

**СИТУАЦИОННОЕ ВЫЧИСЛЕНИЕ И БИОАНАЛОГИ****Титов Евгений Константинович<sup>1</sup>,***e-mail: work\_evgeniy@mail.ru, sergejs.tit@yandex.ru,*<sup>1</sup>*Общество с ограниченной ответственностью «Функция ИТ», г. Белгород, Россия*

*В статье рассмотрены проблемы, вызвавшие необходимость развития ситуационных вычислений. Появились альтернативные парадигмы классическим вычислениям: ситуационная (техническая) и нейроморфная (биологическая), а также их объединение. Появилась альтернативная парадигма обработки информации, основанная на моделировании деятельности мозга. Статья анализирует биоаналоги вычислительных процедур и сопоставляет их с ситуационной обработкой информации. Показано, что все биоаналоги являются ситуационными алгоритмами. Рассмотрены разные виды вычислений и вычислительных систем, выделены направления развития ситуационных вычислений. Статья описывает модель ситуации, отражающей изменение внешней среды для моделируемого объекта, и модель вычислительной ситуации, отражающей процесс управления вычислениями или ситуационные вычисления. Статья дает анализ методов ситуационной обработки информации, построенных на биоаналогах. Показано, что современные вычисления в сложных ситуациях должны включать функции управления вычислениями. Это подтверждается системами параллельных и распределенных вычислений. Отмечено, что биоаналоги как ситуационные вычисления необходимы во встроенных системах и в кибер-физических системах с большим количеством датчиков и исполнительных механизмов.*

**Ключевые слова:** ситуационные вычисления, биоаналоги, управление вычислениями, встроенные системы, кибер-физические системы

**CASE COMPUTING AND BIOSIMILARS****Titov Ye.K.<sup>1</sup>,***e-mail: work\_evgeniy@mail.ru, sergejs.tit@yandex.ru,*<sup>1</sup>*«IT Function» LLC, Belgorod, Russia*

*The problems that caused the need for the development of case computing are considered in the paper. Alternative paradigms to classical computing have emerged: situational (technical) and neuromorphic (biological), as well as their combination. An alternative paradigm of information processing has appeared, based on modeling brain activity. Biosimilars of computational procedures are considered in the article and compared with situational information processing. It is shown that all biosimilars are case algorithms. Different types of computing and computing systems are considered, the directions of development of situational computing are highlighted. A model of a situation reflecting a change in the external environment for the simulated object, and a model of a computational situation reflecting the process of computing management or case computing are described in the article. The analysis of methods of case information processing based on biosimilars is presented in the article. It is shown that state of the art computing in complex situations should include computing control functions. This is confirmed by parallel and distributed computing systems. It is noted that biosimilars as case calculations are necessary in embedded systems and in cyber-physical systems with a large number of sensors and effectors.*

**Keywords:** case computing, biosimilars, computing management, embedded systems, cyber-physical systems

DOI 10.21777/2500-2112-2021-4-70-77

## Введение

В настоящее время происходят фундаментальные изменения в способах разработки, развертывания и использования вычислительных систем. Они становятся сложными, разнородными, динамичными, децентрализованными. Возрастание динамических воздействий на вычислительный процесс во многих случаях исключает применение прямых или сквозных алгоритмов и требуется существенное расширение методического и алгоритмического обеспечения и построение новых вычислительных моделей. Стохастическое воздействие на вычислительную среду создает необходимость развития стохастических вычислений [1], что может достигаться применением новых моделей вычислительной ситуации. Классическая схема вычислений «данные – программа-результат» сталкивается с проблемами variability внешней среды и изменением условий вычислений. Это проблема вызывает необходимость учитывать изменение внешней среды или ситуации. Ответом на усложнение вычислений явилось создание модели вычислительной ситуации [2]. Другим решением проблемы явилось обращение к аналогам живой природы и работе человеческого мозга для создания алгоритмов и методов обработки в меняющихся условиях. Это породило серию методов и алгоритмов таких как: органические вычисления [3], органические встроенные вычислительные системы [4], самооптимизирующиеся и самопрограммируемые вычислительные системы [5, 6]. В основе этого подхода использованы некоторые из основных аспектов самосознания из психологии, которые использовались при разработке связанных понятий в вычислениях. Эти концепции были переведены в область вычислений, что позволило создать вычислительные системы, способные управлять компромиссами между конфликтующими целями во время выполнения вычислений в сложной среде. Эти концепции также позволили сокращать необходимость априорного моделирования предметной области во время проектирования или развертывания вычислительных систем.

