

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 004.8: 001.891

doi: 10.30987/2658-4026-2026-2-198-206

Теоретико-методологический базис концепции перцептивно-когнитивных интерфейсов

Сергей Фёдорович Сергеев^{1✉}, Алексей Викторович Сергеев², Екатерина Юрьевна Смирнова³

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

^{2,3} Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики», г. Санкт-Петербург, Россия

¹ s.f.sergeev@spbu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6677-8320>

² etechnician@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-4798-6570>

³ eus@rtc.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3542-8421>

Аннотация.

Авторы статьи предлагают концепцию перцептивно-когнитивных интерфейсов (ПКИ) для современных сложных эргатических технических систем (СЭТС), представляющих собой динамические когнитивные экосистемы, включающие человека, ИИ-агентов, сенсоров и роботов. Традиционные интерфейсы не справляются с неопределенностью и высокой скоростью принятия решений. Концепция ПКИ решает эту проблему через введение аутопоэтического когнитивного партнера, встроенного в петлю восприятия-действия-рефлексии. ПКИ умножает человеческие возможности через: 1) байесовские предсказательные модели мира деятельности; 2) мультимодальную фузию данных (видео, биосигналы, глазодвигательная активность, тактильные сигналы); 3) синергетическое взаимодействие в реальном времени; 4) формирование эмерджентных аффордансов. Теоретический базис концепции ПКИ – энактивный подход, предсказательная (предиктивная) обработка данных, аутопоэзис, расширенное сознание. Сформулированы постулаты: воплощенность познания, предсказательность восприятия, энактивность взаимодействия, аффордансная специфичность, когнитивная оптимальность, социальная энактивность, динамическая адаптивность, экологическая валидность. Синтезируя данные теории, ПКИ минимизирует когнитивную нагрузку (внутренняя/внешняя/продуктивная) на оператора, строит динамические сетевые графы знаний и поддерживает мультиагентность для коллективного познания. Методология включает мультимодальную интеграцию, человеко-ориентированное проектирование и содержит 4 фазы: энактивный анализ, предсказательное моделирование, аффордансное проектирование, адаптивная реализация. Эффективность оценивается по критериям когнитивной эффективности, энактивной естественности, предсказательной согласованности, адаптивной гибкости, социальной поддержки и эмерджентной синергии. Концепция ПКИ задает парадигму перехода от локальных интерфейсов к распределенным когнитивным экосистемам, смещая фокус с передачи информации на создание совместного пространства когнитивной деятельности.

Ключевые слова: перцептивно-когнитивный интерфейс, энактивный подход, аутопоэзис, предсказательная обработка, аффордансы, когнитивная нагрузка, мультимодальная интеграция, эргатические системы

Финансирование: Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России 25.12.2024 № 075-00553-25-00 «Исследование методов обеспечения взаимодействия человека с ассистивными робототехническими устройствами на основе перцептивно-когнитивных интерфейсов» (FNRG-2025-0010 1024050300019-9-2.2.2;1.2.1).

Для цитирования: Сергеев С.Ф., Сергеев А.В., Смирнова Е.Ю. Теоретико-методологический базис концепции перцептивно-когнитивных интерфейсов // Эргодизайн. 2026. №2 (32). С. 198-206. <http://dx.doi.org/10.30987/2658-4026-2026-2-198-206>.

Original article

Open access article

Theoretical and Methodological Basis of the Concept of Perceptual-Cognitive Interfaces

Sergey F. Sergeev^{1✉}, Aleksey V. Sergeev^{1✉}, Ekaterina Yu. Smirnova^{1✉}

¹ Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

^{2,3} The Central Research and Development Institute of Robotics and Technical Cybernetics, Saint Petersburg, Russia

¹ s.f.sergeev@spbu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6677-8320>

² etechnician@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-4798-6570>

³ eus@rtc.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3542-8421>

Abstract.

The authors propose a concept of perceptual-cognitive interfaces (PCIs) for modern complex ergatic technical systems (MCETs), which are dynamic cognitive ecosystems comprising humans, AI agents, sensors, and robots. Traditional interfaces fail to cope with uncertainty and the high speed of decision-making. The PCI concept addresses this problem by introducing an autopoietic cognitive partner embedded in the perception-action-reflection loop. PCIs amplify human capabilities through: 1) Bayesian predictive models of the activity world; 2) multimodal data fusion (video, biosignals, eye-tracking, tactile signals); 3) synergistic real-time interaction; 4) formation of emergent affordances. The theoretical basis of the PCI concept is the enactive approach, predictive processing, autopoiesis, and extended cognition. The following postulates are formulated: embodiment of cognition, predictivity of perception, enactive interaction, affordance specificity, cognitive optimality, social enaction, dynamic adaptability, and ecological validity. By synthesizing these theories, PCIs minimize the operator's cognitive load (internal/external/productive), construct dynamic knowledge network graphs, and support multi-agent for collective cognition. The methodology includes multimodal integration and human-centred design, consisting of four phases: enactive analysis, predictive modelling, affordance-based design, and adaptive implementation. Effectiveness is evaluated according to the criteria of cognitive efficiency, enactive naturalness, predictive coherence, adaptive flexibility, social support, and emergent synergy. The PCI concept sets a paradigm for the transition from local interfaces to distributed cognitive ecosystems, shifting the focus from information transfer to creating a shared space for cognitive activity.

