

## Коллаборативная селекционная система на основе консорциума гетерогенных интеллектуальных агентов

М. И. Анчёков, З. И. Боготова, И. А. Пшенокова, З. В. Нагоев, Б. Р. Шомахов

Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук  
360010, Россия, Нальчик, ул. Балкарова, 2

**Аннотация.** Разработана архитектура человеко-машинной интеллектуальной системы на основе консорциума интеллектуальных программных и киберфизических агентов, выполняющих имитационное моделирование, принятие решений и синтез кооперативного управления процессами селекции и семеноводства. Понимание содержательного смысла и коллективное принятие решений в производственных и агротехнических циклах селекции и семеноводства в системах на основе такой вычислительной архитектуры будет обеспечиваться работой кооперативных интеллектуальных программных агентов общего искусственного интеллекта на базе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур. Разработанная вычислительная модель распределенного консорциума гетерогенных интеллектуальных агентов может быть применена для создания интеллектуальных экспертных и коллаборативных информационно-управляющих систем, обеспечивающих существенное повышение эффективности селекции и семеноводства на основе применения самообучающихся децентрализованных мультиагентных нейрокогнитивных систем управления процессами точной селекции и семеноводства.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, коллаборативные системы, точная селекция, семеноводство, мультиагентные системы, роботы

Поступила 05.10.2022, одобрена после рецензирования 13.10.2022, принята к публикации 14.10.2022

**Для цитирования.** Анчёков М. И., Боготова З. И., Пшенокова И. А., Нагоев З. В., Шомахов Б. Р. Коллаборативная селекционная система на основе консорциума гетерогенных интеллектуальных агентов // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 5 (109). С. 25–37. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-5-109-25-37

MSC: 68T42

Original article

## Collaborative breeding system based on a consortium of heterogeneous intelligent agents

M.I. Anchekov, Z.I. Bogotova, I.A. Pshenokova, Z.V. Nagoev, B.R. Shomakhov

Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences  
360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street

**Annotation.** The architecture of a human-machine intelligent system has been developed based on a consortium of intelligent software and cyber-physical agents that perform simulation modeling, decision making and synthesis of cooperative control of selection and seed production processes. Understanding the meaningful content and collective decision-making in the production and agrotechnical cycles of breeding and seed production in systems based on such a computing architecture will be ensured by the work of cooperative intelligent software agents of general artificial intelligence based on multi-agent neurocognitive architectures.

The developed computational model of a distributed consortium of heterogeneous intelligent agents can be used to create intelligent expert and collaborative information and control systems that provide a significant increase in the efficiency of breeding and seed production based on the use of self-learning decentralized multi-agent neurocognitive systems for controlling the processes of precise selection and seed production.

**Key words:** artificial intelligence, collaborative systems, precise selection, seed production, multi-agent systems, robots

Submitted 05.10.2022,

approved after reviewing 13.10.2022,

accepted for publication 14.10.2022

**For citation.** Anchekov M.I., Bogotova Z.I., Pshenokova I.A., Nagoev Z.V., Shomakhov B.R. Collaborative breeding system based on a consortium of heterogeneous intelligent agents. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2022. No. 5 (109). Pp. 25–37. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-5-109-25-37

## ВВЕДЕНИЕ

Рост производительности и эффективности современного растениеводства в значительной степени обусловлен качеством семенного материала. Ключевую роль здесь играют селекция и семеноводство, конкуренция в которых давно уже стала глобальной. Применение цифровых технологий в свою очередь значительно интенсифицирует процессы в этих весьма сложных в организационном плане наукоемких междисциплинарных направлениях.

Сложность заключается в длительности, многоэтапности селекционно-семеноводческого цикла, высокой неопределенности условий принятия решений, действии многочисленных стохастических факторов.

Зарубежные промышленные системы автоматизации селекционно-семеноводческого цикла к настоящему моменту получили широкое распространение в мире. В нашей стране они используются лишь некоторыми селекционными центрами. Это, как, правило, автоматизированные информационные системы, обеспечивающие прежде всего планирование и учет результатов селекционно-семеноводческих экспериментов.

Проекты, ориентированные на применение систем машинного обучения и интеллектуального анализа данных для автоматизации работы селекционера, учитывающие результаты применения т.н. омиксных технологий, активно развиваются, но находятся пока на ранних стадиях.

Самые современные проекты используют метафору проектирования «точной селекции» для обозначения интеллектуальных интегрированных информационно-управляющих систем, включающих наряду с системами интеллектуальной обработки данных еще и роботов, стационарных и мобильных, различные системы автоматизации и мехатронные агрегаты. Принципиальным отличием таких систем является формирование «сквозных» моделей селекционно-семеноводческих процессов на основе непрерывного анализа неструктурированных потоков данных и применение робототехнических комплексов для общего повышения производительности и снижения неопределенностей, связанных с «человеческим фактором».

Однако такие системы во всем мире пока еще находятся на стадии исследований и разработок. Ключевой проблемой является низкая фактическая эффективность существующих сегодня систем искусственного интеллекта. Это создает возможности для конкуренции с ведущими мировыми разработчиками подобных технологий.