Развиваются облачные вычисления [7, 8]. Появились и развиваются туманные вычисления [9]. К числу новых направлений также следует отнести применение и развитие нейроморфных вычислительных систем [10]. Нейроморфные вычисления охватывают широкий спектр подходов к обработке информации, каждый из которых демонстрирует некоторую степень нейробиологического аналога, который отличает их от обычных традиционных вычислительных систем.

Философия, лежащая в основе нейроморфных вычислений, берет свое начало в основополагающей работе, выполненной Карвером Мидом в Калифорнийском технологическом институте в конце 1980-х г. Эта ранняя работа побудила других ученых продолжить разработки, а достижения в технологии сверхбольших интегральных схем способствовали устойчивому росту масштабов и возможностей нейроморфных устройств. Появились автономные вычисления [11], встроенные в саморазвивающиеся вычислительные системы [12] и повсеместные вычисления [13]. Однако общим для всех видов перечисленных вычислений является использование модели ситуации для принятия решений и управления вычислениями. Таким образом, развитие вычислений мотивирует исследования в этой области и, в частности, ситуационного анализа и обработки информации.

### 1. Модель информационной вычислительной ситуации

Для учета меняющейся ситуации вычислений необходимо создать ее модель. Такой моделью является модель информационной ситуации [14, 15]. Эта модель включает ядро ситуации (объект) и его окружение, которое влияет на ядро сильнее, чем другие факторы внешней среды. Модель информационной ситуации включает и объединяет фрагмент информационного пространства и фрагмент информационного поля [16]. Модель информационной ситуации можно сравнить с моделью сложной системы и моделью объекта. Для сложной системы и объекта характерно наличие четких границ с внешней средой и наличие устойчивых внутренних и внешних связей. Отношения между частями и элементами сложной системы и объекта являются второстепенными факторами. Для информационной ситуации характерно наличие нечетких границ, обозначающих ситуацию и внешнюю среду, и четких границ между ситуацией и объектом моделирования. Отношения между объектами в информационной ситуации являются важнейшими факторами и иногда они заменяют связи. Поэтому в информационных вычислительных ситуациях основой анализа вычислительного процесса является опора не столько на

связи, сколько на информационные отношения [17]. В настоящее время накоплен большой опыт, который позволяет систематизировать ситуационное моделирование по разным аспектам [15].

## 2. Методы ситуационной обработки информации

В современных вычислениях понятие алгоритм и вычисления существенно расширились. Классическое определение алгоритма в словарях и справочниках как заранее заданное предписание в настоящее время ограничено условиями. Появилось множество алгоритмов, которые не соответствуют понятию «заранее заданное предписание». Это многоцелевые и ситуационные алгоритмы [18, 19]. Понятие ситуационный алгоритм объединяет разные алгоритмы, действие которых зависит от условий или от текущей ситуации. Такие алгоритмы существовали всегда в живой природе. Но в последние десятилетия появилась тенденция переноса принципов живых организмов в сферу информатики и вычислений. Отметим следующие ситуационные вычисления. В первую очередь это органические вычисления [3]. Их основа – биомиметический подход, который позволяет группе людей функционировать как единый интеллектуальный суперорганизм. Органические вычисления используют технологии, позволяющие «разделять восприятие, коллективные рассуждения и скоординированные действия» внутри человеческих групп для достижения целенаправленного поведения. Органические вычисления стали новым принципом для будущих систем обработки информации. Это, прежде всего, сложные кибер-физические системы [20], включающие наборы встроенных систем, оснащенных датчиками и исполнительными механизмами.

