

УДК 004.83

**А. В. Колесников**

Балтийский федеральный университет им. И. Канта  
Россия, 236016, г. Калининград, ул. А.Невского, 14  
Калининградский филиал Федерального исследовательского центра  
«Информатика и управление» Российской академии наук  
Россия, 236022, г. Калининград, ул. Гостиная, 5

## ИСКУССТВЕННЫЕ ГЕТЕРОГЕННЫЕ СИСТЕМЫ, ПОДДЕРЖИВАЮЩИЕ ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ

**A. V. Kolesnikov**

Immanuel Kant Baltic Federal University  
14 A. Nevskogo Str., Kaliningrad 236041, Russian Federation  
Kaliningrad Branch of the Federal Research Center "Computer Science and Control"  
of the Russian Academy of Sciences  
5 Gostinaya Str, Kaliningrad 236000, Russian Federation

## ARTIFICIAL HETEROGENEOUS DECISION SUPPORT SYSTEMS

**О. В. Колесников**

Балтійський федеральний університет ім. І. Канта  
Росія, 236016, м. Калінінград, вул. О. Невського, 14  
Калінінградська філія Федерального дослідного центру «Інформатика і управління» РАН  
Росія, 236022, м. Калінінград, вул. Гостинна, 5

## ШТУЧНІ ГЕТЕРОГЕННІ СИСТЕМИ, ЩО ПІДТРИМУЮТЬ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

В статье рассматривается свойство гетерогенности естественных и искусственных систем. Предлагаются модели, отображающие гетерогенность систем поддержки принятия решений. Представлен краткий обзор работ Калининградской школы в Калининградском государственном техническом университете, Балтийском федеральном университете им. И. Канта, Калининградском филиале Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук и Санкт-Петербургском государственном политехническом университете по искусственным гетерогенным системам для поддержки принятия решений.

**Ключевые слова:** гетерогенность, система поддержки принятия решений, гибридная интеллектуальная система.

The article deals with the heterogeneity of natural and artificial systems. Models that represent the heterogeneity of decision support systems are proposed. A brief overview of the work on artificial heterogeneous decision support systems of the Kaliningrad School in the Kaliningrad State Technical University, Immanuel Kant Baltic Federal University, the Kaliningrad branch of the Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences and the St. Petersburg State Polytechnic University is presented.

**Keywords:** heterogeneity, decision support system, hybrid intelligent system.

У статті розглядається властивість гетерогенності природних і штучних систем. Пропонуються моделі, що відображають гетерогенність систем підтримки ухвалення рішень. Представлений короткий огляд робіт Калінінградської школи в Калінінградському державному технічному університеті, Балтійському федеральному університеті ім. І. Канта, Калінінградської філії Федерального дослідницького центру «Інформатика і управління» Російській академії наук і Санкт-Петербурзькому державному політехнічному університеті по штучних гетерогенних системах для підтримки прийняття рішень.

**Ключові слова:** гетерогенність, система підтримки прийняття рішень, гібридна інтелектуальна система.

## Введение

Двадцатый век принес в искусственный интеллект (ИИ) «свежий ветер» перемен социальной в смысле М. Минского и системной в смысле В. Б. Тарасова парадигм, исходящих из факта, что отдельно взятая технология ИИ обладает как преимуществами, так и недостатками, и только в продуманной комбинации методов и моделей может возникнуть эмерджентность и синергетический эффект, когда дополнительность и сотрудничество сведут к минимуму частные недостатки и позволят автоматизировано решать сложные задачи принятия решений. Перемены коснулись терминологии, теории, методологии, технологии и практики ИИ. В 1966 г. W. Witsenhausen предложил модель гибридной системы; в 1978-м Н. П. Бусленко приступил к разработке унифицированных, междисциплинарных, комбинированных методов и моделей: агрегатов и агрегативных систем. В 1987 – 1993 гг. L. Tavernini, A. Nerode, W. Kohn, J. Antsaklis, J. Stiver, M. D. Lemmon, A. Back, J. Guckenheimer, M. A. Myers и R. W. Brockett разработали базовые модели гибридных систем. Их развитие в сторону многокомпонентности и связности выполнили M. S. Branicky, V. S. Bonkar и S. K. Mitter в 1994 г. В этом же году A. Puri и P. Varaija определили гибридную систему из координируемых компонент – гибридных автоматов. В 1996 г. G. Walsh построил формализм сети гибридных систем. В 1983 – 1986 гг. Я. А. Гельдфандбейн, А. В. Колесников и И. Д. Рудинский разработали многомодельную семиотическую систему, Д. А. Поспелов и А. Н. Борисов ввели понятие гибридных экспертных систем, а Г. В. Рыбина развила концепцию интегрированных экспертных систем. Гибридные интеллектуальные системы (ГиИС) были анонсированы в 1994 – 1995 гг. в работах L. Medsker и, по существу, совпадали с интеллектуальными гибридными системами S. Gootinalake и S. Khebbal (1997), гибридными интегрированными системами (2001), гибридными интеллектуальными адаптивными системами N. Kasabov, R. Kozma (1998). В 1998 г. Г. С. Осипов рассмотрел гибридные системы с дискретной частью, основанной на знаниях. В 1997 г. В. Н. Вагин и А. П. Еремеев предложили для поддержки принятия решений семиотическую систему распределенного интеллекта. В том же году С. В. Астанин и В. Г. Захаревич построили модель системы гибридного интеллекта, а в 1998 г. В. Б. Тарасов определил нечеткую эволюционную многоагентную систему. В 1998 г. специалисты компании Филипс ввели понятие интеллектуальной среды (интеллектуального пространства). В 1998 г. Ю. Р. Валькман построил исчисление моделей. История гибридизации изложена в [1].