Применяемый в данной работе подход к проектированию интегрированных интеллектуальных информационно-управляющих систем селекции и семеноводства с использованием вычислительной абстракции консорциума гетерогенных интеллектуальных агентов создает предпосылки для опережающего развития таких технологий в нашей стране.

## 1. ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ СЕЛЕКЦИИ И СЕМЕНОВОДСТВА

По аналогии с метафорой проектирования «точного земледелия» сегодня активно развивается метафора проектирования «точной селекции», содержательной основой которой является использование интеллектуального анализа «больших» селекционных данных, облачных технологий и машинного обучения для радикального повышения эффективности селекционного процесса.

Платформа точной селекции (Precise Breeding Platform) компании Bayer позволяет анализировать изменения в геноме растений при гибридизации, с помощью системы искусственного интеллекта определять гены, ответственные за позитивные и негативные изменения в фенотипе гибридов [5].

Программное обеспечение Easy Breed компании Wintersteiger AG представляет собой комплексную систему управления данными для селекции растений. Система позволяет накапливать, структурировать и использовать для создания новых гибридов и сортов данные полевых испытаний, результаты фенотипирования, информацию о маркерах и родословных растений. В программе также реализован планировщик скрещиваний и опытов [6].

Программа Genovix компании Agronomix, обеспечивая сходный функционал, отличается возможностью интегрировать информацию из глобально распределенных ассетов, накопленных пользователями за более, чем 40-летнюю историю, с использованием облачных хранилищ [7]. Программное обеспечение Integrated Breeding Platform также позволяет поддерживать единую базу селекционных данных, включая наименования и характеристики линий и гибридов [8]. Авторы пакета программ МВР позиционируют его как инструмент, позволяющий планировать селекционные эксперименты с учетом необходимости поддержания необходимого генетического разнообразия [11].

Чуть ли не единственный пример отечественного программного обеспечения для комплексной автоматизации селекционного процесса – программа «Генософт», позволяющая планировать, протоколировать и анализировать в диахронии селекционные эксперименты [9], пока еще только разрабатывается и не получила широкого внедрения.

В [12] описывается экспертная система по семеноводству кукурузы, позволяющая порождать, агрегировать, применять и редактировать знания.

Работы [3, 4] являются обзорными по аграрным экспертным системам, из которых видно, что в этой широкой предметной области, как правило, применяются классические подходы к управлению знаниями – формализмы на основе искусственных нейронных сетей, продукционных правил, нечетких множеств и вероятностных моделей.

Компания KWS развивает аппаратно-программный селекционный комплекс на базе системы искусственного интеллекта на основе формализма искусственных нейронных сетей и автономных мобильных роботов TerraSentia, выполняющих функции мобильных сенсоров системы. Перемещаясь по селекционным участкам, роботы собирают данные для фенотипирования, обрабатывая данные видеопотока и других датчиков. Система интересна тем, что она позволяет извлекать и применять знания на основе обработки многомодальных неструктурированных данных, имеет распределенную архитектуру и гетерогенна по составу – в ее работе задействованы роботы, программные агенты и люди.

В великолепной, вышедшей всего месяц назад работе [13] дается четкое разделение факторов, влияющих на селекционный процесс, на генетические, фенотипические и средовые, указывается необходимость сочетать в интеллектуальных системах управления селекционным процессом данные и знания, релевантные ко всем трем группам факторов.

В этой работе дается описание такой системы, основанной на применении методов машинного и глубокого обучения. В ней также отмечается, что создание таких систем на сегодняшний день сталкивается с нерешенными фундаментальными проблемами имитационного моделирования взаимодействия перечисленных групп факторов и технологическими барьерами организации подходящей вычислительной модели. Несмотря на такую констатацию, авторы не рассматривают возможность применения подхода на основе сообщества интеллектуальных агентов, обладающий его существенным потенциалом по преодолению этих трудностей.

В работе [14], посвященной применению методов машинного обучения в системах поддержки принятия решений в процессе селекции, помимо вышеперечисленных указывается также на необходимость учета в моделях знаний влияния на эффективность процесса факторов производственной логистики.

Сегодня актуализируются и работы, посвященные применению методов искусственного интеллекта для моделирования экспрессии генов, применения машинного обучения для выявления скрытых, ранее не известных генов, оказывающих влияние на эти процессы [10].

**Актуальность** исследования определяется необходимостью существенного повышения эффективности селекционного процесса за счет применения методов молекулярной генетики, использования робототехнических комплексов и систем искусственного интеллекта.

## 2. ПРОБЛЕМА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В СЕЛЕКЦИОННОМ ПРОЦЕССЕ

Селекционный процесс начинается с определения целевых характеристик заданного набора фенотипических признаков. Как правило, эти признаки являются хозяйственно полезными, т.е. создание фенотипов, обеспечивающих достижение целевых показателей, характеризующих эти признаки, и закрепление их в генотипе растений нового сорта определенной культуры являются экономически значимыми, оказывают некоторое позитивное влияние на общую эффективность возделывания и/или переработки данной культуры.

