

DOI: 10.18721/JE.11101

УДК 004.89

## РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ИНТЕЛЛЕКТА

**К.Л. Полупан, С.И. Корягин, П.М. Клачек**

Балтийский федеральный университет имени Канта,  
г. Калининград, Российская Федерация

Рассматриваются проблемы, связанные с развитием методов цифровой экономики на основе гибридного вычислительного интеллекта. Предлагается перспективный подход, имеющий междисциплинарный характер, находящийся на границе следующих направлений: гибридных интеллектуальных систем, синергетического искусственного интеллекта, нейро- и психофизиологии, философии, кибернетики, экономико-математического моделирования и т. д. Введено понятие «сложные слабо формализуемые многокомпонентные экономические системы» (ССМС), функционирующие в условиях неопределенности. Крайне актуальной является задача разработки методов и инструментариев гибридного экономико-математического моделирования ССМС и их практической реализации для построения гибридных интеллектуальных моделей (ГИМ) различных типов компонентных структур сложных экономических систем. Впервые предложено понятие гибридной интеллектуальной модели ССМС, имеющей универсальный характер, в которой для решения задачи используется совокупность методов интеллектуальной деятельности человека: аналитических моделей, экспертных систем, искусственных нейронных сетей, нечетких систем, генетических алгоритмов, имитационных статистических моделей. Представлена модель коллективного творческого процесса (КТП), свойственная широкому классу динамических проблемных областей, ставшая методологической основой гибридного моделирования ССМС. Модель КТП является формальной формой гибридного интеллекта, возникающей посредством связывания двух сущностей: задачи-системы и предполагаемого метода ее решения. Полученные результаты позволили сформулировать концептуальную модель первичного структуриатора ГИМ, которая представляет основу для достаточного простого и прозрачного структурирования и моделирования ССМС, а также архитектуру функциональной гибридной интеллектуальной многоагентной системы с самоорганизацией, сочетающей положительные качества гибридных интеллектуальных систем поддержки принятия решений (ГИСППР) и многоагентных систем. Применение новых методов нейрофизиологии и нейровизуализации процесса мышления при моделировании ССМС, а также авторского подхода к оценке эффективных связей между активными областями мозга человека по экспериментальным данным позволили подтвердить эффективность и универсальность предложенного подхода. В настоящее время проведено успешное применение предлагаемых в работе методов и прикладных инструментариев создания ГИСППР при организации обеспечения комплексной стратегией управления предприятием в сельском хозяйстве, машиностроении, авиастроении, водных экосистемах и т. д. Работы в этой области активно продолжаются.

**Ключевые слова:** системы поддержки принятия решений; экономико-математическое моделирование; искусственный интеллект; цифровая трансформация

**Ссылка при цитировании:** Полупан К.Л., Корягин С.И., Клачек П.М. Развитие методов цифровой экономики на основе гибридного вычислительного интеллекта // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2018. Т. 11, № 1. С. 9–18. DOI: 10.18721/JE.11101

## DEVELOPMENT OF DIGITAL ECONOMY METHODS BASED ON HYBRID COMPUTING INTELLIGENCE

K.L. Polypan, S.I. Koryagin, P.M. Klachek

Baltic Federal University of Immanuel Kant, Kaliningrad, Russian Federation

The paper deals with the problems associated with the development of digital economy methods based on hybrid computing intelligence. We have offered a promising approach of interdisciplinary nature, dealing with such areas as hybrid intellectual systems, synergetic artificial intelligence, neuro and psychophysiology, philosophy, cybernetics, economic and mathematical modeling, etc. The notion of complex, poorly formalized multi-component economic systems (CPFMCEs) functioning in conditions of uncertainty is introduced. At present, the task of developing methods and tools for hybrid economic and mathematical modeling of CPFMCEs and their practical implementation for building hybrid intellectual models (HIMs) of various types of component structures of complex economic systems is extremely important. The concept of a hybrid intellectual model of the CPFMCEs with a universal character is offered for the first time, using a set of methods of human intellectual activity (analytical models, expert systems, artificial neural networks, fuzzy systems, genetic algorithms, and simulation statistical models) to solve a problem. A model of the collective creative process (CCP) is typical for a wide class of dynamic problem areas, which has become the methodological basis of hybrid CPFMCE modeling. The CCP model is a formal type of hybrid intelligence, arising through the binding of two entities: the system problem and the proposed method for its solution. The obtained results allowed to formulate a conceptual model of a primary HIM constructor, which provides the basis for a fairly simple and transparent structuring and modeling of CPFMCEs, as well as the architecture of a functional hybrid intelligent multi-agent system with self-organization that combines the positive qualities of hybrid decision support systems and multi-agent systems. Using new methods of neurophysiology and neuroimaging of the thinking process in CPFMCE modeling, as well as the approach we have devised for evaluating effective connections between the active regions of the human brain on the basis of experimental data, we have confirmed the effectiveness and versatility of the proposed approach. Currently, the methods and applied tools proposed in the study have been successfully used in the development of hybrid intelligent decision support systems for generating comprehensive enterprise management strategies, in agriculture, engineering, aircraft building, water ecosystems, etc. Research is flourishing in this area.

**Keywords:** decision support systems; economic and mathematical modeling; artificial intelligence; digital transformation

**Citation:** P.K. Polypan, S.I. Koryagin, P.M. Klachek, Development of digital economy methods based on hybrid computing intelligence, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics, 11 (1) (2018) 9–18. DOI: 10.18721/JE.11101

*Введение.* В соответствии с системно-интеграционной теорией предприятия, предложенной профессором Клейнером [1–5], сегодня для повышения качества принимаемых решений в условиях обеспечения комплексной стратегией управления экономическими системами [2–5], являющейся основой цифровой экономики, возникает необходимость все шире применять современные информационные технологии [9, 15–16].