Keywords: perceptual-cognitive interface, enactive approach, autopoiesis, predictive processing, affordances, cognitive load, multimodal integration, ergatic systems

Funding: The results were obtained as part of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 075-00553-25-00 dated 12/25/2024 "Research of methods for ensuring human interaction with assistive robotic devices based on perceptual-cognitive interfaces" (FNRG-2025-0010 1024050300019-9-2.2.2;1.2.1).

For citation: Sergeev S.F., Sergeev A.V., Smirnova E.Yu. Theoretical and Methodological Basis of the Concept of Perceptual-Cognitive Interfaces. *Ergodizayn [Ergodesign]*. 2026;2(32):198-206. Doi: 10.30987/2658-4026-2026-2-198-206.

Введение

Современные сложные эргатические технические системы (СЭТС) – это не просто «человеко-машинные комплексы», а динамические, саморазвивающиеся сети агентов, в которых человек, ИИ, датчики, сенсорные системы, мехатронные модули и роботы образуют единую когнитивную экосистему [1], [2]. Они предъявляют повышенные требования к интеграции когнитивных ресурсов человека-оператора с интеллектуальной средой интерфейса, реализуя концепцию *интеллектуального симбиоза* [3,] [4], [5]. В условиях неопределенности, неполноты данных и необходимости в высокой скорости принятия решений традиционные интерфейсы (GUI, CLI, VUI) становятся узким местом: они не успевают адаптироваться к состоянию оператора, не прогнозируют его намерения и действия, не расширяют когнитивные возможности в реальном времени, а создают информационную перегрузку ведущую к

информационному стрессу. Классические варианты решения проблемы повышения эффективности сложных систем человек-машина (СЧМ) связаны с профессиональной подготовкой и использованием тренажеров, моделирующих реальную деятельность в сложной системе [6]. Однако возникает спектр задач психологического и технологического плана, связанных с необходимостью точного моделирования среды деятельности и учета специфики виртуального погружения и обучения оператора в ней [7], [8], [9], [10], [11]. В результате развивается индустрия систем профессиональной подготовки и средств обучения, как реакция на требование повышения качества человеческого звена в СЧМ.

Ответ на этот вызов может быть дан концепцией *перцептивно-когнитивных интерфейсов* (ПКИ), рассматриваемой в настоящей статье. Под ПКИ нами понимается интерфейс, включающий оператора во все формы мультимодальных информационных

взаимодействий со средой деятельности, – не как «окно в систему», а как аутопоэтический когнитивный партнер, встроенный в петлю «восприятия-действия-рефлексии». Его цель – реализация концепции *умножения человеческих возможностей* в СЧМ [5], [9], [10] за счет:

- предсказательной модели мира деятельности (на базе байесовских ИИ-агентов);
- мультимодальной интеграции данных (видео, аудио, айтрекинга, вибротактильных сигналов);
- синергетического взаимодействия с оператором в режиме реального времени;
- формирования эмерджентных аффордансов – новых возможностей действия, которые не существуют вне интерфейса;
- интеллектуальной обработки информации, формирующей оптимальную модель мира деятельности, решения ситуативных задач методами ИИ и предоставления оператору в различных формах и модальностях дополнительных в текущем и стратегическом времени справочных, консультационных и управляющих решений и действий.

Фундаментальной особенностью ПКИ является рассмотрение психофизиологической и когнитивной системы человека как аутопоэтической самоорганизующейся системы, *энактивированной* (встроенной, воплощенной) в среду, которая может включать активные когнитивные агенты на базе ИИ, вступающие в синергетические симбиотические отношения с субъектом деятельности [4].

1. Теоретические основания: энактивный подход и ключевые постулаты

Теоретический базис концепции ПКИ покоится на энактивном подходе к познанию, утверждающем, что познание возникает из динамического взаимодействия тела, мозга и среды, а восприятие является активным процессом, направленным на генерацию действий [12], [13], [14]. Этот подход противостоит классическим моделям пассивной, реактивной обработки информации и является развитием экологического подхода Дж. Гибсона постулирующего когнитивное единство среды и субъекта [15].

На основе энактивной парадигмы нами сформулированы ключевые постулаты ПКИ:

1. *Воплощенности познания*: Интерфейсы должны учитывать телесную природу познания, обеспечивая естественное сенсомоторное взаимодействие. Познание возникает не из чисто мозговых процессов, а из динамического взаимодействия тела, мозга и среды, где тело играет конститутивную роль, а не рассматривается лишь как носитель сенсоров и эффекторов.