Первая проблема интеллектуальной поддержки принятия решений (ИППР) состоит в том, что селекционер при выборе стратегии селекционного процесса обладает лишь фрагментарной информацией о том, какие линии данной культуры необходимо скрестить между собой, чтобы получившиеся гибриды обладали заданными фенотипическими признаками. Если селекционер располагает результатами ранее выполненного эксперимента по скрещиванию выбранных линий, то решение принимается в условиях частичной неопределенности. Если же такая априорная информация отсутствует, то решение принимается в условиях полной неопределенности.

Вторая проблема, связанная с условиями принятия решений, состоит в том, что результаты эксперимента существенным образом зависят от средовых факторов, т.е. от внешних условий, в которых происходило развитие фенотипа растения. Такие факторы, как выбранная агротехническая тактика, погодные условия, воздействие вредоносных организмов, ресурсные ограничения весьма вариативны, что зачастую оказывает негативное влияние на чистоту эксперимента, основная цель которого заключается в установлении корреляции между генотипами и фенотипами растений.

Третья проблема состоит в том, что прогнозирование результатов и обучение по итогам эксперимента осуществляются в терминах *структурной* модели гетерозиса, хотя этот феномен, основанный на сочетанной экспрессии родительских генов, имеет ярко выраженный

*динамический* характер. Структурная модель, основанная на представлении о принципах кодирования признаков при наследовании доминантных и рецессивных генов, достаточно проста для понимания и построения на ее основе селекционных методик. Однако, она не обладает ни предсказательной, ни объяснительной силой в отношении закономерностей и проявлений экспрессии генов, которые непосредственно детерминируют состав и характер протекания процессов развития фенотипа растения.

Существующие на сегодняшний день молекулярные модели геномов, основанные на результатах расшифровки полногеномного секвенирования, и модели экспрессии генов, с другой стороны, слишком сложны и громоздки, и поэтому малопригодны для разработки селекционных методик на их основе – селекционеру сложно «удержать в голове» сотни тысяч и миллионы сущностей, осознать характер протекания сотен и тысяч синхронных и последовательных процессов.

В целом эта проблема иллюстрирует двойственный характер селекционного процесса, целеполагание организации которого структурировано в терминах макроскопических параметров растения, идентифицируемых внешним субъективным наблюдателем, а сущностный аспект проявляется прежде всего на субмикронном, молекулярном уровне и выражается в терминах объективных эндогенных процессов роста и развития организма.

Наличие вышеприведенных проблем в свою очередь позволяет определить характер процесса принятия селекционных решений как протекающего в условиях динамической, стохастической, неопределенной, частично наблюдаемой, эпизодической, слабоструктурированной среды.

Как известно из системного анализа, принятие решений в подобных условиях является нетривиальной задачей и требует применения методов интеллектуальной обработки информации. Как показано в [1, 2], для решения подобных задач хорошо подходят системы, основанные на метафоре проектирования *интеллектуального агента*.

Принятие решений по управлению процессом создания новых гибридов и сортов осложняется длительным итеративным характером этого процесса. Выбрав линии для скрещивания, в первый год эксперимента селекционер должен обеспечить получение семян гибрида первого поколения. Непосредственно фенотипирование самих гибридов он может осуществить только на второй год, высадив и вырастив растения из этих семян (рис. 1).

Предположим, что некоторый процент из выбранных сочетаний родительских форм привел к интенсивному гетерозису по заданным фенотипическим признакам. Чтобы подтвердить этот эффект, необходимо обеспечить повторный эксперимент, так как без устойчивой воспроизводимости результатов сложно судить о хозяйственной ценности полученного гибрида. Во время проведения повторных экспериментов, которые также могут занять от одного до нескольких лет, природные и агротехнические условия также могут быть нарушены по отношению к условиям предыдущего эксперимента, что, безусловно, могло бы дать новые ценные данные для обучения моделей протекающих процессов. Однако это возможно только в том случае, когда такие модели строятся на перманентной основе и обладают объяснительной силой. В противном случае все вышеперечисленные возмущения только усиливают неопределенность, существенно затрудняя возможность объективной оценки влияния отдельных факторов и их совокупностей на процесс и результат гибридизации. В частности, усугубляется проблема разделения влияния собственно генетических, общих биологических, природно-климатических и агротехнических факторов.