Как показывает опыт, сквозное проникновение информационных технологий во все отрасли экономики как в качестве цифровых

(нематериальных) активов, так и в форме промышленного Интернета вещей и т. д., обуславливает формирование больших массивов экономически значимых отраслевых и межотраслевых данных. В условиях цифровой экономики данные становятся формой капитала, и по мере того, как люди, бизнес и оборудование становятся все более тесно связанными в формате единого цифрового пространства, цифровая трансформация экономики предлагает широкие возможности, в первую очередь, для новых моделей принятий решений. Качественный рост экономики в условиях цифро-

вой экономики возможен на основе применения современных компьютерных систем принятия решений [9], позволяющих максимально возможно точно оценивать текущее состояние рынков и отраслей, а также осуществлять эффективное прогнозирование их развития и быстро реагировать на изменения в конъюнктуре национальных и мировых рынков. При этом точность решений, полученных на основе подобных систем, зависит от того, насколько аналитические методы преобладают над эвристическими [9, 10].

Таким образом, множество производственно-экономических задач, возникающих в условиях обеспечения комплексной информационной стратегии управления экономическими системами как основой цифровой экономики, условно можно разделить на три класса [6]: формализуемые, трудно формализуемые и не формализуемые. Как показали исследования, большинство производственно-экономических задач можно отнести к классу трудно формализуемых задач, основными характеристиками которых являются [8, 9]: большое количество параметров, оказывающих влияние на поведение производственно-экономических систем, относительно которых вырабатывается решение; большие объемы разнотипных данных, в среде которых функционирует производственно-экономическая система; сложность в определении основных закономерностей поведения производственно-экономических систем, хотя априори известно, что такие закономерности существуют и определен состав информативных переменных.

Таким образом, возникает необходимость в современных условиях цифровой трансформации экономических систем [7–9] сращивания математических методов с эвристическими методами и информационными технологиями [7–9], что приводит к идее применения гибридного вычислительного интеллекта (ГВИ) и созданных на его основе интеллектуальных систем поддержки принятия решений. Среди исследований в области ГВИ следует отметить работы А.В. Колесникова, В.М. Курейчика, Г.С. Осипова, Э.В. Попова, Д.А. Поспелова, Н.Г. Ярушкиной и других ученых, подробно представленные в [7–9]. Несмотря на активные исследования в этой области, все еще остаются недостаточно проработанными вопросы интеграции и эффективного управления формализуемыми и слабо формализуемыми знаниями, а также во-

просы программной реализации созданных на основе методов ГВИ компьютерных систем управления знаниями.

Таким образом, целью исследования является развитие, в современных условиях цифровой трансформации экономических систем, методов ГВИ, а также создание на их основе прикладных гибридных интеллектуальных систем поддержки принятия решений (ГИСППР) для управления экономическими системами, ориентированных на интеграцию и управление формализуемыми и слабо формализуемыми знаниями на основе методов гибридного моделирования, и программной реализации на основе гибридных многоагентных систем.

*Методика и результаты исследования.* В настоящее время во многих странах осуществляется переход от индустриального общества, характеризуемого жестким разделением труда, к постиндустриальному, информационному, обществу, в основе которого лежат идеи В.И. Вернадского о развитии ноосферы, т. е. «сферы разума» [1, 9, 16].

Таким образом, происходит бурное развитие и внедрение новых моделей предприятий XXI в. на основе реинжиниринга [1, 9, 12], применения современных информационных технологий, систем автоматизированного проектирования и т. д., что неизбежно приводит к пересмотру многих традиционных аксиом организации предприятий. Новая аксиоматика предприятий XXI в. [1, 9] предполагает, в первую очередь, внедрение новых системно-интеграционных методов комплексного управления экономическими системами, в том числе на основе широкого применения методов и инструментариев цифровой трансформации, одним из центральных технологических элементов которой являются системы поддержки принятия решений.

Многочисленные исследования и эксперименты [9, 10], проведенные в различных предметных областях, связанных с созданием СППР при решении производственно-экономических задач, возникающих в условиях применения системно-интеграционных методов управления предприятиями, показали необходимость кардинального пересмотра традиционных подходов к построению экономико-математических моделей сложных экономических систем и созданию на их основе принципиально новых компьютерных систем поддержки принятия решений.

В 2012 г. на Международной конференции «Гибридные и синергетические интеллектуальные системы: теория и практика (ГИСИС-2012)» (Россия, г. Калининград. Конференция проводилась при поддержке РФФИ, грант № 12-07-06042г) нами впервые были предложены и получили широкое одобрение теоретические основы гибридного вычислительного интеллекта [9] как новой, прорывной, методологии моделирования сложных, в том числе экономических систем и создаваемых на его основе гибридных интеллектуальных систем поддержки принятия решений. Фактически, речь шла о создании принципиально нового класса систем поддержки принятия решений, с когнитивной структурой [8, 9, 16], способных обеспечить на качественно ином уровне возможность эволюции прикладных экономико-математических моделей сложных экономических систем.

Гибридный вычислительный интеллект – это взаимосвязанная совокупность аналитических моделей, экспертных систем, искусственных нейронных сетей, нечетких систем, генетических алгоритмов, имитационных статистических моделей, представляющая инструмент синергетического искусственного интеллекта, предназначенный для моделирования эффектов взаимодействия, самоорганизации, адаптации, наблюдаемых в сложных технических, экономических, социальных и других системах [9, 10].

