Секция «Бионика» Научного совета Российской академии наук
по методологии искусственного интеллекта и когнитивных исследований

Ассоциация технических университетов

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)

БИОНИКА – 2022

Сборник статей
Второй Международной
научно-практической конференции

23-24 декабря 2022 года, г. Москва

Москва
2023

УДК 101.1
ББК 88
Б-863

Б-863 Бионика – 2022. Сборник статей Второй Международной научно-практической конференции, 23-24 декабря 2022 года, г. Москва / Под ред. А.П. Карпенко – М.: Ассоциация технических университетов, 2023. – 285 с.

ISBN 978-5-91916-052-6

Сборник включает статьи, подготовленные на основе докладов, представленных на Второй Международной научно-практической конференции «Бионика-2022». Статьи отражают результаты научных исследований с использованием бионических методов и подходов в таких областях, как бионика теоретическая (математическая), бионика биологическая (бионика прототипов или протобионика), бионика экологическая или экобионика, бионика гуманитарная (бионика социально-гуманитарных технологий) или социобионика, бионика техническая (бионика инженерных технологий).

Представленные в сборнике материалы посвящены бионической проблематике в жизни современного общества, раскрывают широкое многообразие бионических методов в таких областях научного знания, как биомеханика, биофизика, биохимия, биоинформатика и другие междисциплинарные научные специальности с приставкой «био».

Издание рассчитано на широкий круг работников органов управления образованием, наукой, промышленностью, труда и занятости, руководителей промышленных предприятий и организаций, научных и образовательных учреждений, исследователей в области бионики.

Рецензенты:
В.А. Лекторский, академик РАН, академик РАО,
доктор философских наук, профессор
В.А. Глазунов, доктор технических наук,
доктор философских наук, профессор

Под редакцией
А.П. Карпенко,
доктора физико-математических наук, профессора

Члены редколлегии:
В.К. Балтян, С.С. Гаврюшин, Ю.Т. Каганов, С.В. Рубцов

ISBN 978-5-91916-052-6

© Секция «Бионика» НСМИИ РАН, 2023
© Ассоциация технических университетов, 2023
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023

ПРЕДИСЛОВИЕ

В научной среде «бионика» считается одним из самых современных и перспективных направлений исследований, хотя до сих пор не имеет статуса научной специальности в номенклатуре наук ЮНЕСКО и ВАК при Минобрнауки России. Работы по бионической тематике публикуют в рамках таких специальностей, как биомеханика, биофизика, биохимия, биоинформатика, других междисциплинарных научных специальностей с приставкой «био». Бионические подходы широко используются в современных направлениях научных исследований, какими являются: искусственный интеллект, нейросетевые технологии, нейроинтерфейсы, робототехника, аддитивные технологии. Можно выделить целый пласт «природосообразной» педагогики, использующей биологические эффекты для разработки эффективных образовательных технологий. Бионические методы находят применение в менеджменте. Известны биовдохновленные подходы к управлению экономикой.

Дать однозначное определение бионике сложно. Различные ее определения основаны на переносе опыта решения проблем от биологических прототипов в сферу искусственных технологий. Автор термина «бионика» Дж. Стилла дал следующее определение: «Бионика – это наука о системах, функции которых копируют функции живых систем, о системах, которым присущи специфические характеристики природных систем или которые являются их аналогами». В кандидатской диссертации С.Н. Смирнова «Закономерность возникновения и развития бионики» дано такое определение: «Бионика является наукой о живых целесообразных системах, функциональные свойства которых не зависят от материальной природы элементов и связей своих конструкций». Иногда бионику определяют более лаконично, как науку о бионах, где под бионами понимают биологические эффекты или бионические системы.

В декабре 2022 года состоялась Вторая Международная научно-практическая конференция «Бионика – 2022», которая, как и предыдущая конференция «Бионика – 60. Итоги и перспективы», прошла в очно-заочном режиме. Организаторами Конференции выступили секция «Бионика» НСМИИ РАН и МГТУ им. Н.Э. Баумана; сопредседатели Программного комитета Конференции – В.А. Лекторский, председатель Научного совета НСМИИ РАН, академик РАН, академик РАО, д.филос.н., профессор,; В.А. Глазунов, директор ИМАШ РАН, д.т.н., д.филос.н., профессор,; А.П. Карпенко, заведующий кафедрой САПР МГТУ им. Н.Э. Баумана, председатель секции «Бионика» НСМИИ РАН, д.ф.-м.н., профессор; сопредседатели Организационного комитета Конференции – С.С. Гаврюшин, заведующий кафедрой «Компьютерные системы автоматизации производства» МГТУ им. Н.Э. Баумана, д.т.н., профессор; Ю.Т. Каганов, доцент кафедры «Теоретическая информатика и компьютерные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана, руководитель междисциплинарного семинара «Экобионика», к.т.н. Большой вклад в организацию и проведение Конференции внес ученый секретарь секции «Бионика» НСМИИ РАН С.В. Рубцов.