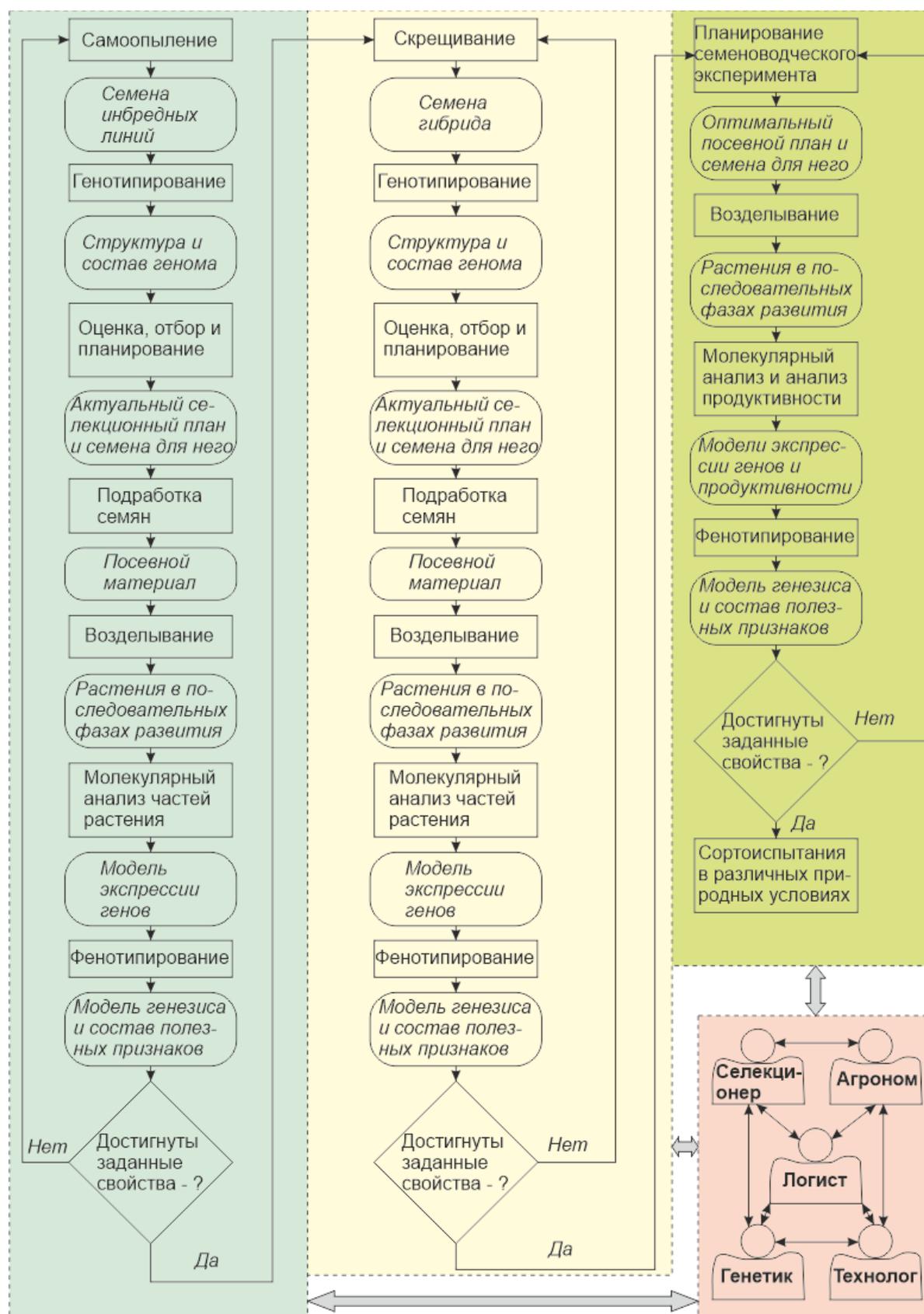


Рис. 1. Укрупненный алгоритм селекционно-семеноводческого цикла

Fig. 1. Enlarged algorithm of breeding and seed production cycle

Для решения этой проблемы необходимо построить комплексную модель, о которой говорилось выше, обеспечить ее перманентное обучение на основе потоков измеряемых гетерогенных данных, описывающих все существенные разноплановые факторы и параметры процесса гибридизации. Такая комплексная модель может быть построена на основе нескольких самообучающихся интеллектуальных агентов, которые строили бы частные модели различных процессов, описывали бы взаимодействия этих конкретных моделей между собой. Интеллектуальные агенты обучались бы на основе потоков данных, формируемых измерительными системами в режиме реального времени, что позволяло бы всей системе накапливать знания и увеличивать точность прогноза, в пределе приводя ее к значениям, обеспечивающим достоверность имитационного эксперимента, сопоставимую с экспериментом реальным.

Трудозатраты, необходимые для построения онтологий предметных областей каждой из таких частных моделей «вручную» (в стиле автоматизированной системы), настолько велики, что реализация такой системы с организационной точки зрения вряд ли возможна. Создать систему с описанным функционалом можно, на наш взгляд, только при условии ее работы в полностью автоматическом режиме.

Такая система по ряду основных классифицирующих признаков полностью соответствует т.н. системам «обволакивающего интеллекта» (Ambient Intelligence Systems). В числе таких признаков – перманентное моделирование ситуации на основе неструктурированных потоков многомодальных данных с физических и программных сенсоров, поддержка принятия решений на базе прогноза развития событий до горизонта планирования, превентивное вмешательство в протекающие процессы с целью привести с помощью доступных факторов систему «система «обволакивающего интеллекта» – среда» в желаемое состояние в будущем, выбранное на основе анализа некоторого количества проактивных сценариев развития ситуации.

Такие системы (впрочем, пока не обеспечивающие полного функционала из вышеописанного состава) в области сельского хозяйства получили название системы «умного» сельского хозяйства. В применении к задаче гибридизации их можно было бы назвать системами «умной» гибридизации.

К настоящему времени такие системы не созданы ни для задачи гибридизации, ни для других сельскохозяйственных задач. Как следует из [1], такие задачи относятся к неформальному классу AI-полных задач, для решения которых необходимо создание систем общего искусственного интеллекта.

По нашему мнению, для решения задачи «умной» гибридизации хорошо подойдет формализм для создания систем общего искусственного интеллекта – мультиагентные рекурсивные нейрокогнитивные архитектуры.