Предложенная в [9] концепция «мягкого» математического моделирования сложных систем на основе ГВИ предполагает, что только синергетическая комбинация (когнитивная коррекция методом генезиса знаний [9]) базовых аналитических зависимостей эвристическими знаниями и мягкими вычислениями достигает полного спектра когнитивных и вычислительных возможностей (способностей), присущих как компьютерной системе, так и человеку (доказательство данного положения представлено в [10]).

В [9] предложена архитектурно-технологическая модель ГВИ:

$$(E^u, E^L, dm) \xrightarrow{\text{met}^u} \dot{m}, \quad (1)$$

где  $E^u = \langle E^L, \Pi^u, \Pi^h, \Psi_1, \Psi_2 \rangle$  – модель проблемной среды [10];  $E^L = \langle \hat{S}, L^p, \Phi \rangle$  – модель

предметной области [10],  $\hat{S} = \{S_1, S_2, S_3\}$  – множество страт задачи-системы [10],  $L^p$  – семейство языков описания производных отношений,  $\Phi$  – соответствие вида  $\Phi \subseteq L^p \times \hat{S} | \Phi \neq \emptyset$ ;

$\Pi^u = \{\pi_1^u, \dots, \pi_{N_u}^u\}$  – множество декомпозиций задачи-системы  $\pi^u$  [10],  $\Pi^h = \{\pi_1^h, \dots, \pi_{N_h}^h\}$  – множество подзадач, входящих в состав исходной задачи-системы  $\pi^u$  ( $\forall \pi_i^u \exists \Pi^h = \{\pi_1^h, \dots, \pi_{N_h}^h\}$ ,

$i = 1, \dots, N_{\Pi}, \forall i (N_h = \text{var } y) \pi_i^u \in \Pi^u$ ),  $\Psi_1$  – соответствие вида  $\Psi_1 \subseteq \Pi^u \times \hat{S}$ ,  $\Psi_2$  – соответствие вида  $\Psi_2 \subseteq \hat{\Pi}^h \times \hat{S} | \hat{\Pi}^h = \bigcup_i^{N_{\Pi}} \Pi_i^h$ , причем, более

чем одна  $\pi^h$  может принадлежать  $S_i | i = 1, \dots, 3$ ;

$dm = \{dm_1^u, \dots, dm_{N_u}^u\}$  – базовая аналитическая модель, для которой выполняется соответствие вида  $\Psi_3 \subseteq \Pi^u \times dm$ ;  $\dot{m} = \{\Xi^u, \text{met}^3, R^A\}$  – гибридная вычислительная модель,  $\Xi^u$  – многозначное отображение гибридной вычислительной модели [10], получаемое на основе применения  $\text{met}^3$  – алгоритма функций «генезиса знаний» [10],  $R^A = \{\alpha^1, \dots, \alpha^7\}$  – множество функциональных компонент (автономных операторов) [10], где  $\alpha^1$  – аналитические вычисления,  $\alpha^2$  – нейровычисления,  $\alpha^3$  – нечеткие вычисления,  $\alpha^4$  – рассуждения на основе опыта,  $\alpha^5$  – эволюционные вычисления,  $\alpha^6$  – статистические вычисления,  $\alpha^7$  – логические рассуждения.

Для формального описания гибридной вычислительной схемы (ГВС) [10], построенной на основе гибридной вычислительной модели (1), введем понятие «элемент» – ресурс ГВС. Множество элементов –  $RES^3 \subseteq RES$ . Элемент ГВС моделирует решение подзадачи, исходной задачи-системы или выполняет вспомогательные операции, строится в соответствии с множеством функциональных компонент  $\text{met}^3$  и имеет свойства  $PR^3 \subseteq PR$ , наиболее важные из которых – «вход»  $pr^{3i}$ , «выход»  $pr^{3o}$  и «состояние»  $st^3$ . Для моделирования поведения системы во времени введем понятие «задержка»  $z(-k)$ , где  $k$  – величина задержки, т.е.  $R(x(t), x(t))^{z(-k)} = R(x(t), x(t+k))$ . Тогда концептуальную модель элемента ГВС  $res_n^3$ ,

$n = 1, \dots, N$ , где  $N$  – число элементов  $met^3$ , представим следующим образом:

$$\begin{aligned} \alpha_n^3 = & R_1^{res\ met} (res^3, met^3) R_1^{res\ pr} (res^3, pr^{3i}) \times \\ & \times R_1^{res\ pr} (res^3, pr^{3o}) R_1^{res\ st} (res^3, st^3) \times \\ & \times R_1^{st\ st} (st^3(t), st^3(t))^{z(-1)} \times \\ & \times R_1^{pr\ st} (pr^{3i}(t), st^{3p}(t))^{z(-1)} R_1^{pr\ pr} (st^3(t), pr^{3o}(t)). \end{aligned} \quad (2)$$