2. *Предсказательности и активности восприятия*: Интерфейсы должны поддерживать формирование точных предсказательных моделей у пользователя, минимизируя ошибки предсказания за счет последовательной обратной связи. Восприятие – это активный процесс генерации и уточнения предсказаний о сенсорном потоке, где тело играет конститутивную роль в минимизации ошибки предсказания, и восприятие с действием неразрывно связаны.

3. *Энактивности взаимодействия*: Значение возникает из паттернов взаимодействия. ПКИ должны создавать прямые возможности для действия, а не требовать предварительной символической интерпретации. Познание реализуется как динамическое взаимодействие организма и среды, где граница между организмом и средой становится интерфейсом для контакта, и смысл рождается в самом взаимодействии.

4. *Аффорданской специфичности*: Интерфейсы должны поддерживать развитие новых аффордансов (возможностей для действия) через практику и обучение, эволюционируя вместе с экспертизой пользователя. Аффордансы – это непосредственно воспринимаемые возможности для действия [16], [17], позволяющие действовать без сложных умозаключений, и их развитие – функция состояния оператора, контекста и истории взаимодействия.

5. *Когнитивной оптимальности*: ПКИ должны минимизировать непродуктивную внешнюю когнитивную нагрузку и максимизировать продуктивную, действуя как «когнитивная ортопедия». Проектирование должно учитывать ограничения рабочей памяти и направить психические ресурсы с решения навигационных задач интерфейса на решение собственно предметной задачи.

6. *Социальной энактивности*: Интерфейсы должны поддерживать совместную деятельность, обмен опытом и коллективное смыслообразование. Социальное познание реализуется не через ментальные репрезентации, а через совместное действие и

совместное осмысление, где понимание других возникает из динамической, телесной координации в реальном времени [18].

7. Динамической адаптивности: ПКИ должны непрерывно адаптироваться к изменяющемуся когнитивному состоянию пользователя на основе мультимодальных данных (ЭЭГ, движение глаз, физиологические сигналы, биосигналы). Интерфейсы должны динамически меняться в реальном времени на основе состояния пользователя и контекста.

8. Экологической валидности: Проектирование должно опираться на естественные, эволюционно сформированные паттерны восприятия и действия человека, а не на искусственные метафоры. Естественные навыки восприятия и действия, изученные Гибсоном, позволяют сделать взаимодействие с комплексными системами интуитивным и соответствующим врожденным человеческим способностям [15].

2. Системный понятийный базис: интеграция теорий

Концепция ПКИ синтезирует несколько современных теорий:

Теория предсказательной обработки: Мозг рассматривается как иерархическая система предсказаний [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25]. ПКИ должны быть спроектированы для соответствия этим байесовским механизмам, обеспечивая последовательное обновление «убеждений» пользователя о системе. Иерархическая байесовская модель (HBM) строится на лету для каждого оператора. Агент-прогнозатор (LSTM + Normalizing Flows) генерирует гипотезы о том, что оператор воспринимает, делает и чего не замечает. Ошибка предсказания используется как сигнал внимания – интерфейс подсвечивает критические зоны.

Теория аффордансов (расширенная): Аффордансы понимаются динамически, как возможности, формирующиеся в процессе обучения и взаимодействия [26]. Задача ПКИ – создавать богатую среду прямых аффордансов. Аффорданс представляет собой функцию состояния оператора, контекста и истории. Граф аффордансов строится в топологическом пространстве, а обучение аффордансам реализуется через обучение с обратным подкреплением (Inverse Reinforcement Learning) из экспертных траекторий.

Теория когнитивной нагрузки: Управление внутренней, внешней и продуктивной

нагрузкой является центральным для проектирования ПКИ, требующего адаптивного распределения когнитивных ресурсов между человеком и системой [27], [28], [29]. Внутренняя нагрузка связана со сложностью задачи и решается путем разбиения на подзадачи и адаптивного уровня детализации. Внешняя нагрузка, порождаемая неудобным пользовательским интерфейсом (UI), устраняется через удаление визуального шума и автоматическое сокрытие лишней информации. Продуктивная нагрузка, необходимая для построения схемы понимания, усиливается метакогнитивными подсказками.

Теория аутопоэзиса и аутопоэтической коммуникации: Одно из базовых положений концепции. ПКИ рассматривается не как канал передачи информации, а как аутопоэтическая система, совместно с оператором циклически воспроизводящая сеть смыслов и действий [30], [31], [32], [33]. По аналогии с концепцией Н. Лумана [34], коммуникация в системе «человек-ПКИ-среда» является самопорождающим процессом, где каждый акт взаимодействия рекурсивно изменяет саму систему, поддерживая ее целостность и способствуя самообучению.

Теория расширенного сознания (Extended Mind): Когниция выходит за пределы черепной коробки и включает внешние когнитивные артефакты [35]. ПКИ служит когнитивным протезом: Виртуальные подсказки, голограммы и гаптические интерфейсы становятся частью расширенной когнитивной системы оператора, не заменяя, а усиливая человеческую активность.