На рубеже XX – XXI веков знания о гибридизации в информатике изучены, обобщены и опубликованы в работах А. Н. Борисова [3], А. В. Гаврилова [4], И. А. Кирикова [5–7], А. В. Колесникова [1]; [2]; [5–9], Д. А. Поспелова [10], Г. В. Рыбиной [11], В. Б. Тарасова [12], Н. Г. Ярушкиной [13]; [14], S. Goonatilake и S. Khebbal [15], L. Medsker [16]. В России сложилось несколько школ в этой области междисциплинарных знаний: школы Д. А. Поспелова – В. Б. Тарасова, В. Н. Вагина – А. П. Еремеева, Г. В. Рыбиной в Москве, школа Н. Г. Ярушкиной в Ульяновске и школа В. Ф. Пономарева – А. В. Колесникова в Калининграде.

**Цели настоящей работы:** 1) сделать контрастным для специалистов по информатике фундаментальное свойство окружающего мира, исследуемое нами уже более 30 лет; 2) отобразить в моделях гетерогенность для релевантности информационных интеллектуальных систем оригиналу, а их консультации по качеству делать не хуже, чем предлагают коллективы, принимающие решения в сложных задачах; 3) дать краткий обзор работ Калининградской школы ИИ по искусственным гетерогенным системам для поддержки принятия решений.

## 1 Актуальность новой, четвертой научной картины мира

Люди всегда стремились понять мир, в котором они живут. Степень понимания определяется их мировоззрением и картиной мира. В ИИ понятию «картина мира» соответствует термин «модель внешнего мира» Д. А. Поспелова и М. Г. Гаазе-Раппопорта [10]: человек познает окружающую его действительность через призму своей уникальной модели внешнего мира. Известно основополагающее влияние принятой в обществе научной картины мира на гибридизацию в информатике.

Первая картина мира основывается на классической физике без наблюдателя. Объект полностью и однозначно определяется конечным набором параметров во времени. Пространство безгранично, абсолютно и однородно, изотропно. Время выражает длительность бытия; уравнения механики И. Ньютона и электродинамики Д. К. Максвелла обратимы.

Вторая картина мира строится на вероятностно-статистических представлениях А. Эйнштейна – Н. Бора. Причинность для категории части и целого не сводится к лапласовскому детерминизму. Пространство может быть любой размерности и геометрии. Время – поставленная наблюдателем отметка события, характеризующая последовательность смены состояний или длительность чего-либо.

Третья картина мира утверждает, что нельзя доверять обилию показателей или закону больших чисел: нет «средних значений», нет «равенства», каждая «особь» индивидуальна. В планировании и технике наблюдаются расхождения расчетов с реализацией, возникают допуски. Пространство и время неоднородны.

Многие ученые утверждают, что мир стоит на пороге смены парадигмы управления природой и обществом, модели жизнедеятельности.

Новая картина мира складывается из многочисленных теорий и взглядов: «ноосфера», «разумный мир» (В. И. Вернадский, Н. Н. Моисеев, А. В. Поздняков); «мир диалектики» – мир диалога разных логик (Е. Л. Доценко); социальная парадигма искусственного интеллекта (“The society of mind”) М. Минского; системно-организационный подход в ИИ В. Б. Тарасова; теория иерархических многоуровневых систем М. Месаровича, Д. Мако и И. Такахары; мир НЕ-факторов А. С. Нариньяни; гибридный интеллект в психологии и эргономике В. Ф. Венды; «спектроглобус» В. П. Грибашева – и укладывается в семь постулатов: 1) квантово-волновой характер описания мира, признание факта неоднородности (гетерогенности) мира и любого объекта, разнообразия жизни; 2) неопределенность границ объектов и связь «всего со всем»; 3) относительность любой иерархии; она должна сочетаться с горизонтальными связями; 4) принцип дополнительности и сотрудничества; 5) полицентризм; 6) принцип относительности знания; введение в описание явления системы координат наблюдателя для снижения относительности и неопределенности; 7) принцип соответствия управления сложности объекта.

Подчеркнем фундаментальные категории (свойства) новой, четвертой, картины мира: гетерогенность, разнообразие, дополнительность, сотрудничество и относительность знания.

## 2 Категориальный базис новой картины мира

Гетерогенная система (от греч. *heteros* – разный, *genos* – рождать) – неоднородная система из однородных частей, разделенных поверхностью раздела, разрывами в непрерывности физических свойств. Термин применяют в физике и химии для исследования естественных, природных систем и создания искусственных объектов и сред с полезными для человека свойствами.