где  $(R_1^{st\ st})^{z(-1)}$  и  $(R_1^{pr\ st})^{z(-1)}$  – отношения «состояние – состояние» и «вход – состояние» ( $R_1^{st\ pr}$  – отношение «состояние – выход»). Концептуальная модель ГВС, построенная на основе гибридной вычислительной модели (1):

$$\begin{aligned} \alpha^u = & R_1^{res\ met} (res_A^u, met^u) R_1^{res\ pr} (res_A^u, pr^{ui}) \times \\ & \times R_1^{res\ pr} (res_A^u, pr^{uo}) R_1^{res\ st} (res_A^u, st^u) \times \\ & \times R_1^{st\ st} (x^{up}(t), x^{up}(t))^{z(-1)} \times \\ & \times R_1^{pr\ st} (pr^{ui}(t), st^u(t))^{z(-1)} R_1^{st\ pr} (st^{up}(t), pr^{uo}(t)) \times \\ & \times R_1^{res\ res} (RES^3, RES^3) R_1^{pr\ pr} (pr^{ui}, PR^{3i}) \times \\ & \times R_2^{pr\ pr} (PR^{3o}, pr^{uo}), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $res_A^u$  – агрегат-ГВС [10] как ресурс решения задачи-системы  $\pi^u$ ;  $RES^3$  – множество как минимум из двух элементов  $res^3$ , построенных в соответствии со схемой (1);  $(R_1^{st\ st})^{z(-1)}$ ,  $(R_1^{pr\ st})^{z(-1)}$ ,  $R_1^{st\ pr}$  – отношения функционирования ГВС;  $R_1^{res\ res}$  – отношения интеграции элементов из множества  $RES^3$ ;  $R_1^{pr\ pr}$  – отношения между входами ГВС и входами элементов;  $R_2^{pr\ pr}$  – отношения между выходами элементов и выходами ГВС. Отношения функционирования ГВС  $(R_1^{st\ st})^{z(-1)}$ ,  $(R_1^{pr\ st})^{z(-1)}$ ,  $R_1^{st\ pr}$  не задаются априори, а фиксируются при функционировании агрегата.

В [9, 10] подробно представлена технология создания ГИСППР на основе (1), которая включает двадцать одну технологическую операцию, а также инструментальная среда разработки, состоящая из 14 пакетов прикладных программ.

В [10] введено понятие «сложные слабо формализуемые многокомпонентные эконо-

мические системы» (ССМС), функционирующие в условиях неопределенности. Теоретико-множественное представление указанного класса сложных систем реализовано также в [8–10]. В настоящее время крайне актуальной остается проблема разработки методов и инструментариев гибридного моделирования ССМС [10] и их практической реализации для построения гибридных интеллектуальных моделей (ГИМ) различных типов компонентных структур сложных экономических систем. Гибридная интеллектуальная модель ССМС – модель, имеющая универсальный характер, функционирующая в условиях реального времени и основанная на принципах интеллектуальной деятельности человека [10].

В [9] представлена модель коллективного творческого процесса (КТП), присущего большому классу динамических проблемных областей, ставшая методологической основой гибридного моделирования ССМС на основе ГИСППР. Модель КТП является формальным изображением гибридного интеллекта [10], возникающего посредством связывания двух сущностей: задачи-системы в общем случае (и ее декомпозиция в частном) и метода ее решения. Полученные результаты позволили сформулировать концептуальную модель первичного конструктора ГИМ (рис. 1) [10], которая представляет основу для достаточно простого и прозрачного структурирования и моделирования ССМС.

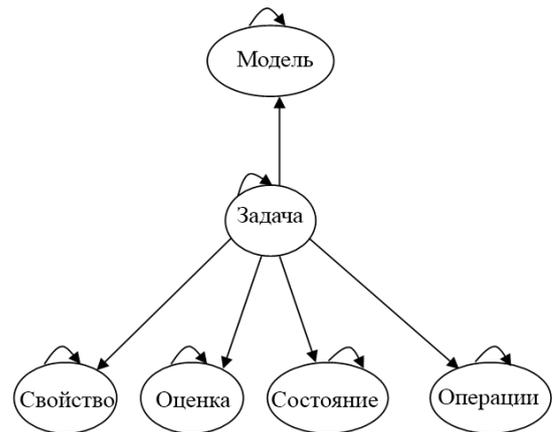
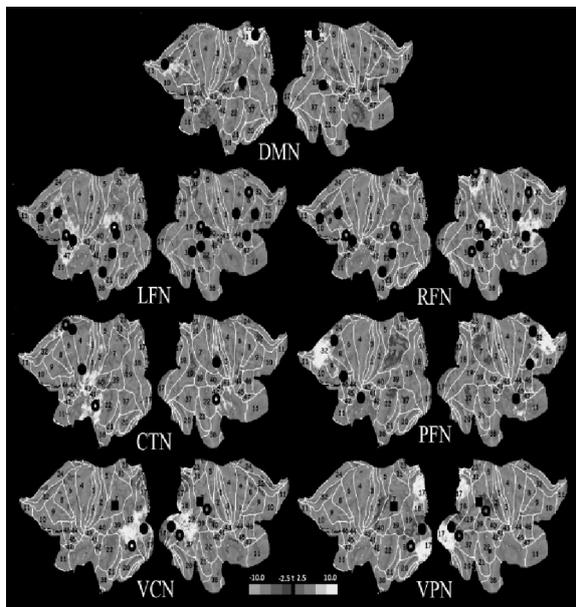


Рис. 1. Концептуальная модель первичного конструктора гибридных интеллектуальных моделей

Fig. 1. The conceptual model of the primary designer of hybrid intelligent models

Применение новых методов нейрофизиологии и нейровизуализации процесса мышления [10] при моделировании ССМС, а также авторского подхода к оценке эффективных связей между активными областями мозга человека по экспериментальным данным [10] позволили подтвердить эффективность и универсальность предложенного метода. На основе экспериментов и анализа крупномасштабных функциональных сетей мозга человека, связанных с заданием (ТВН) (рис. 2) [10], разработана усовершенствованная концептуальная модель первичного конструктора ГИМ, подробно представленная в [10], позволившая ввести макро- и микроуровневое представление ГИМ сложных, многокомпонентных систем.



**Рис. 2.** Пример визуализации сети, связанной с заданием (ТВН)

Эксперимент 29, моделирование продуктивной умственной деятельности при анализе ультрасложных систем (более  $10^7$  элементов).