Теория социальной энактивности (Social Enaction): Смысл рождается в совместном действии [36], [37], [38]. Реализация коллективных форм познания достигается через многоагентное с общей политикой обучение с подкреплением, позволяя нескольким операторам, ИИ и роботам образовать единую аутопоэтическую суперсистему с общей базой знаний и коллективным предсказательным полем.

В таблице 1 представлены ключевые особенности теорий, составляющих базис концепции ПКИ.

3. Методологические принципы и рамка проектирования

Создание ПКИ базируется на следующих методологических принципах:

1. **Мультимодальная интеграция:** Синтез зрительной, слуховой, тактильной и иной

информации для формирования единого перцептивного опыта (напр., зумируемые интерфейсы – ZUI). Мультимодальное взаимопроникновение данных (видео, аудио, тактильных и сигналов глазодвигательной активности) обеспечивает единый перцептивный опыт.

2. *Человеко-ориентированное проектирование:* Глубокое изучение когнитивных процессов целевой аудитории,

часто через соучаствующее смыслообразование (participatory sense-making) с конечными пользователями. Пример применения: реализация ПКИ для систем визуальной аналитики задействует моторные, аудиальные и другие модальности, чтобы ускорить семантическую фильтрацию данных, что соответствует принципам воплощенности и мультимодальности [39].

Таблица 1.

Базовые теории, составляющие концепцию ПКИ

Table 1.

The basic theories that make up the concept of PKI

Подход	Роль в ПКИ	Технологическая реализация
Энактивизм (Varela, Thompson, Rosch, 2017)	Познание это действие + тело + среда	Эмбодированные агенты с сенсомоторными петлями
Предсказательная обработка (Friston, 2008, 2010)	Мозг – это иерархический байесовский предиктор	Инференция на Variational Autoencoders + RNN
Аутопоззис (Maturana & Varela)	Система самопроизводит свои границы и смысл	Самомодифицирующиеся графы знаний (dynamic KG)
Extended Mind (Clark & Chalmers, 1998)	Когниция выходит за черепную коробку	Когнитивные протезы: AR-надписи, голограммы, haptics
Социальная энактивность (De Jaegher & Di Paolo, 2010)	Смысл рождается в совместном действии	Multi-agent reinforcement learning с shared policy

3. *Адаптивность и персонализация:* Использование физиологических показателей и поведенческого анализа для адаптации интерфейса в реальном времени к индивидуальным когнитивным состояниям и особенностям человека [40].

3.1. Фазы проектирования ПКИ

Можно выделить следующие фазы проектирования:

- Фаза 1. *Энактивный анализ:* Изучение естественных паттернов взаимодействия в предметной области, выявление сенсомоторных схем и аффордансов.

- Фаза 2. *Предсказательное моделирование:* Построение байесовских

моделей пользователя, проектирование иерархий информации и обратной связи.

- Фаза 3. *Аффордансное проектирование:* Создание интерфейса как среды прямых возможностей для действия с поддержкой развития экспертизы.

- Фаза 4. *Адаптивная реализация:* Внедрение систем мониторинга состояния и алгоритмов динамической адаптации, обеспечение социальных функций.

3.2. Критерии оценки эффективности ПКИ

Эффективность перцептивно-когнитивных интерфейсов оценивается по комплексу критериев представленных в таблице 2.

Таблица 2.

Table 2.

Критерии оценки эффективности ПКИ

Criteria for evaluating the effectiveness of PKI

Критерий	Определение	Метрика
Когнитивная эффективность	Снижение общей когнитивной нагрузки при росте производительности	Соотношение производительности к когнитивной нагрузке
Энактивная естественность	Соответствие естественным сенсомоторным паттернам и минимальное время обучения	Время овладения, интуитивность действий

Предсказательная согласованность	Точность ментальных моделей пользователя и минимальный уровень ошибок предсказания	Уменьшение ошибок предсказания, точность ментальной модели
Адаптивная гибкость	Способность системы к динамической персонализированной адаптации	Скорость адаптации, релевантность рекомендаций
Социальная поддержка	Эффективность инструментов для совместной деятельности и коллективного познания	Качество кооперации, успешность коллективных задач
Эмерджентная когнитивная синергия	Превышение суммарных возможностей человека и ИИ при совместном взаимодействии и решении задач	$1 + 1 > 2$ в задачах восприятия, прогноза и действия

Заключение

Концепция перцептивно-когнитивных интерфейсов предлагает целостный теоретико-методологический базис для проектирования интерфейсов сложных эргатических систем. ПКИ – это не следующая версия GUI, а новая парадигма: интерфейс становится аутопоэтической системой, совместно с человеком порождающей смысл и действие. Интегрируя передовые достижения когнитивной науки (энактивность, предективный мозг) с системным подходом, включающим процессы самоорганизации (аутопоэзис), она смещает фокус с передачи информации на совместное создание когнитивного пространства операторской деятельности.