Участниками Конференции стали представители ведущих вузов, научных учреждений, промышленных предприятий и научно-общественных организаций Российской Федерации, Китайской Народной Республики, Республики Казахстан, Республики Узбекистан, Французской Республики: Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева (Казахстан), ГУАП (Санкт-Петербург), Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева (г. Алматы, Казахстан), КФУ им. В.И. Вернадского (Симферополь), МАИ, МАРХИ, МГГЭУ, МГУ им. М.В. Ломоносова, МГТУ им. Н.Э. Баумана, МФТИ, РГУ им. А.Н. Косыгина, Филиал Казанского федерального университета в городе Джизаке (Узбекистан), Шанхайский политехнический университет (Китай); Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН, Институт проблем информатики РАН, НИИ системных исследований РАН, НИИ развития цифровых технологий и искусственного интеллекта (г. Ташкент, Узбекистан), НИИ теории и истории архитектуры и градостроительства (Москва), Центр инновационных исследований (Сколково), Филиал ФГБУ «Центральный научно-исследовательский и проектный институт Минстроя России» (Москва), Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, Research Center for Automatic Control of Nancy (University of Lorraine).

На Конференции было заслушано 3 пленарных и 26 секционных докладов. Содержанием докладов стали результаты научных исследований с использованием бионических методов в таких областях, как искусственный интеллект, нейросети, нейроинтерфейсы, сенсоры, робототехника, аддитивные технологии, архитектура и дизайн, создание новых материалов.

Работа Конференции «Бионика – 2022» была организована в следующих пяти секциях:

- бионика теоретическая (математическая);
- бионика биологическая (бионика прототипов или протобионика);
- бионика экологическая или экобионика;
- бионика гуманитарная (бионика социально-гуманитарных технологий или социобионика);
- бионика техническая (бионика инженерных технологий).

Кроме того, в рамках Конференции была организована секция «Бионика будущего» – секция работ бионической направленности, выполненных школьниками и студентами. Завершилась Конференция круглым столом «Бионика в высшей школе, методологические аспекты».

Настоящий Сборник включает статьи по бионической тематике, подготовленные на основе лучших докладов Конференции. Статьи упорядочены по тематикам секций, в которых были представлены соответствующие доклады.

Секция «Бионика» Научного совета РАН по методологии искусственного интеллекта и когнитивных исследований, дирекция Ассоциации технических университетов

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

УДК 519.6

ЭКОБИОНИКА – КЛЮЧ К ПРОГНОЗУ ДИНАМИКИ ТЕХНОСФЕРЫ, СИСТЕМ ВООРУЖЕНИЯ, НАУЧНОГО ПРОСТРАНСТВА

Г.Г. Малинецкий,
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: gmalin@keldysh.ru

Аннотация. *В настоящее время сформировалось важное научное направление – экобионика. Если бионика работает с тактикой промышленного развития, то экобионика рассматривает стратегию преобразования техносферы и проектирования будущего. Последнее сейчас представляется особенно важным. В точке бифуркации, в которой сейчас находится человечество, одна из ветвей связана с откатом назад, с повторением XX века с несколькими мировыми войнами. Развитие экобионики и доведение результатов исследований в этом направлении до практического приложения может помочь человечеству избежать катастрофы в его историческом развитии. Научной и методической основой для развития бионики может служить теория самоорганизации или синергетика. С позиций экобионики рассматривается эволюция техносферы, стратегия промышленного развития России, перспективы развития искусственного интеллекта, циклическая экономика, геополитика, развитие системы вооружений, перспективы научных революций.*

Ключевые слова: *экобионика, бионика, техносфера, проектирование будущего, теория самоорганизации, синергетика, универсальный эволюционизм, искусственный интеллект, циклическая экономика, геополитика, перспективы оборонно-промышленного комплекса, научные революции.*

ECOBIONICS IS THE KEY TO PREDICTING THE DYNAMICS OF THE TECHNOSPHERE, SYSTEMS ARMAMENT, SCIENTIFIC SPACE

G.G. Malinetckiy,
Federal Research Center Institute of Applied Mathematics
named after M.V. Keldysh of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

Abstract. *Currently, an important scientific direction has been formed – ecobionics. If bionics works with the tactics of industrial development, then ecobionics considers the strategy of transforming the technosphere and designing the future. The latter now seems particularly important. At the point of bifurcation*

in which humanity is now located, one of the branches is associated with a roll-back, with a repeat of the XX century with several world wars. The development of ecobionics and bringing the results of research in this direction to practical application can help humanity avoid a catastrophe in its historical development. The theory of self-organization or synergetics can serve as a scientific and methodological basis for the development of bionics. From the standpoint of ecobionics, the evolution of the technosphere, the strategy of industrial development of Russia, the prospects for the development of artificial intelligence, cyclical economy, geopolitics, the development of the weapons system, the prospects of scientific revolutions are considered.
Keywords: *ecobionics, bionics, technosphere, future design, theory of self-organization, synergetics, universal evolutionism, artificial intelligence, cyclical economy, geopolitics, prospects of the military-industrial complex, scientific revolutions.*

«Стратегия без тактики –
это самый медленный путь к победе.
Тактика без стратегии –
это просто суета перед поражением».
Сунь Цзы

Необходимость перехода от тактики к стратегии. Бионику (от греческого слова «живущее») рассматривают как прикладную науку о применении в технических устройствах и системах принципов организации, свойств, функций и структур живой природы. Эта область исследований, опираясь на комплекс биологических наук, оригинальным путем решает технические задачи. Но кто ставит эти проблемы, определяя вехи развития будущего приводит к тяжелым и дорогим ошибкам. Наглядный пример – отношение к глобализации. Бытовавшее представление, что альтернативы ей нет, что самоорганизация вышла на мировой уровень, привели Россию к роли торговца нефтью, газом, рудами, к подготовке вместо творцов «квалифицированных потребителей, способных квалифицированно пользоваться результатами других». Однако сейчас выяснилось, что мы являемся активными участниками столкновения цивилизаций, и что нужны не «купцы» и «эффективные менеджеры» (приказчики), а творцы, инженеры и воины.