Обозначения: DMN – дефолтная, LFN – левая фронтально-париетальная, RFN – правая фронтально-париетальная, CTN – центрально-височная, PFN – префронтальная, VCN – зрительная центральная, VPN – зрительная периферическая

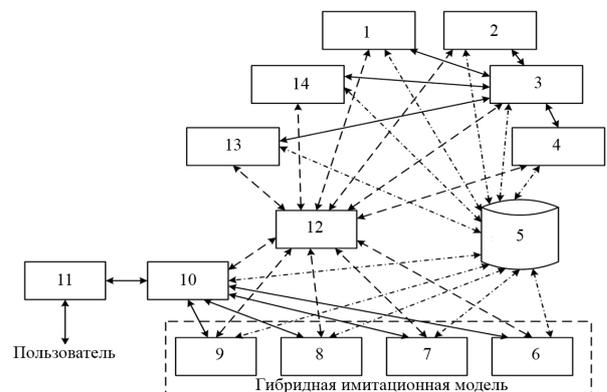
**Fig. 2.** An example of a network-related visualization of a job (ТВН)

Experiment 29, modeling of productive mental activity in the analysis of ultra complex systems (more than  $10^7$  elements)  
 Designations: DMN – default, LFN – left frontal parietal, RFN – right frontal parietal, CTN – central-temporal, PFN – prefrontal, VCN – visual central, VPN – visual peripheral

Этот перспективный подход задуман нами на «границе» междисциплинарных направлений, таких как гибридные системы, синергетический искусственный интеллект, философия, нейро- и психофизиология, и лежит «в плоскости» самоорганизации коллективов, вырабатывающих и принимающих решения в сложных ситуациях, в условиях неопределенности и неполноты информации [10].

На основе изучения комплекса математических и компьютерных моделей корковой активации [10] сформулированы правила склеивания первичных конструкторов ГИМ и основы теории аналогий [9], позволяющие строить схемы (любого уровня сложности) ролевых концептуальных моделей ГИМ [10].

Существенным преимуществом предложенного подхода стала возможность быстрого перехода к автоматизированному процессу разработки ГИМ на основе многоагентных систем (МАС) [9, 10, 12–14, 17]. На рис. 3 представлена архитектура функциональной гибридной интеллектуальной многоагентной системы с самоорганизацией (ГИИМАС) [9, 10].



**Рис. 3.** Архитектура функциональной гибридной интеллектуальной многоагентной системы с самоорганизацией:

1 – логический агент, 2 – нечеткий агент, 3 – агент-преобразователь, 4 – лингвистический агент, 5 – модель предметной области, 6 – агент поиска решения 4, 7 – агент поиска решения 3, 8 – агент поиска решения 2, 9 – агент поиска решения 1, 10 – агент принимающий решения, 11 – интерфейсный агент, 12 – агент-посредник, 13 – аналитический агент, 14 – стохастический агент

**Fig. 3.** The architecture of a functional hybrid intelligent multi-agent system with self-organization:

1 – Logical agent, 2 – Fuzzy agent, 3 – Agent converter, 4 – Linguistic agent, 5 – System model, 6 – Search agent solutions 4, 7 – Search agent solutions 3, 8 – Search agent solutions 2, 9 – Search agent solutions 1, 10 – Interface agent, 11 – Agent decision-making, 12 – Agent middleman, 13 – Analysis agent, 14 – Stochastic agent

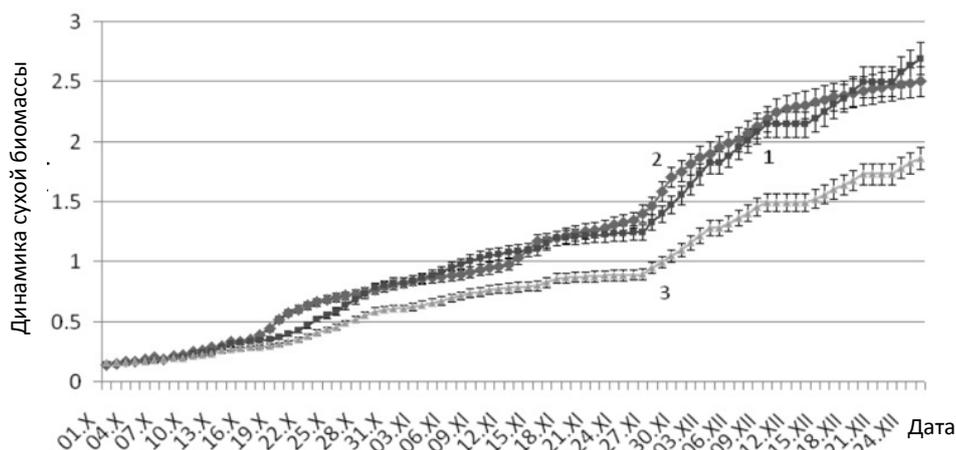
Подробно архитектура и назначение каждого из агентов и подсистем ГИИМАС представлены в [9, 10]. Архитектура сочетает положительные качества ГИСППР и МАС систем, позволяя расширить автономию элементов ГИСППР, реализовать механизмы возникновения взаимодействий, определить набор методов решения задач агентами МАС и т. д. [10].