*Целью* настоящего исследования является разработка основных принципов создания интеллектуальных экспертных систем, обеспечивающих существенное повышение эффективности селекции и семеноводства на основе применения самообучаемых имитационных моделей и онтологий процессов предметной области.

*Основной задачей* работы является создание архитектуры коллаборативной человеко-машинной интеллектуальной системы на основе сообщества программных агентов, выполняющих имитационное моделирование, принятие решений и синтез кооперативного управления процессами селекции и семеноводства.

*Основная фундаментальная проблема*, на решение которой направлено данное исследование, состоит в формализации понимания содержания таких процессов специализированными интеллектуальными программными агентами, ответственными за имитационное моделирование различных частей этих процессов.

*Основная прикладная проблема* состоит в разработке модели вычислений, способной на практике обеспечить коллаборативную работу интеллектуальной экспертной системы в режиме реального времени.

*Объектом исследования* является процесс коллективного принятия решений в производственных и агротехнических циклах селекции и семеноводства.

*Предмет исследования* – возможность имитационного моделирования этого процесса вычислительной системой на основе кооперативных интеллектуальных программных агентов общего искусственного интеллекта на базе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур.

### 3. КОНСОРЦИУМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АГЕНТОВ

С целью достижения вышеописанного функционала, для эффективного выполнения задач имитационного моделирования, прогнозирования, перманентного обучения моделей в условиях реальной среды система интеллектуальной поддержки принятия решений в селекции и семеноводстве должна обеспечивать обработку многомодальных потоков неструктурированных данных. Как было установлено в [1], чтобы реализовать обработку неструктурированных потоков данных, система должна быть интеллектуальным агентом под управлением мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры.

Мультиагентная нейрокогнитивная архитектура представляет собой когнитивную архитектуру, в узлах которой расположены программные агенты-нейроны (агнейроны), которые являются рациональными агентами искусственной жизни (Artificial Life), выполняющих проактивный синтез поведения, направленного на максимизацию локальной функции полезности. Поведение агнейрона это - последовательность его действий, которые он выполняет с помощью своих эффекторов. Оно описывается т.н. графом проблемной ситуации, дугами которого являются эти действия, а вершинами – состояния систем «агнейрон – среда», идентифицируемые агнейроном с помощью его сенсоров. В этом описании прослеживается очевидное сходство между интеллектуальными агентами и агнейронами. Разница состоит в том, что внешней средой для интеллектуального агента является реальная среда, и сам он включает в себя много агнейронов (и в этом смысле является мультиагентным агентом). Агнейрон же, напротив, является единичным агентом, и внешней средой ему служит сам интеллектуальный агент, узлы его нейрокогнитивной архитектуры, отвечающие за выполнение разнообразных когнитивных функций, задействованных в процессе принятия решений (рис. 2). Таким образом, агнейроны в составе функциональных узлов нейрокогнитивной архитектуры вложены в состав интеллектуального агента, что весьма характерно, так как мультиагентная нейрокогнитивная архитектура, введенная в [1], является рекурсивной.

Мультиагентная рекурсивная архитектура подробно описана в указанной монографии. Здесь лишь укажем, что интеллектуальные агенты под ее управлением приобретают возможность автономно синтезировать свое проактивное поведение, направленное на переход в состояние системы «интеллектуальный агент – среда», более предпочтительное, чем текущее состояние, с точки зрения значения целевой функции интеллектуального агента. Как следует из рисунка 2, агнейроны в составе когнитивной архитектуры интеллектуального агента взаимодействуют друг с другом путем обмена сообщениями с целью синхронизации совместных действий, что обеспечивает мультиагентную самоорганизацию при движении всей системы к аттракторам, которые как раз и являются целевыми состояниями интеллектуального агента.

В силу того, что интеллектуальная обработка информации в мультиагентной нейрокогнитивной архитектуре начинается и заканчивается идентификацией состояний системы «интеллектуальный агент – среда», переход между которыми синтезируется на основе мультиагентных алгоритмов, объединенных в децентрализованном стиле агнейронами, расположенными в различных слоях этой нейрокогнитивной архитектуры, интеллектуального агента под ее управлением можно рассматривать, как агента общего искусственного интеллекта. Такой агент, в потенциале, путем обучения, настраивается на выполнение всех задач, которые необходимы для создания интеллектуальной системы поддержки принятия решений в селекции и семеноводстве.



Рис. 2. Функциональные узлы мультиагентной рекурсивной нейрокогнитивной архитектуры