Китайский стратег и мыслитель Сунь Цзы, живший в VI веке до нашей эры, писал: «Лучшее из лучшего – покорить огромную армию, не сражаясь. Поэтому самая лучшая война – разбить замыслы противника, на следующем месте – разбить его союзы, на следующем месте – разбить войска. Самое худшее – осаждение крепости». Военные все чаще сейчас говорят о переходе от стратегии Клаузевица к стратегии Сунь Цзы. И специальная военная операция, и предшествующие годы показали, что в столкновении цивилизаций Запад в противостоянии России действует в контексте стратегии Сунь Цзы. И сейчас российская армия и ополченцы в тече-

ние многих месяцев действительно берут крепости. Стратегия имеет приоритет перед тактикой.

В течение многих лет Ю.Т. Кагановым и участниками семинара «Экобионика» в МГТУ им. Н.Э. Баумана разрабатывался подход, направленный на использование стратегий, оказавшимися эффективными в биосфере, в формировании техносферы, в научной, технологической, экономической, образовательной политике страны и мира. Объем невосполнимых ресурсов падает. На нынешней Земле человечество, вероятно, не смогло бы пройти тот путь развития технологической цивилизации, который мы уже миновали. Стихийное развитие реальности, в котором человечество активно участвовало в течение многих веков, исчерпало свои возможности. Генеральный секретарь ООН Антониу Гутерриш сравнил в 2020 году нынешнюю ситуацию со скачкой воинов апокалипсиса по планете, которую описывал Иоанн Богослов, предвидя последние дни перед катастрофой.

Необходим стратегический прогноз, проектирование будущего, управление рисками грядущих перемен и конкретные меры, которые позволяют пройти нынешнюю бифуркацию наилучшим образом. Ключ к этому дает экобионика. Ряд наиболее важных направлений ее развития мы и обсудим.

«Увидав черепки – не топчи черепка.
Берегись! Это бывших людей черепа.
Чаши лепят из них – а потом разбивают
Помни, смертный: придет и твоя череда!»

Омар Хайям

Самоорганизация и эволюция. В природе сложились самовоспроизводящиеся структуры, в которых одни поколения сменяют другие, гибко реагируя на изменение окружающей среды и сами формируя эту среду. Сложившаяся многоуровневая структура геобиоценоза, популяций, отдельных организмов формировалась самопроизвольно, стихийно в результате многократных взаимодействий без какого-либо управления извне.

Поэтому в основе экобионики должна лежать *теория самоорганизации* или *синергетика* (от греческого «совместное действие»). Этот междисциплинарный подход представляет собой сферу исследований *на пересечении пространств предметного знания, математического моделирования и философской рефлексии.* Синергетика не только опирается на идеи этих научных направлений, но и сама преображает их [1].

В ходе самоорганизации сложился круг воспроизводства биосферы, обществ, экономики, организмов. Мы являемся звеном в цепочке поколений, использующим результаты предшественников и создающим задел для будущего. Исследование и совершенствование соответствующих механизмов должно быть основой для экобионики.

Одним из главных механизмов самоорганизации является дарвиновская триада: *наследственность – изменчивость – отбор*. Выдающийся математик, мыслитель, философ Никита Николаевич Моисеев (1917 – 2000) считал, что этот механизм относится не только к биологической эволюции и развитию экономики. Исходя из этого, он разработал философский подход, который назвал *универсальным эволюционизмом* [2].

Чарльз Дарвин (1809 – 1892) полагал, что первый набор биологических видов создал Бог, а далее в свои права вступили механизмы эволюции. Он мыслил изменение биосферы как медленный плавный процесс, позволяющий гибко и точно реагировать на динамику окружающей среды. По его мысли гигантских вымираний, в ходе которых исчезал значительный процент существовавших видов, не было.

Ему возражал Ж. Кювье (1769 – 1832), считавший, что «творцами» развития являются гигантские катастрофические события. Результаты работы сотен палеонтологов показаны на рис. 1, – гигантские вымирания были! Палеонтологи выделяют пять глобальных вымираний. Например, около 66 млн. лет назад погибло 16% семейств морских животных и 18% сухопутных – разрушены оказались почти все сложившиеся экосистемы, с лица Земли исчезло ¾ всех видов. Далее экосистемы восстанавливаются, но уже без главной доминанты мезозоя – динозавров. [3]. Произошедшее показало уязвимость сложных систем с высокой специализацией входящих в них видов. Однако именно такими сферами являются биосфера, техносфера, социальное и информационное пространство. Естественно, развивая экобионику, важно выяснить «окна уязвимости» и позаботиться, чтобы с нами подобных событий (в той мере, в которой это зависит от нас) не произошло.