Органические вычисления становятся новым видением проектирования сложных систем [4], удовлетворяющих человеческие потребности. Такие системы ведут себя как живые существа, автономно приспособляясь к динамическим изменениям окружающей среды, и обладают свойствами саморазвития. Появились самосознающие вычислительные системы как направление «естественных вычислений» [21].

Применение алгоритмов параллельных вычислений также отличается от применения обычных последовательных алгоритмов. Эти вычисления структурно напоминают сетевые системы, в силу чего в них возникает дисбаланс нагрузки. Дисбаланс нагрузки часто проявляется во время выполнения параллельных вычислений в больших сложных системах высокой производительности. В этом случае применяют ситуационные подходы [22] для поддержки производительности таких систем.

В развитии облачных вычислений появились системы туманных вычислений. Здесь большой объем данных, созданных датчиками, должен быть эффективно передан и обработан, а вычисления должны быть эффективными. Здесь тоже возникает необходимость ситуационного вычисления, которая решается с применением специальных методов [23].

Острая необходимость в ситуационных алгоритмах появляется в мегаполисах и крупных городах при управлении трафиком. Сложный (по объему и структуре) трафик в больших средах требует использования высокопроизводительных вычислительных систем в условия ситуационной неопределенности. Одним из методов решения данной задачи является моделирование десинхронизации движения для обработки на высокопроизводительных системах [24]. Такое моделирование использует принципы ситуационной обработки информации для построения вычислительного кластера и управления им.

Проблема больших данных [7] в вычислительной среде связана с большими объемами вычислений. Вычисления в таких случаях проектируют на основе централизованной, децентрализованной или распределенной архитектуры [25]. Распределенные эксафлопсные вычислительные системы (DECS) рассматриваются как новое решение для преодоления сложных вычислительных задач научных программ на основе ситуационного вычислительного подхода.

Согласно ситуационному подходу к эксафлопсным вычислениям, динамический характер научных проблем нового поколения требует пересмотра при статическом управлении вычислительными ресурсами. Следовательно, необходимо представить ситуационную модель динамической балансировки нагрузки, чтобы эффективно управлять нагрузкой на систему. В настоящее время распределенные эксафлопсные системы являются перспективным решением для поддержки научных программ с динамическими (ситуационными) запросами к ресурсам. В работе [25] предложен ситуационный механизм динамической балансировки нагрузки для распределенного управления нагрузкой в вычислительных

узлах. Предлагаемая модель учитывает многие практические параметры, включая переход нагрузки и задержку связи. В работе предложен компенсирующий ситуационный фактор для минимизации времени простоя вычислительных узлов. В работе использована ситуационная оценка состояния узлов, на основе которой вычисляют точную часть нагрузки, которая должна быть передана для выполнения оптимизированной балансировки нагрузки. Результаты показывают значительные улучшения производительности за счет предложенной ситуационной балансировки нагрузки по сравнению с более ранними механизмами распределенной балансировки нагрузки [25].

Как разновидность ситуационных вычислений и ситуационного анализа были предложены «самоосознающие» [5] или «самооценочные» [12] вычислительные системы. В сущности, это один термин Self-aware (осознающий себя), который в зависимости от контекста переводится по-разному. В обоих случаях во внимание принимается ситуация для самоосознания или для самооценки.

Сложные вычислительные системы приводят к моделированию их «поведения во время вычислений», которое трудно понять или предсказать. Одно из видений того, как ответить на этот вызов, состоит в том, чтобы наделять вычислительные системы ситуационным самосознанием, чтобы обеспечить их автономное адаптивное поведение. Стремление к самосознанию в информационных системах (ИС), информационных технологиях (ИТ), информационных моделях (ИМ) зародилось в различных областях информатики и инженерии за последние два десятилетия. В последнее время было разработано более фундаментальное понимание того, что концепции самосознания могут означать для проектирования и эксплуатации вычислительных систем. Это опирается на теорию самосознания из психологии и другие смежные области знаний, что привело к ряду создания новых подходов к архитектурам, алгоритмам и системам.