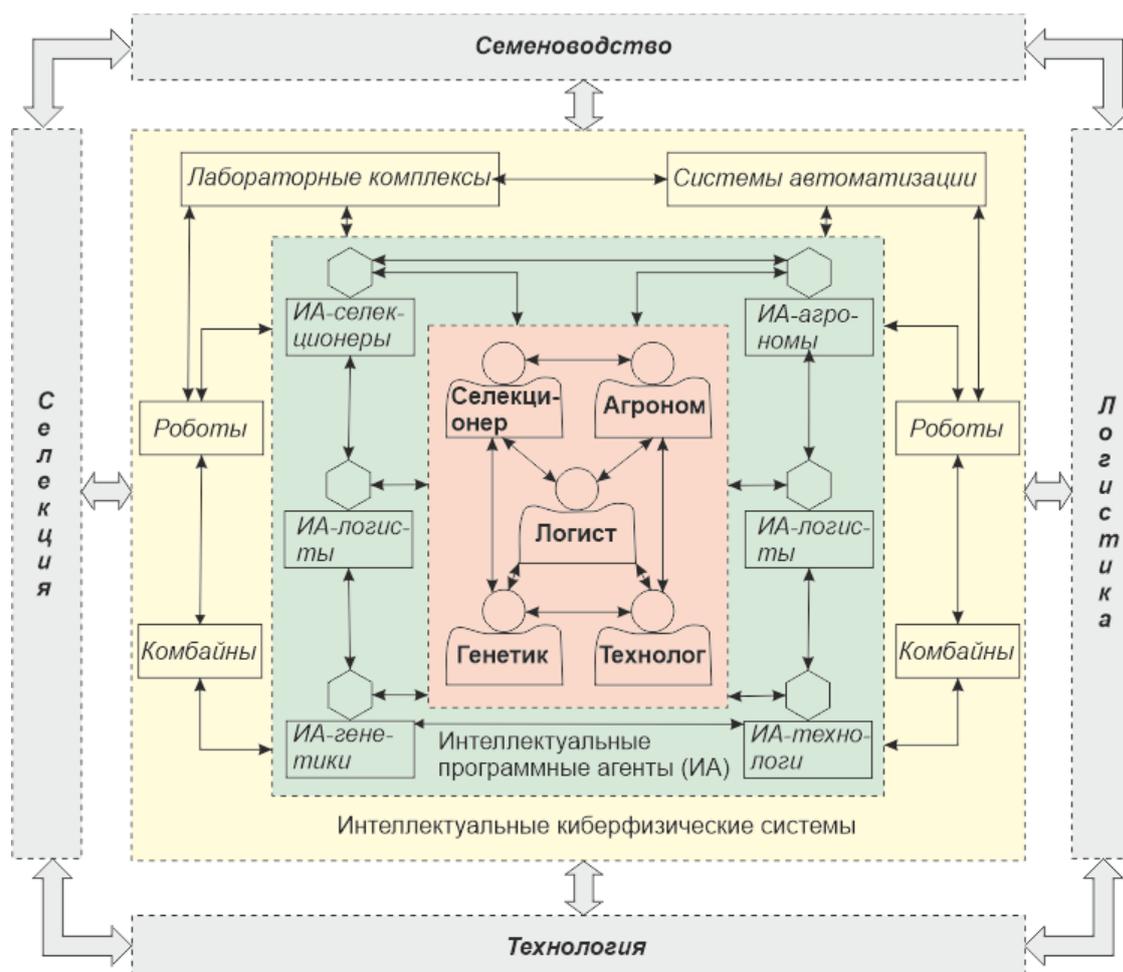
Fig. 2. Functional nodes of the multi-agent recursive neurocognitive architecture

Проблема состоит в том, что, как следует из вышеизложенного и иллюстрируется рисунком 1, процессы селекции и семеноводства сложны, многообразны, распределены во времени и пространстве, связаны с работой большого количества специалистов, технических и природных систем. В таком комплексе взаимодействующих акторов и объектов порождается огромное количество неструктурированных многомодальных данных. При этом совокупный результат всей работы может критическим образом зависеть от успеха или неудачи на каком-либо конкретном участке или этапе. Строго говоря, в подобной системе к обычным «проблемам» принятия решений в условиях реальной среды, таким как стохастичность, динамичность, эпизодичность, частичная наблюдаемость, активность и т.п., добавляется еще и проблема децентрализованного и диахронического характера критически значимых параметров системы.

Объемы порождаемых данных так велики, а их пространственно-сущностно-временная иерархия так сложна, что применение интеллектуального агента на основе мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры неминуемо столкнется с вычислительными ограничениями, ставящими под вопрос применимость подхода.

Для разрешения этой проблемы считаем целесообразным интеллектуальную экспертную систему селекции и семеноводства построить на основе вычислительной архитектуры *распределенного консорциума гетерогенных интеллектуальных агентов* (рис. 3).

Такой консорциум представляет собой сообщество (коллектив) интеллектуальных агентов различных типов – людей, программных агентов, киберфизических систем (роботов, систем автоматизации), взаимодействующих друг с другом с использованием высокоуровневых интерфейсов с целью кооперативного решения целевых задач. Каждый из интеллектуальных агентов специализируется на решении одной или нескольких функциональных задач, обучаясь на основе знаний и прецедентов, стремясь превратиться в эффективный элемент системы, обеспечивающий необходимую для успеха работы всего консорциума точность моделей и прогнозов при решении этих задач.



**Рис. 3.** Структурно-функциональная схема селекционной системы на основе консорциума интеллектуальных агентов

**Fig. 3.** Structural and functional scheme of the breeding system based on the consortium of intelligent agents

Такая система является децентрализованной, так как интеллектуальные агенты выполняют свою работу непосредственно на месте, синтезируя и обрабатывая потоки данных с сенсоров, настроенных на анализ процессов в заданной предметно-функциональной области.