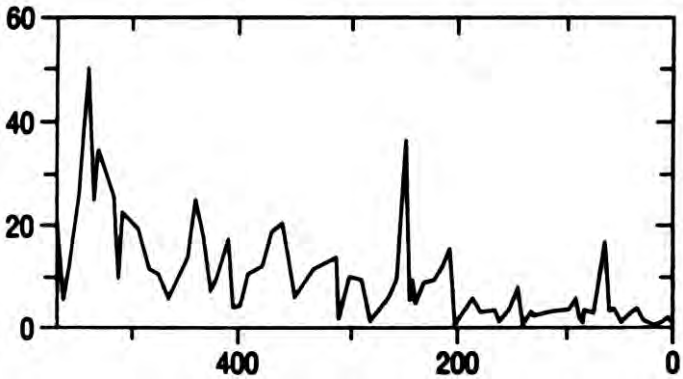


Рис. 1. Доля вымиравших видов в биосфере в процессе эволюции (по оси абсцисс – миллионы лет тому назад, по оси ординат – процентный состав вымерших животных). Этот рисунок наглядно показывает, что гигантские вымирания были [4].

В качестве одной из самых серьезных угроз Н.Н. Моисеев называл *жесткую бифуркацию* в климатической системе, после которой места для нашего вида на планете может не остаться.

Теория самоорганизованной критичности – один из разделов синергетики – показывает, что дело не в гигантских природных катастрофах. Возможно формирование длинных причинно-следственных связей в системах, находящихся «на кромке хаоса», которые могут привести к катастрофическим событиям [4].

Но доступны ли эволюционные процессы для конкретного анализа с помощью математических моделей? Великий философ Г.В.Ф. Гегель (1770 – 1831) полагал, что «Математика – наука точная, потому что она наука тощая». Иными словами, за строгость, общность и определенность математических результатов мы платим узостью класса доступных для исследования моделей и абстрактностью аппарата, далекого от ответа на реальные, практические вопросы.

Однако это время миновало. Возможности математического моделирования многократно расширились. Это наглядно показывает такой раздел синергетики как *искусственная жизнь*. В этом подходе исследуется виртуальный эволюционный процесс. Агенты, моделируемыми компьютерными программами, имеют генотип. На его основе формируется фенотип при участии факторов внешней среды. Агенты имеют возможность двигаться, отдыхать, размножаться, вырабатывать цели и стратегии. Число стратегий даже для достаточно простых игр такого сорта может многократно превышать число атомов во Вселенной. Тем не менее, исследователи полагали, что в их компьютерных экспериментах произойдет выход на две стратегии (так же, как в модели Лотка-Вольтерра) – «голуби» (индивидуальная защита, бегство) и «ястребы» (индивидуальное нападение). Результаты оказались совсем иными. Например, такими, как показаны на рис. 2 (любезно предоставленном М.С. Бурцевым).

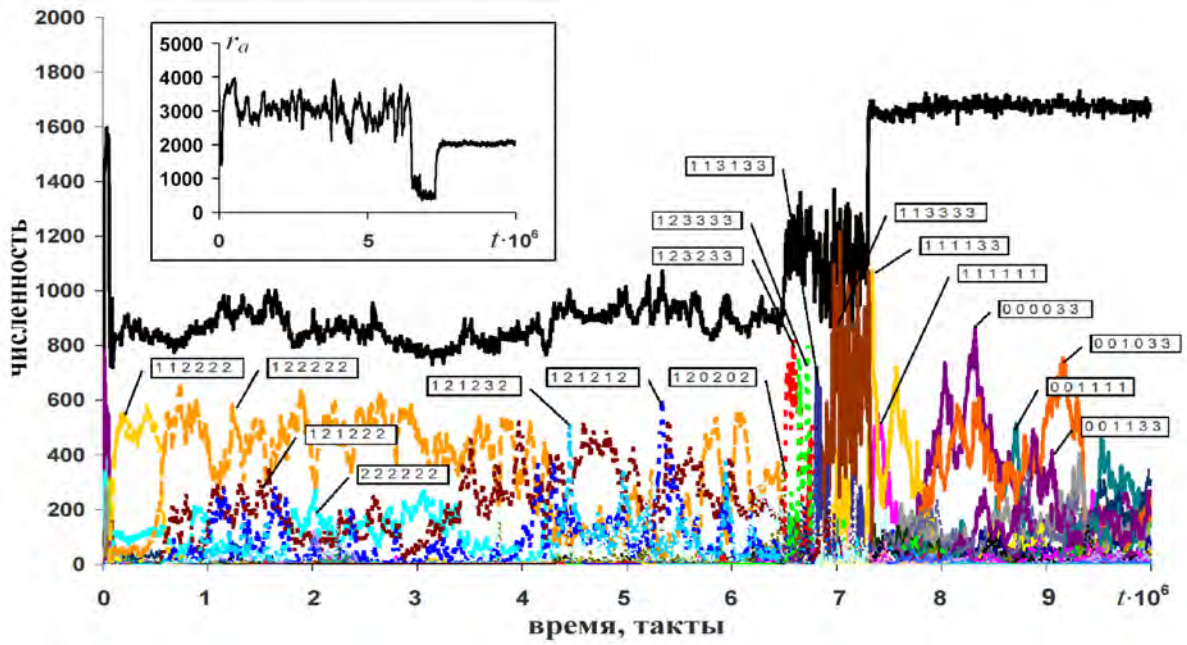


Рис. 2. Динамика численности видов с различными стратегиями в ходе эволюции искусственной биосферы. В прямоугольниках на рисунке указаны геномы взаимодействующих видов.