*Эксперименты.* Для апробации теории и технологии создания гибридных интеллектуальных систем поддержки принятия решений на основе (1) выбрана важная народнохозяйственная задача моделирования продуктивности и управления агроэкосистемами [11] на уровне отдельных сельскохозяйственных предприятий России. В [11] агроэкосистема представлена как большая, сверхсложная многокомпонентная система, функционирующая в условиях неопределенности и неполноты информации. В России наиболее детальная отечественная имитационная модель агроэкосистемы сельскохозяйственных растений и созданная на ее основе компьютерная система принятия решений – «SOYMOD» [11]. С математической точки зрения модель представляет собой систему из нескольких десятков уравнений в частных производных параболического типа и нескольких десятков обыкновенных дифференциальных уравнений. Отдельные блоки системы «SOYMOD» подробно описаны в [11]. Каждый из блоков представляет собой описание группы одно-

родных физических, биофизических, биохимических или физиологических процессов в отдельных частях системы *почва–растение–атмосфера*. Система SOYMOD слишком сложна и не используется на практике, но является отличным эталоном для сравнения с другими подобными системами. На основе представленной на рис. 3 архитектуры гибридной интеллектуальной многоагентной системы с самоорганизацией разработана система (комплекс программ) гибридного имитационного моделирования и управления агроэкосистемами S1-ГИИМАС(АГРО). Система S1-ГИИМАС(АГРО) и патентные данные входящих в ее состав программных комплексов представлены в [18–20]. Экспериментальная проверка S1-ГИИМАС(АГРО) проводилась в ООО им. Ладушкина (РФ), крупнейшей агрофирме Калининградской области. С результатами экспериментов можно ознакомиться в [9, 10].

Для проверки адекватности S1-ГИИМАС(АГРО) проводилось сравнение с данными, полученными на основе системы SOYMOD. На рис. 4 представлен показательный пример моделирования динамики сухой биомассы, рассчитанной по модели S1-ГИИМАС(АГРО), фактической и рассчитанной по модели СИМОНА.

Отличие результатов моделирования по S1-ГИИМАС(АГРО) от фактических данных не превышает 10 %, у системы SOYMOD этот показатель более 20 %.



**Рис. 4.** Динамика сухой биомассы, рассчитанная по модели S1-ГИИМАС(АГРО) (1), фактической (2) и модели SOYMOD (3)

**Fig. 4.** Dynamics of dry biomass, calculated by the S1-GIIMAS model (AGRO) (1), actual (2) and SOYMOD (3) models

Система S1-ГИИМАС(АГРО) проста в использовании, настройках, имеет приемлемую стоимость и по результатам семинаров, проведенных со специалистами ведущих агрофирм Калининградской области в 2004–2017 гг., может успешно использоваться на практике, обеспечивая [9, 10]:

- 1) уменьшение на 7–14 % ошибки в прогнозе урожайности сельскохозяйственных культур при благоприятных агроклиматических условиях возделывания;
- 2) уменьшение на 20–34 % ошибки в прогнозе при сложных агроклиматических условиях возделывания;
- 3) увеличение на 7 % урожайности сельскохозяйственных культур;
- 4) снижение простоев рабочих по организационным причинам на 40–60 %;
- 5) снижение на 5–8 % простоев техники и оборудования;
- 6) сокращение расходов материальных ресурсов (горюче-смазочных материалов, удобрений, семян и т. д.) на 30–50 %;
- 7) прирост прибыли на 18–21 %, а в отдельных случаях и до 27–38 % на 1 га;
- 8) снижение в 5–9 раз затрат на подготовку необходимой технологической документации.

*Выводы.* Таким образом, успешное внедрение гибридных интеллектуальных систем поддержки принятия решений на основе модели (1) ГВИ в одной из самых сложных производственно-экономических предметных областей – сельскохозяйственной деятельности подтверждает перспективность теории и технологии их создания и применения при решении комплексов производственно-экономических задач, возникающих в условиях обеспечения комплексной стратегии управления экономической системой.

Открывая путь новой научной дисциплине – инженерии знаний [8], группа ученых под руководством Дж. Вейценбаума (США) выдвинула гипотезу, что человек хорошо решает задачи благодаря своим профессиональным знаниям [8]. Их достаточно перенести в компьютер, чтобы и он стал решать практические задачи. Так родились экспертные системы [8]. Можно выдвинуть другую гипотезу – человек хорошо решает сложные задачи благодаря коллективным усилиям в системах поддержки принятия решений, а чтобы компьютер решал подобные задачи, нужно научиться имитировать в его памяти работу коллектива людей над практической проблемой. На этом пути родились гибридные интеллектуальные системы, в частности гибридные интеллектуальные системы поддержки принятия решений. Именно они и рассмотрены в данной статье.

Впервые представлены методологические основы создания гибридных интеллектуальных многоагентных систем с самоорганизацией на основе междисциплинарного подхода. Этот перспективный подход задуман авторами статьи на «границе» гибридных систем, синергетического искусственного интеллекта, нейро- и психофизиологии, философии, кибернетики, экономико-математического моделирования и лежит «в плоскости» самоорганизации коллективов, вырабатывающих и принимающих решения в сложных производственно-экономических ситуациях.

В настоящее время проведено успешное применение гибридных интеллектуальных многоагентных систем с самоорганизацией при организации обеспечения комплексной стратегией управления экономической системой масштаба предприятия, в сельском хозяйстве, машиностроении, авиастроении, водных экосистемах и т. д. [9, 10]. Работы в этой области активно продолжаются.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Клейнер Г.Б. Экономика. Моделирование. Математика: избранные труды / Рос. акад. наук, Центр. экон.-математ. ин-т. М.: ЦЭМИ РАН, 2016. 856 с.
- [2] Клейнер Г.Б. Устойчивость российской экономики в зеркале системной экономической теории. Ч. 2 // Вопросы экономики. 2016. № 1. С. 117–138. – WoS, Scopus.
- [3] Клейнер Г.Б. Устойчивость российской экономики в зеркале системной экономической теории. Ч. 1 // Вопросы экономики. 2015. № 12. С. 107–123. – WoS, Scopus.
- [4] Клейнер Г.Б. Государство – регион – отрасль – предприятие: каркас системной устойчивости экономики России. Ч. 2 // Экономика региона. 2015. № 3. С. 9–17. – Scopus.
- [5] Клейнер Г.Б. Государство – регион – отрасль – предприятие: каркас системной устойчивости экономики России. Ч. 1 // Экономика региона. 2015. № 2. С. 50–58. – Scopus.