В работе [5] описаны некоторые из основных аспектов самосознания из психологии, которые использовались при разработке связанных понятий в вычислениях. В работе [5] приводятся примеры того, как эти идеи позволяют управлять ситуационными компромиссами между конфликтующими целями во время вычислений. Они позволяют учитывать контекст сложной среды, одновременно сокращать необходимость априорного моделирования предметной области во время проектирования или развертывания вычислений.

Другой подход приведен в работе [12]. В ней описываются результаты исследований применения встроенных компьютерных систем с самооценкой (Embodied Self-Aware Computing Systems – ESACS), которые встроены в физическую среду с наборами датчиков и исполнительных механизмов для взаимодействия как со своей средой, так и со своим собственным воплощением. Собственно, это идеология кибер-физических систем. Хотя системы с самооценкой относятся к конкретным приложениям, как и традиционные встроенные системы (ES), они значительно более гибкие, надежные и автономные. Они могут адаптироваться к широкому диапазону изменений окружающей среды и могут справляться с ухудшением и недостатками собственной производительности.

Таким образом, встроенные компьютерные системы с самооценкой представляют собой эволюцию традиционных встроенных и кибер-физических систем в направлении большей автономности, надежности и гибкости. Когда встроенные системы работают в изменяющейся среде, требуя неизменных и полностью охарактеризованных вычислительных ресурсов, воплощенные самооценочные вычислительные системы адаптируются к изменяющимся условиям и вычислительным ресурсам. В работе [12] дан обзор методов и методологий, используемых для ESACS, структурированных вместе со способностями: 1) сенсорного наблюдения и абстракции; 2) самооценки; 3) самоуправления. В работе [26] описан еще один подход в этом направлении. В работе дается анализ и предложение по списку показателей, сгруппированных для количественной оценки свойств самооценочных вычислительных систем. Этот набор показателей можно рассматривать также для проведения бенчмаркинга и сравнения самооценочных вычислительных систем на равных условиях.

### 3. Способы управления вычислениями

Анализ способов управления вычислениями показывает, что понятие «самооценка вычислений» связано с такими родственными терминами как автономные вычисления, самоуправление и т.д. Необ-

ходимость в новом определении, обусловленном тенденциями, которые лишь частично учитываются в существующих областях вычислений, является актуальной.

К ситуационным вычислениям относятся автономные вычисления и автономные вычислительные системы. Автономные вычислительные системы характеризуются свойствами самоуправления вычислительным процессом в зависимости от вычислительной ситуации. Автономные вычислительные системы становятся необходимым комплексным типом информационных систем, направленных на проектирование сложных распределенных вычислительных систем. Их работа была определена аналогией функционирования нервной системы человека и предназначена для разработки и построения систем самоуправления. Системы самоуправления постоянно проходят оценку с точки зрения их оптимизации и автоматически адаптируются к меняющимся условиям. Для решения этих задач автономные вычислительные системы требуют научных и технологических достижений в различных областях, а также новых архитектур, которые будут поддерживать эффективную интеграцию технологий, используемых в этих системах. Технологии автономных вычислительных систем могут интегрироваться с существующими системами программирования для реализации приложений самоуправления.

Синонимом вычислений в автономных вычислительных системах являются нейроморфные вычисления [10]. Нейроморфные вычисления охватывают широкий спектр подходов к ситуационной обработке информации. Каждый подход демонстрирует некоторую степень нейробиологического аналога в вычислениях, что отличает их от обычных традиционных вычислительных систем. Философия, лежащая в основе нейроморфных вычислений, берет свое начало в основополагающей работе, выполненной Карвером Мидом в Калифорнийском технологическом институте в конце 1980-х годов.

В последнее время появился ряд крупномасштабных нейроморфных проектов, использующих беспрецедентные масштабы и возможности. Эти крупномасштабные проекты связаны с новыми крупными инициативами по исследованию работы мозга, созданию ощущения, что время и обстоятельства подходят для прогресса в нашем понимании обработки информации в мозге. Нейроморфные проекты близки к нейросетевым проектам. Цель нейроморфных вычислений – наблюдать за огромной сложностью биологического мозга и каким-то образом извлечь из того, что известно о его структуре и принципах работы, некоторые более абстрактные принципы, которые можно применить в практической инженерной системе. Ни одна нейроморфная система не пытается воспроизвести все биологические детали, но все придерживаются идеи, что вычисления сильно распределены по небольшим вычислительным элементам, в некотором роде аналогичным нейронам, соединенным в сети, с некоторой степенью гибкости в способах формирования соединений.