Разнообразие – признак, проявление гетерогенности, общесистемная категория верхнего уровня абстракции общих свойств предметов и явлений окружающего мира. Результаты исследования разнообразия С. Биром, У.Р. Эшби, В. М. Глушковым составили фундамент кибернетики, теории управления, системного анализа и информатики. В частности, У.Р. Эшби утверждал, что только разнообразие может уничтожить разнообразие. Это достигается организацией и самоорганизацией. Сегодня организация ассоциируется с вертикалью управления, а самоорганизация с горизонталью – системами коллективного интеллекта.

Принцип дополнительности (от англ. *complementary* – дополнительный, добавочный) ввел в науку Н. Бор. Две взаимоисключающие картины микромира: энергетически-импульсная и пространственно-временная, получаемые при взаимодействии микрообъекта с измерительными приборами, – дополняют друг друга. В информатике дополнительность выразили М. Месарович, Д. Мако и И. Такахага в стратифицированной системе, т. е. в совокупности взглядов на один и тот же объект с разных профессиональных точек зрения.

Концепция сотрудничества «выигрываем вместе» – порождение восточного, японского стиля мышления, до настоящего времени противоположность западного мышления: «я выиграл – ты проиграл». В ИИ сотрудничают методы, модели, технологии, агенты, обладающие плюсами и минусами. Цель взаимодействия – найти выигрышную стратегию вместе, коллективно. Принципы дополнительности и сотрудничества отражены в интегрированных, гибридных, синергетических интеллектуальных системах и роевом интеллекте.

Относительность знания в науке ассоциируется с субъективностью познания и необходимостью учитывать характеристики структуры реальности, при которых эти знания были получены. В ИИ относительность знания трактуют в терминах стратификации: не надо стремиться к единственной и поэтому заведомо сложной и нерелевантной оригиналу модели. Полезнее множество простых моделей – страт с индивидуальными и субъективными мнениями экспертов.

### 3 Естественные гетерогенные системы

Ниже на рис. 1 показана малая часть примеров естественных гетерогенных систем разного уровня наших представлений о них. Актуальность исследований и полученных для приведенных на рис. 1 объектов-оригиналов не вызывает сомнений.



Рисунок 1 – Примеры естественных гетерогенных систем:

- а* – область космоса NGC 6357; *б* – звезда Солнце; *в* – солнечный свет как взаимодействие волн с разной частотой; *г* – головной мозг человека; *д* – коллективный интеллект, принимающий решения

Калининградская школа исследует коллективный интеллект [1; 5 – 9].

### 4 Искусственные гетерогенные системы

Искусственные гетерогенные системы (ИГС) создаются в разных сферах деятельности, используя междисциплинарные знания для получения объектов с полезными свойствами. На рис. 2 приведены примеры ИГС.

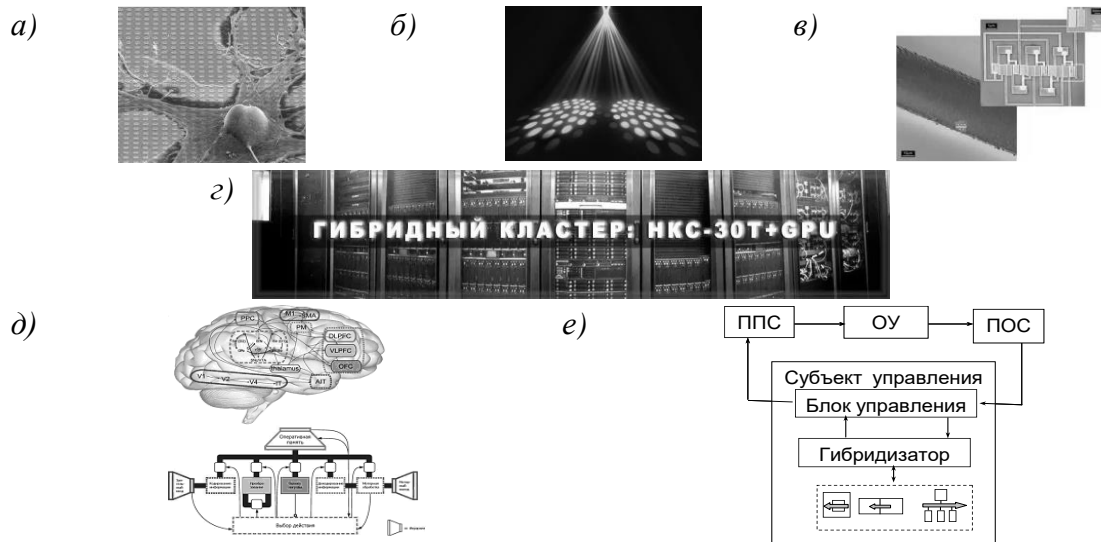


Рисунок 2 – Примеры искусственных гетерогенных систем:  
 а – гибрид микросхемы и нейрона крысы; б – светодиод для преобразования электрической энергии в световую; в – наномикросхема в сравнении с человеческим волосом; г – гетерогенный кластер Сибирского отделения РАН; д – искусственный мозг человека *Spaun* канадских специалистов; е – гибридная адаптивная система управления А. В. Колесникова

Значимые подходы, релевантные естественным гетерогенным системам, открыты в физике квантово-механических систем и биомолекулярной химии, физиологии и медицине, за крупные достижения в которых вручены Нобелевские премии.

