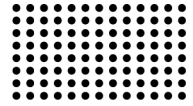
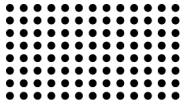
$$\sum_r p(x, r) \cdot e(x, r) = \sum_{z \in Z(t)} e_z(t) + e_{ref}(t) \leq E_z(t), \quad (19)$$

где  $e(x, r)$  – энергия или интенсивность в состоянии  $(x, r)$ . Множество всех реакций системы  $\{r(t)\}$  распределяется по всем задачам системокванта  $Z(t)$ . На следующих уровнях управления (уровнях ритмокаскада) состав  $\{r(t)\}$  будет уточняться и детализироваться [20]. Выражения (18) – (19), а также мультиагентная самоорганизация и функциональный дарвинизм в значительной мере и определяют фрактальность («дырявость») времени реализации каждого системопаттерна. Принцип информационной согласованности дополняет обойму экстремальных принципов, формирующих поведение и деятельность.

Описанный в работе подход можно трактовать как «разумные решения» (Smart Solutions). Основная гипотеза состоит в том, что разумные решения, осмысленные вычисления (cognizant computing, cognizant solutions) и осмысленные измерения (cognizant measurement) в рамках когнитивного подхода заменяют кибернетические оптимальные (субоптимальные) решения. Действительно, в условиях постоянных изменений трудно оценить, насколько текущее решение далеко от «оптимального» [14, 22]. Реакция системы может непредвиденно замедляться для внешнего наблюдателя в случае возникновения длинной цепочки изменений (например, модификации модели мира). «Эффект бабочки»: малые изменения на входе системы приводят к неожиданным для наблюдателя большим изменениям на выходе. При повторном запуске, при, казалось бы, тех же самых входных данных решение на выходе может оказаться другим (меняется модель мира и, кроме того, трудно создать «те же самые» входные условия). Решение невозможно «откатить» назад, поскольку ситуация и модель мира субъекта, как правило, безнадежно изменились.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена достаточно стройная, единая теория сложносистемного мышления в интересах



расширения возможностей искусственных (информационных) систем. Данные исследования могут помочь выработать принципы для новых вычислительных и управляющих архитектур. Обосновано положение, что моделирование когнитивных функций необходимо

проводить на основе парадигмы сложности и ее частного варианта – парадигмы предельных обобщений. Разработаны прототипы информационных приложений, которые подтверждают универсальный характер предложенных конструкций.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Makarov I.M., Lohin V.M., Manko S.V., Romanov M.P. Rezultaty i opyt realizatsii kontseptsii postroeniya multiagentnykh robototekhnicheskikh sistem //Izvestiya YuFU. Tematicheskii vyipusk: Perspektivnyie sistemy i zadachi upravleniya. – 2011. – №3 (116). – S.101-109.
2. Kurakin P.V., Malinetskiy G.G. Na poroge "sub'ektivnoy" sinergetiki (sinergetika II) //Sinergetika. Trudyi seminar. T.3. – M.: Izd-vo MGU, 2000. – S.242-250.
3. Deutsch D. The Beginning of Infinity: Explanations That Transform the World. – London: Allen Lane, 2011. – 496 p.
4. Roger Penrose, Shadows of the Mind: A Search for the Missing Science of Consciousness. – Oxford University Press, 1994. – 457 p
5. Panov A.D. Tehnologicheskaya singulyarnost, teorema Penrouza ob iskusstvennom intellekte i kvan-tovaya priroda soznaniya //Sovremennyye problemy prikladnoy matematiki, informatiki, avtomatizatsii, upravleniya: Materialy 3-go mezhdunarodnogo nauchno-tehnicheskogo seminar (9-13 sentyabrya 2013 g., Sevastopol). – Moskva. IPI RAN, 2013. – S.63-103.
6. Pivovskiy A., Rozenblyum M., Kurts Yu. Sinhronizatsiya: Fundamentalnoe nelineynoe yavlenie. – M.: Tehnosfera, 2003. – 496 s.
7. Edelman G. Second Nature: Brain Science and Human Knowledge. Yale University Press, 2007. – 224 p.
8. Klaus Mainzer. Thinking in complexity: The Computational Dynamics of Matter, Mind, and Mankind. Fourth Revised and Enlarged Edition. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004. – 460 p.
9. Dreyfus H. Chego ne mogut vychislitelnyie mashiny: Kritika iskusstvennogo razuma. Per. s angl. Izdatelstvo: Editorial URSS, 2010. – 336 s.
10. Haken H. Information and Self-Organization. A Macroscopic Approach to Complex Systems. – New York: Springer-Verlag Publ., 2000.
11. Heylighen F. Gershenson C. The Meaning of Self-organization in Computing. IEEE Intelligent Systems, 2003, Vol. 18, no.4, pp.72-75.
12. Khrennikov A.Yu. Description of the operation of the human subeonscious by means of p-adic dynamical systems //Dokl. Akad. Nauk. – 1999. – V.365. – P.458-460.
13. Budanov V.G. Metod ritmokaskadov: o fraktalnoy prirode vremeni evolyutsioniruyuschih sistem. Sinergetika. Trudyi seminar. T.2. – M.: MGU, 1999. – S. 36-54.
14. Skobelev P. Multi-Agent Systems for Real Time Resource Allocation, Scheduling, Optimization and Controlling: Industrial Application. – 10-th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS 2011). – Springer Verlag, France, Toulouse, 2011, p.5-14.
15. Golitsyn G.A., Petrov V.M. Informatsiya–povedenie–yazyik–tvorchestvo. – M.: LKI, 2007.
16. Eliasmith, C. (2013) How to build a brain: A neural architecture for biological cognition. Oxford University Press.
17. Prokopchuk Y.A. Principle of Limiting Generalizations: Methodology, Problems, and Applications. Monograph. Dnepropetrovsk, Institute of Technical Mechanics of the NAS and the State Space Agency of Ukraine Publ., 2012. 384 p. (in Russian)
18. Prokopchuk Y. Models of cognitive architectures and processes on the basis of a paradigm of limiting generalizations //Cybernetics and computer engineering, 2013. – Vol 171 – pp.37-51. (in Russian)
19. Prokopchuk Y.A. Quantum semantics: ways of implementation and use in intelligent applications. The Problems of Information Technology, 2011, no. 02 (010), pp.125-137. (in Russian)
20. Prokopchuk Y. Cognitive model of activity. Inductive modeling of complex systems. Kyiv, IRTC ITS NAS and MES of Ukraine Publ., 2012. – Vol 4, pp.177-188. (in Russian)
21. Prokopchuk Y.A. Spiral Cognitive Metadynamics: Ways of Implementation in Information Technologies. The Problems of Information Technology, 2013, no.01 (013), pp.6-17. (in Russian)
22. Prokopchuk Y.A. World and cognitive agent behavior and interaction models. Artificial Intelligence, 2013, no.03 (61), pp.19-29. (in Russian).

**Рецензент:** д.т.н., проф. Пошивалов В.П.,  
Институт технической механики НАНУ и НКАУ, Днепропетровск.