– Стратегий оказывается гораздо больше. Например, «жаворонки» (коллективная защита»), «вороны» (коллективное нападение) и т.д.

– Численность видов, имеющих разные стратегии, не выходит на постоянные значения или на колебательный режим, а меняется хаотическим образом.

– В системах такой сложности время от времени происходят *революции*, меняющие набор выигрышных стратегий («и последние становятся первыми»).

Например, такие модели позволяют объяснить формирование и поддержание альтруизма в биологических сообществах. В самом деле, альтруизм – это готовность отдать кому-то часть своего жизненного важного ресурса. После этого вероятность дающего выжить и произвести потомство уменьшается. И через несколько поколений особей, следующей такой «странной стратегии», не должно остаться. Но без них вид не может выжить.

В чем же дело? В самоорганизации. В том, что сообщество решает не вопрос выживания отдельной особи, а передачи генов, отвечающих за важные в данной стратегии качества в будущее. В большей степени это соответствует концепции Р. Докинза, представленной в книге «Эгоистичный ген» [5]. В соответствии с его взглядом главными «действующими лицами» в эволюционной игре являются гены, стремящиеся к максимальному распространению в биосфере.

Подводя итог, можно сказать, что модели и инструменты, позволяющие описывать и прогнозировать масштабные эволюционные процессы, сейчас есть. Их можно активно использовать с экобионике.

«Подождите десяток другой лет,
и вы увидите взлет синергетики,
которая преобразит мир!»

С.П. Курдюмов

Промышленный вызов. Мы являемся техногенной цивилизацией. Самоорганизация привела к созданию инструментов, важных для организации коллективных действий. Это позволило передавать *жизнесберегающие технологии* в пространстве (из региона в регион) и во времени (от поколения к поколению), и, в конечном счете, создать современное технологическое пространство.

Ключевыми задачами науки являются *прогноз, управление, создание технологий.*

Важнейшим событием в технологическом пространстве, заслуживающим детального исследования с позиций экобионики, является превращение математики в отрасль промышленности. Развитие этой отрасли имеет стратегическое значение для цивилизаций, соперничающих в борьбе за невосполнимые природные ресурсы.

Развитие математической отрасли парадоксально. Обычно телегу ставят позади лошади – сначала ставится проблема, а затем создаются инструменты для ее решения. С созданием вычислительной техники все произошло иначе – ни одна технология не развивалась в таком темпе. Инструмент многократно опередил потребности сегодняшнего дня.

Степень интеграции элементов на кристалле Q (а с ней и быстродействие компьютеров) более полувека развивается в геометрической прогрессии в соответствии с законом Мура:

$$Q \sim 2^{(t/\text{года})}.$$

В результате этого быстродействие компьютеров увеличилось за прошедшее время в 10^{18} раз по сравнению с первыми образцами (рис. 3). В мире сейчас работает более 6,2 млрд компьютеров. Эта техника преобразила мир. Достаточно проехаться в вагоне метро, чтобы убедиться, что почти все сидят, уткнувшись в свои мобильники и смартфоны. Развитие компьютерного пространства привело к тому, что значительная часть населения превратилась из экстравертов и интровертов.