- [6] **Гаврилова Т.А.** Базы знаний интеллектуальных систем. СПб.: Питер, 2001, 457 с.
- [7] **Колесников А.В.** Гибридные интеллектуальные системы: Теория и технология разработки. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. 711 с.
- [8] **Колесников А.В., Кириков И.А.** Методология и технология решения сложных задач методами функциональных гибридных интеллектуальных систем. М.: ИПИ РАН, 2007. 387 с.
- [9] **Клачек П.М., Корягин С.И., Лизоркина О.А.** Интеллектуальная системотехника. Калининград: Изд-во БФУ им. И. Канта, 2015. 244 с.
- [10] **Koryagin S., Klachek P., Koryagin E., Kulakov A.** The Development Of Hybrid Intelligent Systems On The Basis Of Neurophysiological Methods And Methods Of Multi-Agent Systems // in Conf. Rec. 2016 IEEE int. First International Conference on Data Stream Mining & Processing. 2016. P. 95–102. – Scopus.
- [11] **Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Топаж А.Г.** Модели производственного процесса сельскохозяйственных культур. СПб.: Изд-во СПбУ, 2008. 470 с.
- [12] **Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д., Васенин В.А., Борисов В.А., Роганов В.А.** Агент-ориентированные модели: мировой опыт и технические возможности реализации на суперкомпьютерах // Вестник Российской академии наук. 2016. Т. 86, № 3. С. 252–262.
- [13] **Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д.** Технология поддержки агент-ориентированного моделирования для суперкомпьютеров // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2016. № 1 (334). С. 4–16.
- [14] **Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д.** Агент-ориентированная социо-эколого-экономическая модель региона // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2015. № 3 (288). С. 2–11.
- [15] **Макаров В.Л.** Эволюция экономической теории: воспроизводство, технологии, институты : матер. X Междунар. симп. по эволюционной экономике и методологии семинара по институциональной и эволюционной экономике. СПб.: Алетейя, 2015. 320 с. Разд. III. Экономические системы и социальное моделирование: Инструменты социального моделирования расширяют возможности научного анализа. С. 88–92.
- [16] **Макаров В.Л., Варшавский А.Е.** Наука, высокотехнологичные отрасли и инновации. Гл. 20. Экономика России // Оксфордский сборник. Кн. 2. М.: Изд-во Ин-та Гайдара, 2015.
- [17] **Makarov V., Bakhtizin A.** The New Form of Mixed Economy with Rationing: Agent-Based Approach // Open Journal of Social Sciences. 2014. No 2. P. 191–196. DOI: 10.4236/jss.2014.24019.
- [18] Интеллектуальная программная среда для создания систем интеллектуального моделирования и управления сложными био-производственными комплексами «DSE-ИМС-BPS» / Лизоркина О.А., Клачек П.М., Корягин С.И. и др. (РФ). Свид-во о гос. регистр. прогр. для ЭВМ № 2014612445; заявка № 2013613960 от 24.03.14; дата гос. регистр. в реестре программ для ЭВМ от 20.09.2014.
- [19] Интеллектуальная система поддержки принятия решений по управлению сложными био-производственными комплексами «IDSS-BPS» / Клачек П.М., Корягин С.И., Лизоркина О.А. и др. (РФ). Свид-во о гос. регистр. прогр. для ЭВМ № 2013618823; заявка № 2013613960 от 13.05.13; дата гос. регистр. в реестре программ для ЭВМ 2013618823 от 18.09.2014.
- [20] Интеллектуальная система оперативного планирования и управления агропромышленным производством в системе точного земледелия («ГИИС АГРО») / Лизоркина О.А., Клачек П.М., Корягин С.И. и др. (РФ). Свид-во о гос. регистр. прогр. для ЭВМ № 2014612445; заявка № 2013613960 от 24.03.14; дата гос. регистр. в реестре программ для ЭВМ от 20.09.2014.

**ПОЛУПАН Ксения Леонидовна.** E-mail: klp281280@mail.ru  
**КОРЯГИН Сергей Иванович.** E-mail: SKoryagin@kantiana.ru  
**КЛАЧЕК Павел Михайлович.** E-mail: pklachek@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 13.12.2017*

## REFERENCES

- [1] **G.B. Kleiner,** Ekonomika. Modelirovanie. Matematika: izbrannye trudy. Ros. akad. nauk, Tsentr. ekon.-matemat. in-t, Moscow, TsEMI RAN, 2016.
- [2] **G.B. Kleiner,** Ustoichivost' rossiiskoi ekonomiki v zerkale sistemnoi ekonomicheskoi teorii. Ch. 2, Voprosy ekonomiki, 1 (2016) 117–138. – WoS, Scopus.
- [3] **G.B. Kleiner,** Ustoichivost' rossiiskoi ekonomiki v zerkale sistemnoi ekonomicheskoi teorii. Ch. 1, Voprosy ekonomiki, 12 (2015) 107–123. – WoS, Scopus.
- [4] **G.B. Kleiner,** Gosudarstvo – region – otrasl' – predpriatie: karkas sistemnoi ustoichivosti ekonomiki Rossii. Ch. 2, Ekonomika regiona, 3 (2015) 9–17. – Scopus.
- [5] **G.B. Kleiner,** Gosudarstvo – region – otrasl' – predpriatie: karkas sistemnoi ustoichivosti ekonomiki Rossii. Ch. 1, Ekonomika regiona, 2 (2015) 50–58. – Scopus.
- [6] **T.A. Gavrilova,** Bazy znaniy intellektual'nykh sistem, St. Petersburg, Piter, 2001.