ПКИ представляет собой не просто инструмент межсистемной связи, а является аутопоэтическим когнитивным партнером (агентом), который, будучи встроенным в среду деятельности, расширяет человеческие возможности через воплощенное, адаптивное и социально обогащенное взаимодействие. ИИ-агенты становятся «метакогнитивными протезами», не заменяя, а усиливая человеческие возможности. Критерий успеха

в задачах восприятия, прогноза и действия – эмерджентная когнитивная синергия.

Данная концепция задает вектор развития интерфейсов, направленный на достижение интеллектуального симбиоза между человеком и технологической средой. Следующий шаг – переход от ПКИ к распределенным когнитивным экосистемам, где несколько операторов, ИИ и роботы образуют единую аутопоэтическую суперсистему с общей базой знаний и коллективным предсказательным полем.

Теоретико-методологический базис ПКИ, основанный на энактивной парадигме, имеет подтверждение в современных исследованиях по воплощенному познанию, предсказательной обработке, аффордансам, социальной энактивности, адаптивным интерфейсам и экологическому дизайну. Дальнейшая разработка концепции требует дополнительного критического анализа существующих интерфейсов через призму постулатов ПКИ и экспериментальных исследований для проверки гипотез о влиянии дизайна интерфейса на когнитивную нагрузку, обучаемость и производительность.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Сергеев С.Ф.** Инженерно-психологическое проектирование сложных эрготехнических сред: методология и технологии // Актуальные проблемы психологии труда, инженерной психологии и эргономики / Под ред. В. А. Бодрова, А. Л. Журавлева. Вып.1. М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2009. С. 429–449.
2. **Сергеев С.Ф.** Интеллектуальные симбиоты организованных техногенных средств управления подвижными объектами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. №9. С. 30–36. EDN RBP NAN.
3. **Сергеев С.Ф.** Интеллектуальные симбиоты в эргатических системах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 2 (84). С. 149–154. EDN PYRIRX.
4. **Сергеев С.Ф.** Интеллектуальный техносимбиоз в сложных человеко-машинных системах // Эргодизайн.

REFERENCES

1. **Sergeev S.F.** Engineering and Psychological Design of Complex Ergatic Environments: Methodology and Technologies. In: Bodrov V.A., Zhuravlev A.L., editors. Actual Problems of Labour Psychology, Engineering Psychology and Ergonomics. Issue 1. Moscow: Publishing House Institute of Psychology RAS; 2009. p. 429-449.
2. **Sergeev S.F.** Intelligent's Symbiotes Organized by Technogenic Environments in the Management of Mobile. Mechatronics, Automation, Control. 2013;(9):30-36.
3. **Sergeev S.F.** Symbionts of Intellects in Ergatic Systems. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2013;84(2):149-154.
4. **Sergeev S.F.** Intelligent Technosymbiosis in Complex Human-Machine Systems. Ergodesign. 2021;1(11):70-76. DOI 10.30987/2658-4026-2021-1-70-76.

2021. № 1 (11). С. 70–76. DOI 10.30987/2658-4026-2021-1-70-76. EDN SXGDYW.

5. **Сергеев С.Ф.** Человеческий фактор в самолетах 6-го поколения: проблемы техносимбиоза // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Vol. 19. № 12. Р. 806-811. DOI 10.17587/mau.19.806-811. EDN YQWBVDV.

6. **Сергеев С.Ф., Захаревич А.П.** Проблемы подготовки летно-операторского состава перспективных авиационных систем // Мир авионики. 2006. № 3. С. 58–62. EDN YMTVAN.

7. **Сергеев С.Ф., Захаревич М.А., Соколов В.Н.** Проблема подобию в тренажерах // Российский научный журнал. 2011. № 6 (25). С. 102–109. EDN OJQBIV.

8. **Сергеев С.Ф.** Иммерсивность, присутствие и интерактивность в обучающих средах // Школьные технологии. 2006. № 6. С. 36–42. EDN HUYWTJN.

9. **Сергеев С.Ф.** Обучающие и профессиональные иммерсивные среды. М.: Народное образование, 2009. 434 с. ISBN 978-5-87953-256-2.

10. **Сергеев С. Ф.** Эргономика иммерсивных сред: методология, теория, практика : специальность 19.00.03 "Психология труда, инженерная психология, эргономика" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора психологических наук / Сергеев Сергей Фёдорович. – Санкт-Петербург, 2010. – 42 с. – EDN ZOAZTL.

11. **Сергеев С.Ф.** Методология проектирования тренажеров с иммерсивными обучающими средами // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 1(71). С. 109-114. EDN NEAAKR.

12. **Гуров О.Н.** Переосмысление природы познания и опыта: энэктивизм в контексте современных технологических трансформаций // Технологос. 2024. № 4. С. 63–79. DOI 10.15593/perm.kipf/2024.4.05. EDN ZCFVHH.

13. **Станжевский Ф.А.** Понятие содержания сознания в контексте философии энэктивизма Сьюзан Херли // Манускрипт. 2021. Т. 14. № 1. С. 153-158. DOI 10.30853/mns200597. EDN EHRHOS.