## 5 Математические модели искусственных гетерогенных систем в информатике для поддержки принятия решений

К ИГС отнесем: гибридные системы, агрегаты и агрегативные системы, много-модельные системы, интегрированные экспертные и синергетические системы, ГиИС и эмерджентные модели. Ниже рассмотрены гибридные системы, а также ГиИС и синергетические системы Калининградской школы.

*Гибридная система* – записанная на математическом языке комбинация двух методов, один из которых имеет преимущества в моделировании непрерывных процессов, а другой – дискретных. Ранний результат – модель гибридной системы [17]:

$$H_w = \langle M, \Omega, f, d, \omega, J \rangle, \quad (1)$$

где  $M, \Omega$  – дискретные пространства состояний и выходов соответственно;  $f: M \times \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}^n$  – непрерывная функция;  $\mathcal{R}$  – множество действительных чисел;  $\mathcal{R}^n$  – пространство непрерывных состояний размерности  $n$ ;  $d: M \times J \rightarrow M$  – дискретная функция перехода, вычисляющая значение дискретной компоненты состояния, когда значение непрерывной компоненты достигло переходного множества;  $\omega: M \rightarrow \Omega$  – функция выхода и  $J \in P(\mathcal{R}^n)$  – множество переходных множеств.

Ниже представлен гибридный автомат:

$$H = (L, D, J, \mu, \Delta), \quad (2)$$

где  $L$  – множество управляющих позиций;  $D$  – связь дифференциального уравнения  $D(l)$  с позицией  $l \in L$ ;  $J \subset L \times \mathcal{R}^n$  – множество начальных состояний;  $\mu$  – связь

условия инвариантности  $\mu(l) \subset \mathfrak{R}^n$  с позицией  $l$ ;  $\Delta \subset L \times \Phi \times \Lambda \times L$  – множество ребер:  $e = (l, \phi, \lambda, l') \in \Delta$  – ребро из позиции  $l$  в позицию  $l'$ , помеченное условием необходимости  $\phi \in \Phi$  и отношением инициализации  $\lambda \in \Lambda$ .

*Гибридная система с координацией* состоит из компонентов (2) с координацией между ними. *Координация* – произведение компонентов  $H_i, i = 1, \dots, M$ :

$$H = H_1 \otimes \dots \otimes H_M. \quad (3)$$

*Агрегаты и агрегативные системы.* Агрегат  $A_n$  воспринимает входные  $x(t)$ , выдает выходные  $\phi \in \Phi$  сигналы, находится в состоянии  $z(t)$  и задается выражением:

$$A_n = \langle T, X, Y, Z, Z^Y, H, U, G \rangle, \quad (4)$$

где  $T$  – множество моментов времени;  $X, Y, Z$  – множества входных, выходных сигналов и состояний  $x(t) \in X, y(t) \in Y, z(t) \in Z$ ;  $Z^Y$  – система подмножеств  $Z$ ;  $H$  – множество собственных параметров  $h(t) \in H$ ;  $U, G$  – операторы переходов и выходов.

Агрегат находится в особых и не особых состояниях. Из первых он переходит в новое скачком. Оно вычисляется случайным оператором  $U$ , а случайный оператор  $G$  определяет принадлежность текущего состояния  $Z^Y$  и значение выходного сигнала. Сложная динамическая система редуцируется и формализуется агрегативной системой

$$A_N = \langle [X_i^n]_N, [Y_{ji}^n]_N, R \rangle, \quad (5)$$

где  $[X_i^n]_N = \bigcup_{n=0}^N [X_i^n]$ ,  $[Y_{ji}^n]_N = \bigcup_{n=0}^N [Y_{ji}^n]$  – множества входных и выходных контактов;

$R$  – оператор сопряжения.

*Многомодельная система*

$$H_{GKR} = \langle K, S, J_\mu \rangle \quad (6)$$

определена как объект из  $N..2$  компонентов  $K = \{k_i\} \mid i \in \overline{2, N}$ , использующих знания из семантической памяти  $S$  и связанных с ней и между собой межмодельным интерфейсом  $J_\mu$ . Компонент  $k_i \in K$  – функциональная подсистема, реализующая один из  $N$  включенных в  $H_{GKR}$  методов моделирования.

*Функциональная гибридная интеллектуальная система (ФГиИС)* – записанная в аксиоматической теории схем ролевых концептуальных моделей [4] система, для решения задачи использующая несколько методов имитации интеллектуальной деятельности человека. Крупнозернистые ФГиИС для решения гетерогенной задачи  $prb^u$  специфицируются следующей схемой ролевых концептуальных моделей:

$$\begin{aligned} res_A^u &= R_1^{res\ met} (res_A^u, met^u) \circ R_1^{res\ pr} (res_A^u, pr^{ui}) \circ R_1^{res\ pr} (res_A^u, pr^{uo}) \circ \\ &\circ R_1^{res\ st} (res_A^u, st^u) \circ R_1^{st} (st^u(t), st^u(t+1)) \circ R_1^{pr\ st} (pr^{ui}(t), st^u(t+1)) \circ \\ &\circ R_1^{st\ pr} (st^{up}(t), pr^{uo}(t)) \circ R_1^{res\ res} (RES^\circ, RES^\circ) \circ R_1^{pr\ pr} (pr^{ui}, PR^{si}) \circ R_2^{pr\ pr} (PR^\circ, pr^{uo}), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $t$  – модельное время,  $t = 0, 1, 2, 3, \dots$ ;  $\circ$  – конкатенация;  $res_A^u$  – ГиИС, ресурс решения неоднородной задачи;  $met^u$  – интегрированный метод решения  $prb^u$ ;  $pr^{ui}$  –