- [7] **A.V. Kolesnikov**, *Gibridnye intellektual'nye sistemy: Teoriia i tekhnologiya razrabotki*, St. Petersburg, Izd-vo SPbGTU, 2001.
- [8] **A.V. Kolesnikov, I.A. Kirikov**, *Metodologiya i tekhnologiya resheniia slozhnykh zadach metodami funktsional'nykh gibridnykh intellektual'nykh system*, Moscow, IPI RAN, 2007.
- [9] **P.M. Klachek, S.I. Koriagin, O.A. Lizorkina**, *Intellektual'naiia sistemotekhnika*, Kaliningrad, Izd-vo BFU im. I. Kanta, 2015.
- [10] **S. Koryagin, R. Klachek, E. Koryagin, A. Kulakov**, *The Development Of Hybrid Intelligent Systems On The Basis Of Neurophysiological Methods And Methods Of Multi-Agent Systems*, in Conf. Rec. 2016 IEEE int. First International Conference on Data Stream Mining & Processing, (2016) 95–102. – Scopus.
- [11] **R.A. Poluektov, E.I. Smoliar, V.V. Terleev, A.G. Topazh**, *Modeli produktsionnogo protsessa sel'skokhoziaistvennykh kul'tur*, St. Petersburg, Izd-vo SPbU, 2008.
- [12] **V.L. Makarov, A.R. Bakhtizin, E.D. Sushko, V.A. Vasenin, V.A. Borisov, V.A. Roganov**, *Agent-orientirovannye modeli: mirovoi opyt i tekhnicheskie vozmozhnosti realizatsii na superkomp'iuterakh*, Vestnik Rossiiskoi akademii nauk, 86 (3) (2016) 252–262.
- [13] **V.L. Makarov, A.R. Bakhtizin, E.D. Sushko**, *Tekhnologiya podderzhki agent-orientirovannogo modelirovaniia dlia superkomp'iuterov*, Natsional'nye interesy: priority i bezopasnost', 1 (334) (2016) 4–16.
- [14] **V.L. Makarov, A.R. Bakhtizin, E.D. Sushko**, *Agent-orientirovannaia sotsio-ekologo-ekonomicheskaiia model' regiona*, Natsional'nye interesy: priority i bezopasnost', 3 (288) (2015) 2–11.
- [15] **V.L. Makarov**, *Evoliutsiia ekonomicheskoi teorii: vosproizvodstvo, tekhnologii, instituty : mater. X Mezhdunar. simp. po evoliutsionnoi ekonomike i metodologii seminarov po institutsional'noi i evoliutsionnoi ekonomike*. SPb.: Aleteiia, 2015. Razd. III. Ekonomicheskie sistemy i sotsial'noe modelirovanie: Instrumenty sotsial'nogo modelirovaniia rasshiriaut vozmozhnosti nauchnogo analiza, 88–92.
- [16] **V.L. Makarov, A.E. Varshavskii**, *Nauka, vysokotekhnologichnye otrasli i innovatsii*. Gl. 20. *Ekonomika Rossii, Oksfordskii sbornik*. Kn. 2, Moscow, Izd-vo In-ta Gaidara, 2015.
- [17] **V. Makarov, A. Bakhtizin**, *The New Form of Mixed Economy with Rationing: Agent-Based Approach*, *Open Journal of Social Sciences*, 2 (2014) 191–196. DOI: 10.4236/jss.2014.24019.
- [18] *Intellektual'naiia sreda dlia sozdaniia sistem intellektual'nogo modelirovaniia i upravleniia slozhnymi bio-proizvodstvennymi kompleksami «DSE-IMC-BPS»*. Lizorkina O.A., Klachek P.M., Koriagin S.I. i dr. (RF). Svid-vo o gos. registr. progr. dlia EVM № 2014612445; zaiavka № 2013613960 ot 24.03.14; data gos. registr. v reestre programm dlia EVM ot 20.09.2014.
- [19] *Intellektual'naiia sistema podderzhki priniatiia reshenii po upravleniiu slozhnymi bio-proizvodstvennymi kompleksami «IDSS-BPS»*. Klachek P.M., Koriagin S.I., Lizorkina O.A. i dr. (RF). Svid-vo o gos. registratsii progr. dlia EVM № 2013618823; zaiavka № 2013613960 ot 13.05.13; data gos. registr. v reestre programm dlia EVM 2013618823 ot 18.09.2014.
- [20] *Intellektual'naiia sistema operativnogo planirovaniia i upravleniia agropromyshlennym proizvodstvom v sisteme tochnogo zemledeliia («GIIS AGRO»)*. Lizorkina O.A., Klachek P.M., Koriagin S.I. i dr. (RF). Svid-vo o gos. registr. progr. dlia EVM № 2014612445; zaiavka № 2013613960 ot 24.03.14; data gos. registr. v reestre programm dlia EVM ot 20.09.2014.

**POLYPAN Kseniia L.** E-mail: klp281280@mail.ru  
**KORYAGIN Sergei I.** E-mail: SKoryagin@kantiana.ru  
**KLACHEK Pavel M.** BE-mail: pklachek@mail.ru