#### 4. КОЛЛАБОРАТИВНАЯ СЕЛЕКЦИОННАЯ СИСТЕМА

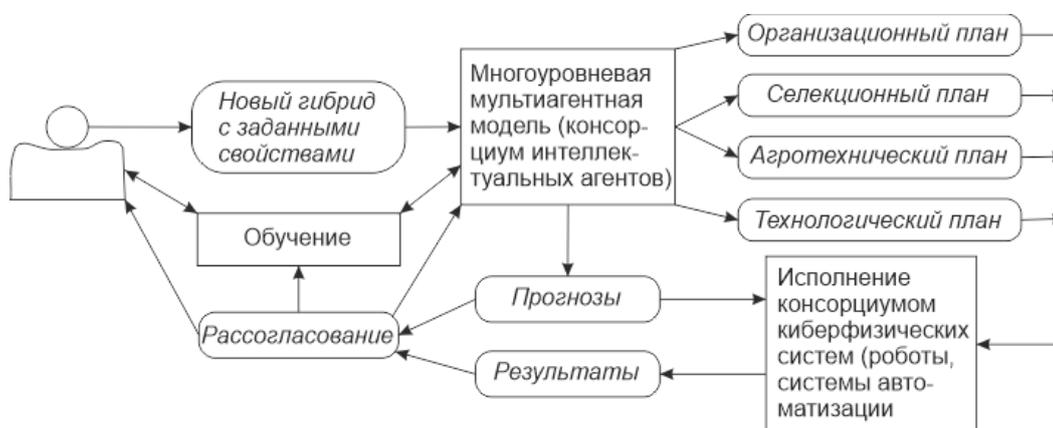
Принципиальным отличием консорциума интеллектуальных агентов, структурно-функциональная схема которого приведена на рисунке 3, от других интегрированных информационно-управляющих систем состоит в его гетерогенности. Как следует из рисунка, в его составе есть люди – селекционеры, агрономы, технологи, генетики, логисты, выполняющие постановки миссий и контроль операций, программные агенты, обеспечивающие принятие решений, синтез и накопление знаний, и киберфизические системы, применение которых направлено на обеспечение возможности непосредственного воздействия на физические процессы.

Консорциум является открытой системой, его вычислительная архитектура базируется на распределенной модели вычислений, применении разнообразных каналов связи и сетевых протоколов.

Ключевой характеристикой такого консорциума является кооперация входящих в него интеллектуальных агентов на основе общих онтологий и моделей семантики коммуника-

ции. Для достижения такой общности как раз и необходимы мультиагентные нейрокогнитивные архитектуры, как формализм, обеспечивающий единообразную вычислительную абстракцию общего искусственного интеллекта, применимую для описания состояний «человек – среда», «программный агент – среда», «робот – среда». Общий онтологический базис и семантика коммуникативных инструментов обеспечивают возможности синтеза согласованного целенаправленного поведения гетерогенного по своему составу консорциума интеллектуальных агентов.

Принципиальное значение для обеспечения эффективности работы столь сложной системы имеет способность интеллектуальных агентов на основе мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры к самообучению. Эта способность обеспечивается алгоритмами направленного ситуативно детерминированного роста аксо-дендрональных связей между агентами-нейронами в составе когнитивной архитектуры. На рисунке 4 приведена структурно-функциональная схема алгоритма обучения управляющей мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры на основе рассогласования прогноза и результата выполнения цикла селекции и семеноводства.



**Рис. 4.** Алгоритм обучения селекционной системы на основе консорциума интеллектуальных агентов

**Fig.** Algorithm for training a breeding system based on a consortium of intelligent agents

Наличие рассогласования благодаря коллаборативному взаимодействию между интеллектуальными агентами в составе консорциума проявляется и идентифицируется непосредственно «по месту и времени» наступления. Таким образом, наличие локальных рассогласований определяется локальными же интеллектуальными агентами, что позволяет сразу же выделить части процесса, требующие корректировки. Такая корректировка осуществляется на основе мультиагентного обучения либо в супервизорном режиме при непосредственном участии специалистов, либо в автоматическом режиме – на основе самоорганизации нейрокогнитивной архитектуры при ее движении к аттракторам, интерпретируемым в терминах новых знаний, позволяющих в будущем добиться отсутствия рассогласования между прогнозом и результатом.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана архитектура человеко-машинной интеллектуальной системы на основе консорциума интеллектуальных программных и киберфизических агентов, выполняющих имитационное моделирование, принятие решений и синтез кооперативного управления процессами селекции и семеноводства. Этот подход направлен на решение прикладной проблемы

разработки модели вычислений, способной на практике обеспечить коллаборативную работу интеллектуальной экспертной системы в режиме реального времени. Такая вычислительная архитектура составит основу интегрированной кооперативной системы принятия решений специализированными интеллектуальными программными агентами и роботами, ответственными за имитационное моделирование различных частей селекционно-семеноводческого процесса.

Понимание содержательного смысла и коллективное принятие решений в производственных и агротехнических циклах селекции и семеноводства в такой вычислительной архитектуре будут обеспечиваться работой кооперативных интеллектуальных программных агентов общего искусственного интеллекта на базе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур.