исходные данные  $DAT^u$  [4] задачи  $prb^u$ , передаваемые на вход одного или нескольких элементов  $res^3$  из декомпозиции  $prb^u$  задачи  $prb^u$ ;  $pr^{uo}$  – выход одного или нескольких элементов  $res^3$  из декомпозиции  $prb^u$  как цель  $GL^u$  решения задачи  $prb^u$ ;  $st^u(t)$  – состояние ГиИС;  $RES^3$  – непустое множество, состоящее как минимум из двух элементов  $res^3$ ;  $PR^{3i}$ ,  $PR^{3o}$  – множества свойств «вход» и «выход» элементов из  $RES^3$  соответственно;  $R_1^{st}$ ,  $R_1^{pr}$ ,  $R_1^{pr}$  – отношения функционирования ГиИС;  $R_1^{res}$  – отношения интеграции [4] элементов;  $R_1^{pr}$  – отношения между входами ГиИС и входами элементов;  $R_2^{pr}$  – отношения между выходами элементов и выходами ГиИС. Элемент  $res^3$  решает подзадачи или выполняет вспомогательные операции методом  $met^3$  и имеет свойства  $PR^3 \subseteq PR$ , наиболее важные из которых – «вход»  $pr^{3i}$ , «выход»  $pr^{3o}$ , а также «состояние»  $st^{3i}$ .

Схема элемента ГиИС выглядит следующим образом:

$$res^3 = R_1^{res\ met} (res^3, met^3) \circ R_1^{res\ pr} (res^3, pr^{3i}) \circ R_1^{res\ pr} (res^3, pr^{3o}) \circ R_1^{res\ st} (res^3, st^3) \circ R_1^{st\ st} (st^3(t), st^3(t+1)) \circ R_1^{pr\ st} (pr^{3i}(t), st^3(t+1)) \circ R_1^{st\ pr} (st^3(t), pr^{3o}(t)), \quad (8)$$

где  $R_1^{st\ st}$ ,  $R_1^{pr\ st}$ ,  $R_1^{st\ pr}$  – отношения «состояние – состояние», «вход – состояние», «состояние – выход» соответственно. На множестве  $MET^3 = \{met_y^3 \mid y=1, \dots, N_{met}\}$  автономных методов различаются  $met_1^3$  – аналитические вычисления;  $met_2^3$  – нейро- и  $met_3^3$  – нечеткие вычисления;  $met_4^3$  – рассуждения на основе опыта;  $met_5^3$  – эволюционные;  $met_6^3$  – статистические вычисления;  $met_7^3$  – логические рассуждения.

Функциональная гибридная интеллектуальная система с координацией – новый класс искусственных гетерогенных систем [8]. Его описание получено расширением модели (7), (8). Координация контролирует промежуточные состояния решения подзадач  $prb^h$  [8], т. е. результаты элементов  $res^3$ , и изменяются свойства «вход»  $pr^{3i}$  одного или нескольких элементов  $res^3$ . Для учета этого факта в (7), (8) введена тройка  $R_1^{st\ pr} (st^u(t), pr^{ui}(t+1))$ . Иными словами, по состоянию  $st^u(t)$  ФГиИС меняются исходные данные  $pr^{ui}(t+1)$  для ФГиИС в момент времени  $t+1$ . Множество  $R_1^{st\ pr}$  устанавливает отношения между состоянием  $st^u(t)$  гибрида  $res_A^u$  (7) на данный момент модельного времени  $t$  и состоянием входов элементов  $res^3$  на следующем шаге. Для изменения входов  $pr^{3i}$  элементов  $res^3$  в (8) введена тройка  $R_1^{st\ act} (st^u, act^{3k})$ , где  $ACT^{3k} = \{act_1^{3k\ \alpha}, \dots, act_{N_{pr}}^{3k\ \alpha}\}$  – координирующие действия в базе знаний  $B_{ext}$ . Множество  $R_1^{st\ act}$  – отношения состояния  $st^u$  ФГиИС  $res_A^u$  в момент времени  $t$  и необходимых координирующих действий  $ACT^{3k}$ .

Ниже приведена схема крупнозернистых ФГиИС с координацией

$$res_A^u = res_A^u \circ R_1^{st\ pr} (st^u(t), pr^{ui}(t+1)) \quad (9)$$

и модифицированная схема элемента ФГиИС

$$res^3 = res^3 \circ R_1^{st\ act} (st^u, act^{3k}). \quad (10)$$

Отношения  $R_1^{st\ pr}$  и  $R_1^{st\ act}$  не задаются априори, а так же, как и  $R_1^{st\ st}$ ,  $R_1^{pr\ st}$ ,  $R_1^{st\ pr}$ , фиксируются при работе ФГиИС и решении  $k$ -задачи  $prb^h$  [8].