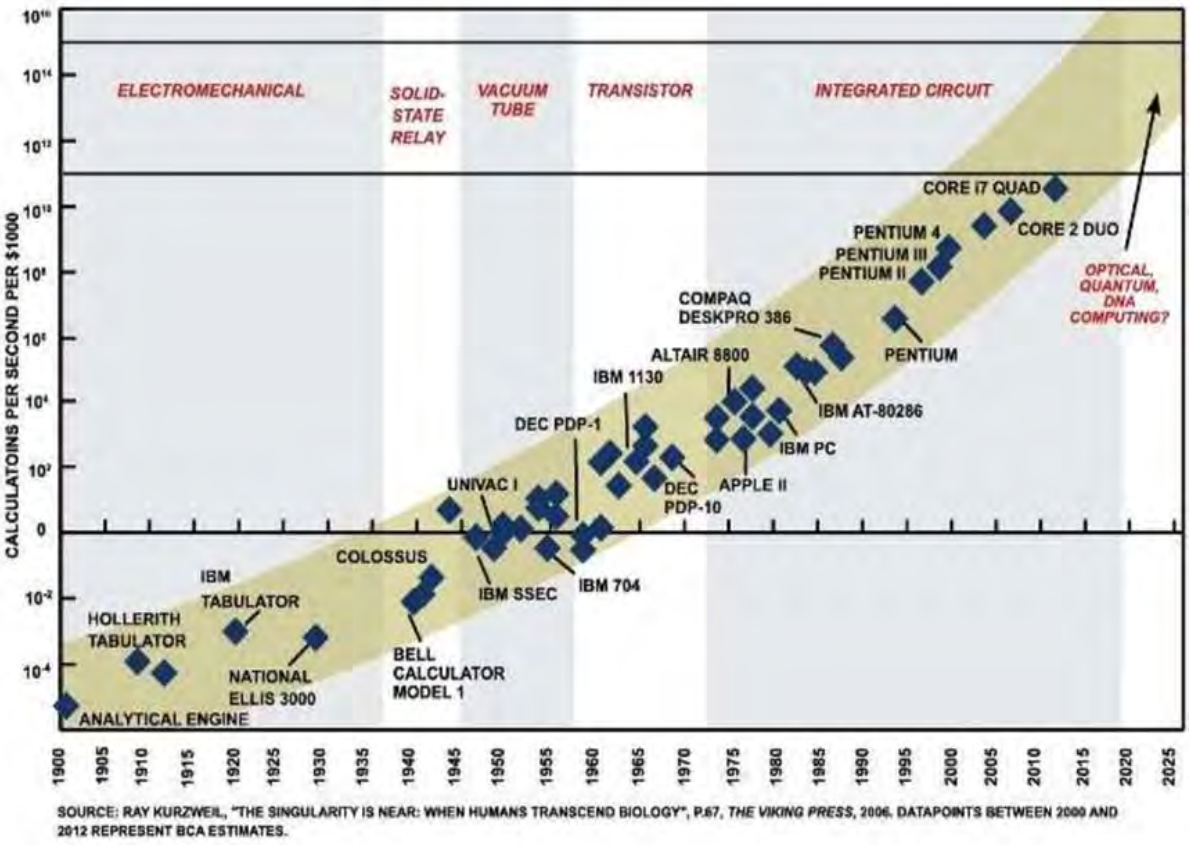


Рис. 3. Быстродействие средств вычислений в ходе развития вычислительной техники. Очевидно, что быстродействие на этом интервале росло в геометрической прогрессии.

После открытия Рамоном-и-Кахалем и Камилло Гольджи того, что мозг состоит из нервных клеток – *нейронов* (Нобелевская премия в области физиологии и медицины 1906), возник принципиальный вопрос. Нейроны – сравнительно простые клетки, сравнимые по сложности с другими клетками организма. Откуда же берется сознание, память, целеполагание, наша психика? Ответ на этот вопрос, который сейчас разделяет большинство ученых, связан с самоорганизацией, формированием, усилением или ослаблением связей между нейронами в ходе их совместных действий. Это направление получило название *коннекционизм* (от английского слова connect – связывать).

С попытками использовать принципы организации головного мозга в компьютерных системах связана происходящая в настоящее время эволюция в области *искусственного интеллекта* (ИИ).

Начиная с 1956 года, в данной области развиваются два подхода – *формально-логический* («чистый» ИИ) и *нейросетевой* («грязный» ИИ).

Первый подход исходит из того, что элементы сознания реализует сложная формально-логическая структура, которую в той или иной степени должна воспроизводить компьютерная программа. Второй подход использует *самоорганизацию* элементов в нескольких слоях нейронных сетей. Предполагается, что на стадии обучения сеть действует методом проб и ошибок, и в случае ошибок веса связей между нейронами меняются.

Большой прогресс был связан с использованием *алгоритма обратного распространения ошибки.* Этот метод позволяет выделить нейроны, «ответственные за неудачу», менять их связи, а также искать нейроны в предыдущих слоях, «подсказавшие» им неправильный ответ, и корректировать их взаимодействие с «руководителями» из последующего слоя [1, 6]. По сути, этот алгоритм реализует метод Ньютона решения алгебраических уравнений. Вся эта конструкция создавалась, прежде всего, как инструмент решения задачи распознавания образов по большому набору признаков (выявление больных и здоровых, «своих» и «чужих», правильного чтения звука в отличие от неправильного и т.д.). Грубо говоря, императив этого подхода – «сознание – это распознавание образов».

Революция, произошедшая в последнее десятилетие, связана с тем, что количество датчиков, анализирующих объект (сенсоров), удалось увеличить до сотен миллионов и миллиарда, а число слоев сети, обрабатывающих информацию, до сотен. Это привело к тому, что доля «грязных» моделей ИИ с 2010 года опередила долю «чистых» и при решении многих задач существенно превзошла человека (рис. 4).

Рис. 4. Развитие формально-логических и нейросетевых систем искусственного интеллекта с течением времени. Видно, что нейросетевые инструменты приобрели значительное преимущество.

Показателем нового уровня развития нейронных сетей стал матч нейросетевой программы AlphaGo против чемпиона мира по игре в Го Ли Седоля. Матч закончился со счетом 4:1 в пользу программы. Следующая версия игры выигрывала уже у всех ведущих игроков. В частности, чемпион мира из Китая Кэ Цзе признал: «В прошлом году я думал, что стиль игры AlphaGo близок к человеческому. Но сегодня я понял, что она играет как бог игры Го» [6, с. 28].