Существует несколько крупномасштабных нейроморфных систем.

Чип IBM TrueNorth основан на распределенных цифровых нейронных моделях, предназначенных для когнитивных приложений в реальном времени.

Стэнфордская нейросеть использует аналоговые нейронные цепи в реальном времени.

Система Heidelberg BrainScaleS использует аналоговые нейронные цепи выше порогового уровня, работающие в 10000 раз быстрее, чем биологическое реальное время, с целью понимания биологических систем и, в частности, долгосрочного обучения.

Manchester SpiNNaker – это цифровая многоядерная система, работающая в реальном времени, которая реализует нейронные модели и модели синапсов в программном обеспечении, работающем на небольших встроенных процессорах, опять же, в первую очередь, предназначенном для моделирования биологических нервных систем.

Все рассмотренные подходы представляют собой компромиссы – компромиссы между набором желаемых целей. Энергоэффективность, плотность интеграции, гибкость и конфигурируемость, аналоговые и цифровые алгоритмы, аппаратное и программное обеспечение – все эти факторы находят различный баланс.

## Заключение

Необходимо различать несколько типов вычислительных ситуаций: ситуация – условие решения задачи; ситуация процесса решения задачи; ситуация получения результата решения. Динамический характер научных проблем нового поколения требует пересмотра методики вычислений и введения метода управления вычислительными ресурсами. Компьютерные системы с ситуационными вычислениями

ями встраивают в физическую среду для управления вычислительной ситуацией и реакции на изменения ситуации. Появляются возможности анализа ситуаций, которых ранее не было. Наборы датчиков и исполнительных механизмов используют для взаимодействия со средой и для оценки собственного состояния формируют модели информационных ситуаций, которые можно применять в вычислительном процессе. Благодаря информационному взаимодействию с системой датчиков вычислительные системы узнают о своей ситуации, о собственном состоянии и внешних воздействиях. Ситуационный подход позволяет формировать более качественные системы в сравнении с традиционными встроенными системами (ES). Ситуационные вычислительные системы и модели значительно более гибкие, надежные и более автономные. Они могут адаптироваться к широкому диапазону изменений окружающей среды и могут справляться с ухудшением и недостатками собственной производительности. Набор показателей ситуационных вычислительных моделей можно рассматривать как отправную точку для проведения исследований и развития этого направления. Перспективным является использование моделей информационных единиц в области построения ситуационных вычислительных моделей.

Парадигма применения компьютера с хранимой программой во все области человеческой деятельности начинает упираться в ситуации не применимости или частичной неприменимости данного подхода. Появились две альтернативные парадигмы: ситуационная (техническая) и нейроморфная (биологическая), а также их объединение. Появилась альтернативная парадигма обработки информации, с которой можно сравнить деятельность мозга. Однако, несмотря на внешнее сходство, существует разница в применении их в качестве систем обработки информации и управления. Понятно, что принципы работы мозга и компьютера очень разные. В то время как компьютеры отличаются скоростью и точностью, мозг по-прежнему выигрывает за счет ассоциаций и аналогий в том, чтобы справиться с новизной, сложностью и неоднозначностью, а также за счет практических задач, таких как распознавание лиц и управление двуногим движением.

В последние десятилетия сформирована новая вычислительная парадигма, основанная на ситуационных принципах. Она направлена на улучшение понимания вычислительного процесса в условиях ситуационной изменчивости.