Гибридная интеллектуальная многоагентная система (ГиИМАС) совмещает преимущества многоагентных и ГиИС, моделирует самоорганизацию коллектива экспертов и определяется выражениями:

$$himas = \langle AG^*, env, INT^*, ORG, \{so^{goa}\} \rangle, \quad (11)$$

$$AG^* = \{ag_1, \dots, ag_n, ag^{dm}\}, \quad (12)$$

$$INT^* = \{prot, lang, ont, rcl\}, \quad (13)$$

$$ORG = ORG_{coop} \cup ORG_{neut} \cup ORG_{comp}, ORG_{coop} \cap ORG_{neut} = \emptyset, \quad (14)$$

$$ORG_{coop} \cap ORG_{comp} = \emptyset, ORG_{comp} \cap ORG_{neut} = \emptyset, \quad (14)$$

$$act_{himas} = \left( \bigcup_{ag \in AG^*} act_{ag} \right) \cup act_{ia} \cup act_{ac} \cup act_{col}, \quad (15)$$

$$act_{ag} = (MET_{ag}, IT_{ag}), ag \in AG^*, \left| \bigcup_{ag \in AG^*} IT_{ag} \right| \dots 2, \quad (16)$$

$$ag = ag \vee himas, \quad (17)$$

где  $AG^*$  – множество агентов  $ag$ , моделей экспертов, включая агента, принимающего решения (АПР), –  $ag^{dm}$ ;  $n$  – число агентов-экспертов;  $env$  – концептуальная модель внешней среды ГиИМАС;  $INT^*$  – элементы структурирования взаимодействий агентов:  $prot$  – протокол взаимодействия;  $lang$  – язык сообщений;  $ont$  – модель предметной области;  $rcl$  – классификатор отношений агентов: нейтралитет, конкуренция и сотрудничество;  $ORG$  – множество архитектур ГиИМАС ( $ORG_{coop}$  – с сотрудничающими;  $ORG_{neut}$  – с нейтральными и  $ORG_{comp}$  – с конкурирующими агентами);  $\{so^{goa}\}$  – множество концептуальных моделей макроуровневых процессов в ГиИМАС:  $so^{goa}$  – модель самоорганизации на основе анализа целей;  $act_{himas}$  – функция ГиИМАС в целом;  $act_{ag}$  – функция агента из множества  $AG^*$ ;  $act_{ia}$  – функция «анализ взаимодействий» АПР  $ag^{dm}$ ;  $act_{ac}$  – функция «выбор архитектуры» АПР  $ag^{dm}$ ;  $act_{col}$  – динамически конструируемая коллективная функция ГиИМАС, определяемая архитектурой  $org$ ;  $met_{ag}$  – метод решения задачи;  $it_{ag}$  – интеллектуальная технология метода  $met_{ag}$ .

## 6 Опыт разработки искусственных гетерогенных систем для поддержки принятия решений

Модели (6) – (17) реализованы Калининградской школой лабораторными прототипами и экспериментально апробированы на данных реальных организаций.

Для решения задачи управления транспортным узлом морского рыбного порта разработана ГиИС с использованием авторской технологии конвейерного моделирования естественных гетерогенных систем Visual Event 2.0 [1]. Несмотря на относительную простоту, она дает возможность получить и использовать информацию полезную для системы управления транспортным узлом. Исследования влияния стратегий управления на пропускную способность погрузо-разгрузочного комплекса в морском порту были выполнены в 1998 – 2000 гг. Наблюдения за анимационной картинкой поведения порта и детальный анализ собираемой в ходе имитации информации показали, что ГиИС релевантно моделирует функционирование морского порта. Эксперименты показали, что гибридизация в Visual Event в 3 раза эффективнее применения инструментальных интегрированных систем типа Delphi.



Разработан пакет программ АГРО для решения сложной задачи планирования урожаев и агротехнических мероприятий в биопроизводственной системе [1]. В биопроизводственных системах сельского хозяйства сочетаются социально-экономические и естественные процессы воспроизводства. Осуществляя измерения состояния почвы, растений, воздуха, солнечной активности и др. факторов, прогнозируя метеоусловия и развитие растений, а также, имея в своем распоряжении широкий спектр ресурсов, субъект управления в биопроизводственной системе разрабатывает агромероприятия для достижения определенных целей: объема урожая, рентабельности и прибыльности растениеводства. Для преодоления неоднородности задачи в основу пакета программ АГРО была положена ФГиИС на основе (7) и (8) с гетерогенным модельным полем из 19 моделей: аналитических, экспертных систем, искусственных нейронных сетей и нейронечеткой системы. Лабораторные эксперименты и опытная эксплуатация показали снижение ошибки в прогнозах по годовичному циклу производства значений урожайности культур до 5 – 10 % при благоприятных агроклиматических условиях и до 7 – 14 % в сложных условиях. В традиционных подходах к планированию ошибка достигала 40 % от урожая.

Функциональная гибридная интеллектуальная система «Виртуальный медицинский консилиум» для диагностики артериальной гипертензии разработана для модели (7), (8) и апробирована на материалах регионального лечебного учреждения. В современной медицинской практике диагноз артериальной гипертензии оказывается «замаскированным и недовыявленным» у 70 % пациентов из амбулаторно-клинического учреждения. Цель работы – улучшить качество врачебных решений за счет консультаций у модели коллектива экспертов-врачей – медицинского консилиума (лат. *consilium* – совещание, обсуждение) [5].