Принципиальным является то, что суперкомпьютер не запоминал и не обобщал игры людей. Суперкомпьютер был «разбит» на две машины, которые, зная правила игры в Го, играли друг с другом и совершенствовали свои стратегии. Другими словами, машины «начали учить себя сами». Это очень важная веха в развитии не только науки и технологий, но и экономики.

Промышленные революции освободили человека от тяжелой физической работы. Происходящая сейчас цифровая революция должна избавить людей от рутинной умственной деятельности.

Один из ведущих специалистов в области искусственного интеллекта Кай-фу Ли считает, что через 10-15 лет половина работающих в США останется без дела, которым сейчас занимается. И это естественно – такие люди работают в сфере обслуживания и, судя по всему, компьютеры справятся с их работой значительно лучше [7].

Это кардинально изменит социальную структуру общества. Вариант позднего Рима, когда огромное количество людей получает деньги, ничего не делая, представляется достаточно опасным. Здесь возникает множество серьезных вопросов, связанных с проектированием будущего.

Кай-фу Ли пишет: «По оценкам Price Waterhouse Coopers внедрение ИИ добавит 15,7 трлн. долларов к мировому ВВП. Предполагается, что на Китай придется 7 трлн долларов из этой суммы, что почти вдвое больше, чем 3,7 трлн., которые придутся на долю США» [7, с.15,16]. При объеме валового глобального продукта в $ 80 трлн это очень серьезная доля. Стратегическим преимуществом в настоящее время становится объем данных, с которыми работают системы искусственного интеллекта. Это выводит Китай с его огромным населением и своеобразной социальной структурой на первую позицию.

Экономика диктует замену людей на системы ИИ. Например, в отделе кадров человек может в течение дня побеседовать с 40-50 кандидатами, а робот, уже созданный и используемый в России, с 1600 людьми. И средств на его обслуживание требуется на порядок меньше, чем на зарплату сотрудников-людей.

Масштабы предстоящих перемен огромны. По данным ООН в ближайшее время работы лишится 25% россиян, 40% канадцев, 70% эфиопов. По оценке Me Kinsey Institute к 2030 году от 400 до 800 млн человек останутся без работы. Конечно, социально-экономические структуры, обеспечивающие воспроизводство общества, должны кардинально измениться. Это огромный круг важных и интересных задач для экобионики!

Следующие проблемы, решение которых не требует промедления, – *ресурсный переход*. Необходимо резко уменьшить объем использования невосполнимых ресурсов. Великий русский химик Д.И. Менделеев считал, что в природе нет отбросов (отходов), а есть ресурсы, которые надо научиться использовать. По его мысли, топить нефтью и газом так же «разумно», как бросать в печь ассигнации. Должна произойти революция в производстве материалов. Пластики, заменяющие железо и сталь, в 3-4 раза дешевле последних. Основная доля энергии, идущей на производство материалов, вкладывается в металлургию. Мы все еще живем в «железном веке».

Становится необходимым переход от нынешней линейной к *циклической экономике*, предусматривающей многократное использование созданного: «Мы не так богаты, чтобы использовать дешевые вещи». В циклической экономике *критерием* ее *успешности становится не рост ВВП, а качество управления запасами*. Среди ее принципов можно выделить следующие.

Не ремонтировать то, что не сломалось.

Не делай то, что можно починить.

Делай так, чтобы можно было чинить и модернизировать.

Курс на вечные и добротные вещи.

Невосполнимых природных ресурсов осталось гораздо меньше, чем нам хотелось бы, поэтому человечеству придется быть «цивилизацией старьевщика».

Чем раньше это будет осознано, и будут приняты необходимые меры, тем выше будет уровень жизни следующих поколений.

Технические возможности уже сейчас позволяют делать автомобили с пожизненной гарантией. Вакуумный транспорт, в котором по трубе на

магнитном сверхпроводящем подвесе доставляются грузы со «сверхсамолетной» скоростью (до 6400 км/час) позволяет многократно уменьшить энергетические расходы на транспортную систему.

В Швейцарии молоко продают в бутылках, которые в среднем используются 27 раз. Во многих странах уже создаются элементы циклической экономики.

Актуальным в настоящее время является ответ России на санкции Запада. Он очевиден – это переход к созданию добротных вещей с очень длительным или бесконечным временем использования.

Мой холодильник «ЗИЛ» работал без каких-либо поломок 60 лет. Японские модели, имеющиеся в продаже, рассчитаны на три года, после которых их надо менять или проводить дорогой ремонт. При этом они требуют втрое больше электроэнергии на каждую калорию «холода». Сравним 60 лет и 3 года. Мы, видим, что масштабы холодильной промышленности могут быть уменьшены уже сейчас в 20 раз. Такая ситуация имеет место во многих областях. Например, сейчас многие люди хотят жить в невысоких домах, иметь личный дом с участком, – в компьютерной реальности, когда значительная доля населения работает с информацией, это оправдано. Для чего же нужны бетонные, не слишком удобные чудовища, утилизация которых в перспективе будет большой проблемой, – наследники индустриальной эпохи?! Мы входим в постиндустриальный мир и наши города должны быть иными! Это ли не задача для экобионики? Жадность и глупость не должны побеждать расчет, здравый смысл и желание строить лучшее будущее.