14. **Varela, F. J., Thompson E., Rosch E.** The embodied mind, revised edition: Cognitive science and human experience. – MIT press, 2017. 388 p. ISBN 978-0262529365.

15. **Гибсон Дж.** Экологический подход к зрительному восприятию: М.: Прогресс, 1988. 461 с. ISBN 5-01-001049-6.

16. **Baber C.** Designing smart objects to support affording situations: Exploiting affordance through an understanding of forms of engagement. *Frontiers in psychology*. 2018;9:292. DOI 10.3389/fpsyg.2018.00292.

17. **Liao Y.C., Holz C.** Redefining Affordance via Computational Rationality. *Proceedings of the 30th International Conference on Intelligent User Interfaces*. 2025, p. 1188-1202. DOI 10.1145/3708359.3712114.

18. **De Jaegher H., Di Paolo E.** Participatory sense-making: an enactive approach to social cognition. *Phenomenology and the Cognitive Sciences*. 2007;6:485–507. DOI 10.1007/s11097-007-9076-9.

19. **Friston K.** Hierarchical models in the brain. *PLoS computational biology*. 2008;4(11). DOI 10.1371/journal.pcbi.1000211.

20. **Friston K.** The free-energy principle: a unified brain theory? *Nature reviews neuroscience*. 2010;11(2):127–138. DOI 10.1038/nrn2787.

21. **Sprevak M., Smith R.** An introduction to predictive processing models of perception and decision-making. *Topics*

5. **Sergeev S.F.** The Human Factor Aircraft of the 6th Generation: Problems of Technosymbiosis. *Mechatronics, Automation, Control*. 2018;19(12):806-811. DOI 10.17587/mau.19.806-811.

6. **Sergeev S.F., Zakharevich A.P.** Problems of Training Flight Operators of Advanced Aviation Systems. *Mir Avioniki*. 2006;(3):58-62.

7. **Sergeev S.F., Zakharevich M.A., Sokolov V.N.** The Similarity Problem in Simulators. *Russian Scientific Journal*. 2011;25(6):102-109.

8. **Sergeev S.F.** Immersiveness, Presence, and Interactivity in Learning Environments. *School Technologies*. 2006;(6):36-42.

9. **Sergeev S.F.** Educational and Professional Immersive Environments. Moscow: Narodnoe obrazovanie; 2009. 434 p.

10. **Sergeev S.F.** Ergonomics of Immersive Environments: Methodology, Theory, Practice. Abstract Thesis for the Degree of Doctor of Psychology. Saint Petersburg; 2010. 42 p.

11. **Sergeev S.F.** Methodology of Immersive Learning Environments Simulator Design. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2011;71(1):109-114.

12. **Gurov O.N.** Rethinking the Nature of Cognition and Experience: Enactivism in the Context of Modern Technological Transformations. *Tekhnologos*. 2024;4:63-79. DOI 10.15593/perm.kipf/2024.4.05.

13. **Stanzhevsky F.A.** Notion “Mental Content” in the Context of S. Hurler’s Enactivism. *Manuscript*. 2021;14(1):153-158. DOI 10.30853/mns200597.

14. **Varela, F. J., Thompson E., Rosch E.** The Embodied Mind, Revised Edition: Cognitive Science and Human Experience. MIT Press; 2017. 388 p.

15. **Gibson J.** The Ecological Approach to Visual Perception. Moscow: Progress; 1988. 461 p.

16. **Baber C.** Designing Smart Objects to Support Affording Situations: Exploiting Affordance Through an Understanding of Forms of Engagement. *Frontiers in Psychology*. 2018;9:292. DOI 10.3389/fpsyg.2018.00292.

17. **Liao Y.C., Holz C.** Redefining Affordance via Computational Rationality. In: *Proceedings of the 30th International Conference on Intelligent User Interfaces*. 2025, p. 1188-1202. DOI 10.1145/3708359.3712114.

18. **De Jaegher H., Di Paolo E.** Participatory Sense-Making: An Enactive Approach to Social Cognition. *Phenomenology and the Cognitive Sciences*. 2007;6:485–507. doi: 10.1007/s11097-007-9076-9.

19. **Friston K.** Hierarchical Models in the Brain. *PLoS Computational Biology*. 2008;4(11). DOI 10.1371/journal.pcbi.1000211.

20. **Friston K.** The Free-Energy Principle: A Unified Brain Theory? *Nature Reviews Neuroscience*. 2010;11(2):127-138. DOI 10.1038/nrn2787.

21. **Sprevak M., Smith R.** An Introduction to Predictive Processing Models of Perception and Decision-Making.

in Cognitive Science. 2023;15(4):667-690. DOI 10.1111/tops.12704.

22. **Chen B., Xing L., Zhao L.** Prediction model of commercial economic index based on BPNN optimization algorithm. 2020 International Conference on Computer Engineering and Application (ICCEA). IEEE, 2020, p. 529-532. DOI 10.1109/ICCEA50009.2020.00117.