Гетерогенное модельное поле виртуального консилиума состоит из 21 модели, девять из которых – технологические элементы, используемые для организации эффективной обработки данных и знаний. Применены методы нечетких систем, классические генетические алгоритмы (ГА) и искусственные нейронные сети (ИНС) с прямым распространением сигнала. Профессиональный состав виртуального консилиума – кардиолог, невролог, нефролог, терапевт, эндокринолог и уролог. По итогам лабораторных экспериментов на материалах клинической больницы прототип «Виртуального консилиума» давал верный диагноз в 80% случаев. При этом время, затрачиваемое врачом на постановку диагноза, уменьшилось примерно на 20%.

Модель ФГиИС с координацией (9), (10) – основа автоматизированной системы, моделирующей ежедневные совещания по оперативно-производственному планированию машиностроительного предприятия с мелкосерийным, заказным характером производства [8]. Здесь моделируется координация начальником производственного отдела ежедневной коллективной работы пяти экспертов: главного конструктора, главного технолога, начальника отдела материально-технического снабжения, начальника электромеханического цеха и начальника отдела продаж. Рассуждения членов коллектива имитировались экспертными системами, для оптимизации планов использовались ГА, а прогнозы последствий планирования строились ИНС. Разработана визуализация виртуальной планерки. Лабораторные эксперименты на материалах конкретного объекта показали, что если относительная погрешность результатов решения задачи оперативного планирования без учета координации достигает 36%, то с ее учетом не превысила 1%.

Модель ГиИМАС (11) – (17) [7] реализована в программном продукте «ТРАНС-МАР» для решения сложной транспортно-логистической задачи, построения для

транспортных средств совокупности маршрутов, оптимальную по четырем критериям: суммарная стоимость; общая длительность поездок для всех средств; вероятность опоздания хотя бы к одному клиенту; надежность (под надежностью понимается математическое ожидание увеличения стоимости совокупности маршрута). Учитывались стохастические факторы, такие как вероятность возникновения дорожных пробок и опоздания к клиенту, потери от боя груза и другие, а также моделировалась лингвистическая нечеткость в описании объектов предметной области.

ГиИМАС состоит из 13 агентов, пять из которых – агенты интеллектуальных технологий, реализующие аналитические, статистические, логические, нечеткие и символные рассуждения. Благодаря применению многоагентной технологии и нечеткой подсистемы идентификации и выбора архитектуры система динамически перестраивает алгоритм своего функционирования, каждый раз при работе над сложной задачей вырабатывая релевантный ей метод решения. В ходе лабораторных экспериментов протестированы архитектуры ГиИМАС, различающиеся соотношением целей ее агентов. На основе анализа их результатов извлечены правила нечеткой базы знаний агента, принимающего решения. Эти знания позволяют организовать эффективный выбор архитектуры ГиИМАС для решения сложной транспортно-логической задачи, а также использовать их при подборе экспертов для решения сложных задач. По итогам практического использования ГиИМАС на двух объектах средняя суммарная себестоимость и длительность доставки грузов в день сократилась на 7,2% и на 12,13% соответственно, среднее время построения маршрутов в день уменьшилось на 23,14%.

## Заключение

Многолетний научный опыт, накопленный человеческим обществом, со все большей убедительностью показывает, что исследования естественных гетерогенных систем с присущими им разнообразием, дополнительностью, сотрудничеством и относительностью позволяют получать ценные знания о космосе, природе, мироздании, человеке и его роли. Особенно интересны междисциплинарные исследования искусственных гетерогенных систем с полезными для человека свойствами. Во-первых, это согласуется с новой картиной мира, к которой общество постепенно эволюционирует. Во-вторых, это качественный фундамент будущих инноваций. Информатика и ИИ накопили опыт реализации проектов компьютерных систем поддержки принятия решений, консультирующих экспертов в сложных задачах естественных гетерогенных систем.

## Список литературы

1. Колесников А. В. Гибридные интеллектуальные системы. Теория и технология разработки [Текст] / под ред. А. М. Яшина. – СПб., 2001.
2. Колесников А. В. Технология разработки гибридных интеллектуальных систем [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук / Колесников А. В. – СПб., 2002.
3. Борисов А. Н. Диалоговые системы поддержки принятия решений на базе мини-ЭВМ: информационное, математическое и программное обеспечение [Текст] / А. Н. Борисов [и др.] – Рига, 1986.
4. Гаврилов А. В. Гибридные интеллектуальные системы [Текст] / А. В. Гаврилов. – Новосибирск, 2003.
5. Кириков И. А. Исследование сложной задачи диагностики артериальной гипертензии в методологии искусственных гетерогенных систем [Текст] / И. А. Кириков, А. В. Колесников, С. Б. Румовская // Системы и средства информатики. – 2013. – Т. 23, № 2. – С. 96–114.
6. Колесников А. В. Методология и технология решения сложных задач методами функциональных гибридных интеллектуальных систем [Текст] / А. В. Колесников, И. А. Кириков – М., 2007.