Разработанная вычислительная архитектура распределенного консорциума гетерогенных интеллектуальных агентов может быть применена для создания интеллектуальных экспертных систем, обеспечивающих существенное повышение эффективности селекции и семеноводства на основе применения самообучаемых мультиагентных нейрокогнитивных систем управления процессами точной селекции и семеноводства.

## REFERENCES

1. Nagoev Z.V. *Intellektika, ili myshleniye v zhivykh i iskusstvennykh sistemakh* [Intelligence, or thinking in living and artificial systems]. Nalchik: Izdatel'stvo KBNTS RAN, 2013. 232 p.

*Нагоев З. В.* Интеллектика, или Мышление в живых и искусственных системах. Нальчик, Издательство КБНЦ РАН, 2013. 232 с.

2. Stuart Russell, Peter Norvig. *Iskusstvennyy intellekt: sovremennyy podkhod (AIMA)* [Artificial Intelligence: A Modern Approach (AIMA)] = Artificial Intelligence: A Modern Approach (AIMA). 2nd ed. Moscow: Williams, 2007. 1424 p.

*Стюарт Рассел, Питер Норвиг.* Искусственный интеллект: современный подход (AIMA) = Artificial Intelligence: A Modern Approach (AIMA). 2-е изд. Москва: Вильямс, 2007. 1424 с.

3. Nesa Rani P. Mercy, Rajesh T., Saravanan R. Expert Systems in Agriculture: A Review. *Journal of Computer Science and Applications*. Vol. 3. No. 1(2011). Pp. 59–71.

4. <https://www.iasri.icar.gov.in/annual-reports/>

5. <https://www.3blmedia.com/news/new-technologies-driving-future-plant-breeding>

6. <https://www.agriexpo.ru>

7. <https://www.agronomix.com/genovix/>

8. <https://www.bmspro.io>

9. <https://www.kubnews.ru>

10. <https://msutoday.msu.edu/news/2021/decoding-crop-genetics-with-artificial-intelligence>

11. <https://www.nih.gov> MBP (version 1.0): a software package to optimize maize breeding procedures based on doubled haploid lines

12. Yadav V.K., Sudeep Marwaha, Sangit Kumar, Kumar P., Jyoti Kaul, Parihar C.M. and Supriya P. Maize AGRIdaksh: A Farmer Friendly Device. *Indian Res. J. Ext. Edu.* 12 (3), September, 2012.

13. Yunbi Xu, Xingping Zhang, Huihui Li, Hongjian Zheng, Jianan Zhang, Michael S. Olsen, Rajeev K. Varshney, Boddupalli M. Prasanna, Qian Qian. Smart breeding driven by big data, artificial intelligence, and integrated genomic-enviromic prediction, *Molecular Plant*. Vol. 15. No. 11, 2022. Pp. 1664–1695. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2022.09.001>.

14. Jun Yan, Xiangfeng Wang. Machine learning bridges omics sciences and plant breeding, *Trends in Plant Science*, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.08.018>.

**Информация об авторах**

**Анчёков Мурат Инусович**, науч. сотр. лаборатории «Молекулярная селекция и биотехнология», Кабардино-Балкарский научный центр РАН;

360000, Россия, Нальчик, ул. Кирова, 224;

murat.antchok@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8977-797X>

**Боготова Залина Ихсановна**, канд. биол. наук, зав. лабораторией «Молекулярная селекция и биотехнология», Кабардино-Балкарский научный центр РАН;

360000, Россия, Нальчик, ул. Кирова, 224;

zalina\_bogotova@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9123-224X>

**Пшенокова Инна Ауесовна**, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. лаборатории «Нейрокогнитивные автономные интеллектуальные системы», Кабардино-Балкарский научный центр РАН;

360002, Россия, Нальчик, ул. Балкарова, 2;

pshenokova\_inna@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3394-7682>

**Нагоев Залимхан Вячеславович**, канд. техн. наук, генеральный директор Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

360000, Россия, Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;

zaliman@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9549-1823>

**Шомахов Беслан Рашидович**, ст. науч. сотр., зав. лаб. «Селекция и семеноводство позднеспелой кукурузы», Кабардино-Балкарский научный центр РАН;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. Кирова, 224;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0248-2619>

**Information about the authors**

**Anchekov Murat Inusovich**, staff scientist of the laboratory «Molecular selection and biotechnology», Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360000, KBR, Nalchik, 224 Kirova street;

murat.antchok@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8977-797X>

**Bogotova Zalina Ikhsanovna**, Candidate of Biological Sciences, Head of the laboratory "Molecular selection and biotechnology" of KBSC of the Russian Academy of Sciences.

360000, KBR, Nalchik, 224 Kirova street;

zalina\_bogotova@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9123-224X>

**Pshenokova Inna Auesovna**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher laboratory «Neurocognitive autonomous intelligent systems», Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360002, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street;

pshenokova\_inna@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3394-7682>

**Nagoev Zalikhan Vyacheslavovich**, Candidate of Technical Sciences, General Director of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360000, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street;

zaliman@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9549-1823>

**Shomakhov Beslan Rashidovich**, Senior Researcher, Head of the laboratory "Breeding and seed production of late-ripening corn", Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360004, Russia, Nalchik, 224 Kirov street;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0248-2619>