### Список литературы

1. *Gaines B.R.* Stochastic computing // Proceedings of the April 18–20, 1967, spring joint computer conference. – 1967. – pp. 149–156.
2. *Цветков В.Я., Титов Е.К.* Информационная вычислительная ситуация // Славянский форум. – 2019. – № 4 (26). – С. 389–397.
3. *Müller-Schloer C., Schmeck H., Ungerer T.* (ed.). Organic computing-a paradigm shift for complex systems. – Springer Science & Business Media, 2011.
4. *Schmeck H.* Organic computing-a new vision for distributed embedded systems // Eighth IEEE International Symposium on Object-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC'05). – IEEE, 2005. – pp. 201–203.
5. *Lewis P.R. et al.* Self-Aware Computing Systems // Natural Computing Series. Heidelberg, Germany: Springer, 2016.
6. *Giese H. et al.* State of the art in architectures for self-aware computing systems // Self-Aware Computing Systems. – Springer, Cham, 2017. – pp. 237–275.
7. *Буравцев А.В., Цветков В.Я.* Облачные вычисления для больших геопространственных данных // Информация и космос. – 2019. – №3. – С. 110–115.
8. *Oma R. et al.* A tree-based model of energy-efficient fog computing systems in IoT // Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems. – Springer, Cham, 2018. – pp. 991–1001.
9. *Mahmud R., Kotagiri R., Buyya R.* Fog computing: A taxonomy, survey and future directions // Internet of everything. – Springer, Singapore, 2018. – pp. 103–130.
10. *Furber S.* Large-scale neuromorphic computing systems // Journal of neural engineering. – 2016. – Vol. 13. – № 5. – pp. 051001.
11. *Pfannemuller M. et al.* A dynamic software product line approach for adaptation planning in autonomic computing systems // 2017 IEEE International Conference on Autonomic Computing (ICAC). – IEEE, 2017. – pp. 247–254.

12. Hoffmann H., Jantsch A., Dutt N.D. Embodied Self-Aware Computing Systems // Proceedings of the IEEE. 2020.
13. Krumm J. (ed.). Ubiquitous computing fundamentals. – CRC Press, 2018.
14. Цветков В.Я. Модель информационной ситуации // Перспективы науки и образования. – 2017. – № 3(27). – С. 13–19.
15. Цветков В.Я. Систематика информационных ситуаций // Перспективы науки и образования. – 2016. – №5 (23). – С. 64–68.
16. Цветков В.Я. Информационное поле и информационное пространство // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – №1-3. – С. 455–456.
17. Цветков В.Я. Отношение, связь, соответствие // Славянский форум. – 2016. – №2(12). – С. 272–276.
18. Титов Е.К. Ситуационная обработка информации // Славянский форум. – 2018. – № 3(21). – С. 120–125.
19. Титов Е.К. Алгоритмы ситуационной обработка информации // Славянский форум. – 2018. – № 4 (22). – С. 60–64.
20. Цветков В.Я. Управление с применением кибер-физических систем // Перспективы науки и образования. – 2017. – №3(27). – С. 55–60.
21. Lewis P.R. et al. Self-Aware Computing Systems // Natural Computing Series). Heidelberg, Germany: Springer. – 2016.
22. Mohammed A. et al. An approach for realistically simulating the performance of scientific applications on high performance computing systems // Future Generation Computer Systems. – 2020. – Vol. 111. – pp. 617–633.
23. Oma R. et al. A tree-based model of energy-efficient fog computing systems in IoT // Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems. – Springer, Cham, 2018. – pp. 991–1001.
24. Turek W. Erlang-based desynchronized urban traffic simulation for high-performance computing systems // Future Generation Computer Systems. – 2018. – Vol. 79. – pp. 645–652.
25. Mirtaheri S.L., Grandinetti L. Dynamic load balancing in distributed exascale computing systems // Cluster Computing. – 2017. – Vol. 20. – № 4. – pp. 3677–3689.
26. Herbst N. et al. Metrics and benchmarks for self-aware computing systems // Self-Aware Computing Systems. – Springer, Cham, 2017. – pp. 437–464.