7. Колесников А. В. и др. Решение сложных задач коммивояжера методами функциональных гибридных интеллектуальных систем [Текст] / Колесников А. В.; под ред. А. В. Колесникова. – М., 2011.
8. Колесников А. В. Моделирование коллективного интеллекта, решающего сложную задачу планирования на машиностроительном предприятии [Текст] / А. В. Колесников, С. А. Солдатов // В мире научных открытий. Сер. «Математика. Механика. Информатика». – 2011. – № 12. – С. 172–181.
9. Клачек П. М., Корягин С. И., Колесников А. В., Минкоева Е. С. Гибридные адаптивные интеллектуальные системы [Текст]. Ч. 1: Теория и технология разработки: монография. – Калининград, 2011.
10. Гаазе-Раппопорт М. Г. От амебы до робота: модели поведения [Текст] / М. Г. Гаазе-Раппопорт, Д. А. Пospelov – М., 1987.
11. Рыбина Г. В. Автоматизированное построение баз знаний для интегрированных экспертных систем [Текст] / Г. В. Рыбина // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 1998. – № 5. – С. 152–166.
12. Тарасов В. Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика [Текст] / В. Б. Тарасов. – М., 2002.
13. Ярушкина Н. Г. Основы теории нечетких и гибридных систем [Текст] / Н. Г. Ярушкина. – М., 2004.
14. Нечеткие гибридные системы. Теория и практика [Текст] / под ред. Н. Г. Ярушкиной. – М., 2007.
15. Goonatilake S. Intelligent hybrid systems [Текст] / S. Goonatilake, S. Khebbal // The First Singapore Int. Conference on Intelligent Systems: proceedings. – 1992. – P. 356–364.
16. Medsker L. R. Hybrid intelligent systems [Текст] / Medsker L. R. – Boston, 1995.
17. Witsenhausen H. S. A class of hybrid-state continuous-time dynamic systems [Текст] / H. S. Witsenhausen // IEEE transactions on automatic control. – 1966. – Vol. 11, № 2. – P. 161 – 167.

## References

1. Kolesnikov A.V. *Hybrid intelligent systems: theory and technology of development*, Saint Petersburg, SPbGTU, 2001. 711 p.
2. Kolesnikov A.V. *Technology of development of hybrid intelligent systems*. D.Sc. Diss, Saint Petersburg, 2002.
3. Borisov A.N. et al. *Dialogue decision support systems on the basis of a mini-computer: infoware, mathware and software*, Riga, 1986.
4. Gavrilov A.V. Hybrid intelligent systems. – Novosibirsk, 2003.
5. Kirikov I.A., Kolesnikov A.V., Rumovskaya S.B. Study of the complex problem of arterial hypertension diagnostics in the methodology of artificial heterogeneous systems. *Systems and Means of Informatics*, 2013, Vol. 23, no. 2, pp. 96-114.
6. Kolesnikov A.V., Kirikov I.A. *Methodology and technology of solving complex problems by the methods of functional hybrid intelligent systems*, Moscow, IPI RAN, 2007.
7. Kolesnikov A.V. et al. *Solving the complex traveling salesman problems using the methods of functional hybrid intelligent systems*, edited by A.V. Kolesnikov, Moscow, 2011.
8. Kolesnikov A.V., Soldatov S.A. Modeling of collective intellect solving the complex problem of planning at the machine-building enterprise. *In the world of scientific discoveries. Series "Mathematics. Mechanics. Computer science"*, 2011, no. 12, pp. 172 - 181.
9. Klachek P.M., Koryagin S.I., Kolesnikov A.V., Minkoyeva E.S. *Hybrid adaptive intellectual systems. Part 1: Theory and technology of development: monograph*, Kaliningrad, 2011.
10. Gaaze-Rappoport M.G., Pospelov D.A. *From amoeba to robot: behavior patterns*, Moscow, 1987.
11. Rybina G.V. Automated construction of integrated knowledge bases for expert systems. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems*, 1998, no. 5, pp. 152 – 166.
12. Tarasov V.B. *From multi-agent systems to intellectual organizations: philosophy, psychology, informatics*, Moscow, 2002.
13. Yarushkina, N.G. *Fundamentals of the theory of fuzzy and hybrid systems*, Moscow, 2004.
14. *Fuzzy hybrid systems. Theory and practice*, edited by N.G. Yarushkina, Moscow, 2007.
15. Goonatilake S., Khebbal S. Intelligent hybrid systems. *The First Singapore Int. Conference on Intelligent Systems: proceedings*, 1992, pp. 356 – 364.
16. Medsker L. R. *Hybrid intelligent systems*, Boston, 1995.
17. Witsenhausen H. S. A class of hybrid-state continuous-time dynamic systems. *IEEE transactions on automatic control*, 1966, Vol. 11, no. 2, pp. 161 – 167.

## **RESUME**

*A.V. Kolesnikov*

### *Artificial heterogeneous decision support systems*

**Background:** Modern ideas about nature and society are gradually evolving to a new picture of the world, the fundamental categories of which are heterogeneity, diversity, complementarity, cooperation and the relativity of knowledge.

**Materials and methods:** Mathematical models of artificial heterogeneous systems simulating the small groups of experts making decisions are presented.

**Results:** The results of many years of research and development of artificial heterogeneous systems performed by the Kaliningrad School are presented. The testing of these systems on the data of real enterprises showed their advantages over traditional methods of solving problems.

**Conclusion:** The article considers the concept of heterogeneity, features of natural and artificial heterogeneous systems, substantiates the need for modeling heterogeneity in information intelligent systems.

Статья поступила в редакцию 01.02.2017.