23. **Keller G.B., Mrcic-Flogel T.D.** Predictive processing: a canonical cortical computation. *Neuron*. 2018;100(2):424-435. DOI 10.1016/j.neuron.2018.10.003.

24. **Millidge B., Seth A., Buckley C.L.** Predictive coding: a theoretical and experimental review. 2021. DOI 10.48550/arXiv.2107.12979.

25. **Sprevak M., Smith R.** An introduction to predictive processing models of perception and decision-making. *Topics in Cognitive Science*. 2023;15(4):667-690. DOI 10.1111/tops.12704.

26. **Gao Y., Song D., Liu L. et al.** Nested affordance-based intuitive design tool: Affordance interaction matrix // *Cogent Engineering*. 2023;10(1):2231723. DOI 10.1080/23311916.2023.2231723.

27. **Darejeh A.** A critical analysis of cognitive load measurement methods for evaluating the usability of different types of interfaces: guidelines and framework for Human-Computer Interaction DOI 10.48550/arXiv.2402.11820.

28. **Sweller J.** Cognitive load during problem solving: Effects on learning. *Cognitive science*. 1988;12(2):257-285. DOI 10.1207/s15516709cog1202_4.

29. **Liu Y., Gong Q., Gong X.** Research on interface design of meteorological cloud radars based on cognitive load theory. 2020 IEEE 3rd International Conference of Safe Production and Informatization (IICSPI). IEEE, 2020, p. 88-92. DOI 10.1109/IICSPI51290.2020.9332415.

30. **Maturana H.R., Varela F.J.** Autopoiesis and cognition: The realization of the living. Springer Science & Business Media, 2012. Vol. 42. 146 p. ISBN 978-94-009-8947-4

31. **Князева Е.Н.** Автопоэзис мысли // Вестник Томского государственного педагогического университета. 2008. № 1. С. 46–55. EDN JUIAON.

32. **Сергеев С.Ф.** Механизмы аутопоэзиса в системном базисе техногенного мира // Открытое образование. 2014. № 6. С. 8–14. EDN TJYSTF.

33. **Bianchini F.** Autopoiesis of the artificial: from systems to cognition. *BioSystems*. 2023;230:104936. DOI 10.1016/j.biosystems.2023.104936.

34. **Луман Н.** Что такое коммуникация? // Социологический журнал. 1995. № 3. С. 114-124. EDN UCSIHB.

35. **Clark A., Chalmers D.** The extended mind. *Analysis*. 1998;58(1):7-19. DOI 10.1093/analys/58.1.7.

36. **De Jaegher H., Di Paolo E., Gallagher S.** Can social interaction constitute social cognition? *Trends in cognitive sciences*. 2010;14(10):441-447.

37. **Di Paolo E., De Jaegher H.** The interactive brain hypothesis. *Frontiers in human neuroscience*. 2012;6:163. DOI 10.3389/fnhum.2012.00163.

38. **Kahl S., Kopp S.** Intertwining the social and the cognitive loops: socially enactive cognition for human-compatible interactive systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. 2023;378(1875):20210474. DOI 10.1098/rstb.2021.0474.

39. **Рябинин К.В., Белоусов К.И., Чуприна С.И. и др.** Перцептивно-когнитивный интерфейс для систем визуальной аналитики. Труды Международной конференции по компьютерной графике и зрению

Topics in Cognitive Science. 2023;15(4):667-690. DOI 10.1111/tops.12704.

22. **Chen B., Xing L., Zhao L.** Prediction Model of Commercial Economic Index Based on BPNN Optimization Algorithm. In: *Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Computer Engineering and Application (ICCEA)*; 2020 Mar18 – Mar 20: 2020. p. 529-532. DOI 10.1109/ICCEA50009.2020.00117.

23. **Keller G.B., Mrcic-Flogel T.D.** Predictive Processing: A Canonical Cortical Computation. *Neuron*. 2018;100(2):424-435. DOI 10.1016/j.neuron.2018.10.003.

24. **Millidge B., Seth A., Buckley C.L.** Predictive Coding: A Theoretical and Experimental Review; 2021. DOI 10.48550/arXiv.2107.12979.

25. **Sprevak M., Smith R.** An Introduction to Predictive Processing Models of Perception and Decision-Making. *Topics in Cognitive Science*. 2023;15(4):667-690. DOI 10.1111/tops.12704.

26. **Gao Y., Song D., Liu L., et al.** Nested Affordance-Based Intuitive Design Tool: Affordance Interaction Matrix. *Cogent Engineering*. 2023;10(1):2231723. DOI 10.1080/23311916.2023.2231723.

27. **Darejeh A.** A Critical Analysis of Cognitive Load Measurement Methods for Evaluating the Usability of Different Types of Interfaces: Guidelines and Framework for Human-Computer Interaction. DOI 10.48550/arXiv.2402.11820.

28. **Sweller J.** Cognitive Load During Problem Solving: Effects on Learning. *Cognitive Science*. 1988;12(2):257-285. DOI 10.1207/s15516709cog1202_4.