### References

1. Gaines B.R. Stochastic computing // Proceedings of the April 18–20, 1967, spring joint computer conference. – 1967. – S. 149–156.
2. Cvetkov V.Ya., Titov E.K. Informacionnaya vychislitel'naya situaciya // Slavyanskij forum. – 2019. – №4(26). – S. 389–397.
3. Müller-Schloer C., Schmeck H., Ungerer T. (ed.). Organic computing-a paradigm shift for complex systems. – Springer Science & Business Media, 2011.
4. Schmeck H. Organic computing-a new vision for distributed embedded systems // Eighth IEEE International Symposium on Object-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC'05). – IEEE, 2005. – S. 201–203.
5. Lewis P. R. et al. Self-Aware Computing Systems // Natural Computing Series. Heidelberg, Germany: Springer, 2016.
6. Giese H. et al. State of the art in architectures for self-aware computing systems // Self-Aware Computing Systems. – Springer, Cham, 2017. – S. 237–275.
7. Buravcev A.V., Cvetkov V.Ya. Oblachnye vychisleniya dlya bol'shih geoprostranstvennyh dannyh // Informaciya i kosmos. – 2019. – №3. – S. 110–115.
8. Oma R. et al. A tree-based model of energy-efficient fog computing systems in IoT // Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems. – Springer, Cham, 2018. – S. 991–1001.
9. Mahmud R., Kotagiri R., Buyya R. Fog computing: A taxonomy, survey and future directions // Internet of everything. – Springer, Singapore, 2018. – S. 103–130.
10. Furber S. Large-scale neuromorphic computing systems // Journal of neural engineering. – 2016. – Vol. 13. – № 5. – S. 051001.
11. Pfannemuller M. et al. A dynamic software product line approach for adaptation planning in autonomic computing systems // 2017 IEEE International Conference on Autonomic Computing (ICAC). – IEEE, 2017. – S. 247–254.

12. *Hoffmann H., Jantsch A., Dutt N. D.* Embodied Self-Aware Computing Systems //Proceedings of the IEEE. 2020.
13. *Krumm J.* (ed.). Ubiquitous computing fundamentals. – CRC Press, 2018.
14. *Cvetkov V.Ya.* Model' informacionnoj situacii // Perspektivy nauki i obrazovaniya. – 2017. – №3(27). – S. 13–19.
15. *Cvetkov V.Ya.* Sistematika informacionnyh situacij // Perspektivy nauki i obrazovaniya. – 2016. – № 5 (23). – S. 64–68.
16. *Cvetkov V.Ya.* Informacionnoe pole i informacionnoe prostranstvo // Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij. – 2016. – №1-3. – S. 455–456.
17. *Cvetkov V.Ya.* Otnoshenie, svyaz', sootvetstvie // Slavyanskij forum. – 2016. – №2(12). – S. 272–276.
18. *Titov E.K.* Situacionnaya obrabotka informacii // Slavyanskij forum. – 2018. – № 3(21). – S. 120–125.
19. *Titov E.K.* Algoritmy situacionnoj obrabotka informacii // Slavyanskij forum. – 2018. – № 4 (22). – S. 60–64.
20. *Cvetkov V.Ya.* Upravlenie s primeneniem kiber-fizicheskikh sistem // Perspektivy nauki i obrazovaniya. – 2017. – №3(27). – S. 55–60.
21. *Lewis P.R. et al.* Self-Aware Computing Systems //Natural Computing Series). Heidelberg, Germany: Springer. – 2016.
22. *Mohammed A. et al.* An approach for realistically simulating the performance of scientific applications on high performance computing systems //Future Generation Computer Systems. – 2020. – Vol. 111. – S. 617–633.
23. *Oma R. et al.* A tree-based model of energy-efficient fog computing systems in IoT //Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems. – Springer, Cham, 2018. – S. 991–1001.
24. *Turek W.* Erlang-based desynchronized urban traffic simulation for high-performance computing systems // Future Generation Computer Systems. – 2018. – Vol. 79. – S. 645–652.
25. *Mirtaheri S.L., Grandinetti L.* Dynamic load balancing in distributed exascale computing systems //Cluster Computing. – 2017. – Vol. 20. – № 4. – S. 3677–3689.
26. *Herbst N. et al.* Metrics and benchmarks for self-aware computing systems //Self-Aware Computing Systems. – Springer, Cham, 2017. – S. 437–464.