29. **Liu Y., Gong Q., Gong X.** Research on Interface Design of Meteorological Cloud Radars Based on Cognitive Load Theory. In: *The Proceedings of the 2020 IEEE 3rd International Conference of Safe Production and Informatization (IICSPI)*; 2020. p. 88-92. DOI 10.1109/IICSPI51290.2020.9332415.

30. **Maturana H.R., Varela F.J.** Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living. Volume 42. Springer Science & Business Media; 2012. 146 p.

31. **Knyazeva E.N.** Autopoiesis of Thought. *Tomsk State Pedagogical University Bulletin*. 2008;1:46-55.

32. **Sergeev S.F.** Mechanisms of Autopoiesis in the Systemic Basis Man-Made World. *Open Education*. 2014;6:8-14.

33. **Bianchini F.** Autopoiesis of the Artificial: From Systems to Cognition. *BioSystems*. 2023;230:104936. DOI 10.1016/j.biosystems.2023.104936.

34. **Luhmann N.** What is Communication? *Sociological Journal*. 1995;3:114-124.

35. **Clark A., Chalmers D.** The Extended Mind. *Analysis*. 1998;58(1):7-19. DOI 10.1093/analys/58.1.7.

36. **De Jaegher H., Di Paolo E., Gallagher S.** Can Social Interaction Constitute Social Cognition? *Trends in Cognitive Sciences*. 2010;14(10):441-447.

37. **Di Paolo E., De Jaegher H.** The Interactive Brain Hypothesis. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2012;6:163. DOI 10.3389/fnhum.2012.00163.

38. **Kahl S., Kopp S.** Intertwining the Social and the Cognitive Loops: Socially Enactive Cognition for Human-Compatible Interactive Systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. 2023;378(1875):20210474. DOI 10.1098/rstb.2021.0474.

39. **Ryabinin K.V., Belousov K.I., Chuprina S.I., et al.** Perceptual-Cognitive User Interface for Visual Analytics Systems. In: *Proceedings of the International Conference on*

"Графикон". 2019. № 29. С. 93-98. DOI 10.30987/graphicon-2019-1-93-98. EDN ZQTDZR.

40. **Pérez-Verdugo M., Barandiaran X.E.** Personal autonomy and (digital) technology: An enactive sensorimotor framework // *Philosophy & Technology*. 2023;36(4):84.

Computer Graphics and Vision "Graphicon". 2019; vol. 29. p. 93-98. DOI 10.30987/graphicon-2019-1-93-98.

40. **Pérez-Verdugo M., Barandiaran X.E.** Personal Autonomy and (Digital) Technology: An Enactive Sensorimotor Framework. *Philosophy & Technology*. 2023;36(4):84.

Информация об авторах:

Сергеев Сергей Федорович – заведующий НИЛ «Эргономика сложных систем» СПбПУ Петра Великого, доктор психологических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного университета, академик Российской инженерной академии, международные идентификационные номера автора: Scopus-Author ID 55953906000, Research-ID-Web of Science J-4844-2013, Author-ID-РИНЦ 509432.

Сергеев Алексей Викторович – начальник отдела ЦНИИ РТК, международные идентификационные номера автора: Scopus-Author ID 57219401217, Research-ID-Web of Science AAP-8420-2021, Author-ID-РИНЦ 985302.

Смирнова Екатерина Юрьевна – заместитель руководителя Научно-исследовательского центра ЦНИИ РТК, международные идентификационные номера автора: Scopus-Author ID 56559483300, Author-ID-РИНЦ: 814272.

Information about the authors:

Sergeev Sergey Fedorovich – Head of the Research Laboratory of Ergonomics of Complex Systems at Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Doctor of Psychology, Professor of Saint Petersburg State University, Academician of the Russian Engineering Academy, the author's international identifiers: Scopus-Author ID: 55953906000, Research-ID-Web of Science: J-4844-2013, Author-ID-RSCI: 509432.

Sergeev Aleksey Viktorovich – Head of the Department at the Central Research and Development Institute of Robotics and Technical Cybernetics, the author's international identifiers: Scopus-Author ID: 57219401217, Research-ID-Web of Science: AAP-8420-2021, Author-ID-RSCI: 985302.

Smirnova Ekaterina Yuryevna – Deputy Head of the Research Centre of Central Research and Development Institute of Robotics and Technical Cybernetics, the author's international identifiers: Scopus-Author ID: 56559483300, Author-ID- RSCI: 814272.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 09.04.2026; одобрена после рецензирования 23.04.2026; принята к публикации 24.04.2026. Рецензент – Обознов А.А., доктор психологических наук, профессор, член редакционного совета журнала «Эргодизайн»

The paper was submitted for publication on the 09th of April 2026; approved after the peer review on the 23rd of April 2026; accepted for publication on the 24th of April 2026. Reviewer – Oboznov A.A., Doctor of Psychology, Professor, member of the editorial board of the journal "Ergodesign".