«Над чем бы ученые ни работали,
у них всё равно получается оружие».
К. Воннегут

Режимы и перспективы оборонного комплекса в контексте экобионики. В настоящее время решается вопрос о том, каким будет XXI век. Капитализм исчерпал свои возможности. Транснациональные корпорации (ТНК), имеющие огромную власть и возможности, очень далеки от «капиталистической классики» с ее идеями конкуренции, предпринимательства, принципом «священной частной собственности». Как и писал в начале XX века В.И. Ленин, империализм превратил многие основы капитализма в их противоположность.

Как же сохранить власть и влияние одному проценту (богатейших людей) мира? Давосский экономический форум предлагает сохранить власть, используя компьютерную реальность как жесткий социальный регулятор. Французский социолог Жак Аттали называет это *эпохой гиперконтроля.* Один процент *постоянно знает все обо всех* из 99%, которыми управляет. Но проблема здесь состоит в том, что *проект глобализации*, предпринятый Западом с целью установления мирового господства, не удался. Америка теряет доминирующую роль, появляются другие центры силы, ряд цивилизаций отторгают смыслы и ценности Запада и его жела-

ние управлять ими. И здесь в ход идет другой инструмент – столкновение цивилизаций в борьбе за тающие природные ресурсы и война между ними. При этом несколько мировых войн должны помочь «затормозить» историю и повторить на новом техническом и социальном уровне историю XX века в XXI столетии.

Естественно, на ином уровне идеи экобионики рассматривались ранее политологами, географами и стратегами, мыслившими о войнах.

Можно сказать, что XIX век был веком *геополитики* (акцент на географии контролируемых территорий, численности населения стран и цивилизаций); XX столетие – век *геоэкономики* (акцент на ресурсах и торговых путях, отсюда и политика санкций); XXI век – время *геокультуры* (сфера столкновения – образ будущего, тип жизнеустройства, образы массового сознания).

При этом особого внимания заслуживает зона, практически недоступная для морского проникновения (Русская равнина, Западная Сибирь и Средняя Азия) – Хартленд, зона «континентальной силы».

Британский геополитик Х. Маккиндер предложил формулу: «Кто правит Восточной Европой, господствует над Хартлендом; кто правит Хартлендом, господствует над Мировым островом; кто правит Мировым островом, господствует над миром» [8].

Целью США среди прочих является ослабление и расчленение России. Американский политолог З. Бжезинский сформулировал императив американской политики в отношении нашей страны: «В XXI веке Америка будет развиваться против России, за счет России и на обломках России». По мнению руководителя американской разведывательно-аналитической организации STRTFOR Д. Фридмана, высказанному более десятка лет назад, Россия и США ждет новая холодная война и жесткая конфронтация: «Внутренние проблемы, особенно на юге, будут отвлекать внимание России от Запада. В конце концов, страна развалится и без войны (как уже развалилась в 1917 г., и это произошло снова – в 1991 г.), а вскоре после 2020 г. рухнет военная мощь России» [9, с. 162]. Стратегическая цель России – не допустить реализации этого сценария.

В «высшей лиге» мировой политики находятся *сверхцивилизации*, имеющие более 400 млн. населения и ВВП, превышающий $20 трлн. таких игроков. Сейчас соответственно три – это США с их провинциями Канадой и Мексикой, великий Китай и Европейское сообщество.

В геополитике вновь и вновь разыгрываются схожие с прежними сюжеты. В схватке трех царств каждое из них стремится ослабить или уничтожить два других и добиться доминирования. Подобные события прекрасно описаны в историческом романе XIV века «Троецарствие» [10]. Его считают одним из четырех великих классических романов китайской литературы. Роман рассказывает о периоде Троецарствования в истории Китая, начиная с 169 года нашей эры и заканчивая воссоединением земель в 280 году государством Западная Цзинь.

В новой исторической реальности существенной вновь становится геоэкономика. Китайский проект «Один пояс – один путь» (рис. 5) направлен на установление быстрых и дешевых транспортных путей с Европой. Этот проект усиливает и Китай, и Европу, вытесняя Америку из Восточного полушария. США отбрасывается назад в историческом развитии.

Логика США тоже понятна – конвертировать технологическое превосходство в военное и экономическое доминирование в мире, стать единственным доминантом, каковым в конце XIX века была Великобритания. Тогда попытки привести мировую систему в соответствие с экономическими и технологическими реалиями завершилась Первой мировой войной. Поэтому военный конфликт между Россией и Украиной, перерезающий Шелковый путь, очень нужен США. И чем дольше он будет продолжаться, тем для них лучше. При этом «лишней» оказывается Европа, испытывающая ко всему прочему большие трудности с энергоносителями. Цена на электроэнергию в США в несколько раз дешевле, чем в Европе, что, соответственно, будет переводить многие промышленные предприятия с европейского континента в Америку. Именно такое развитие событий десятилетия назад планировалось американскими стратегами: «Если бы я мог высказать только одну мысль о XXI веке, я бы сказал, что европейская эра закончилась, а североамериканская – началась и США будут доминировать на мировой арене следующие 100 лет. Ход событий в XXI в. будет определяться Вашингтоном» [9, с. 26].

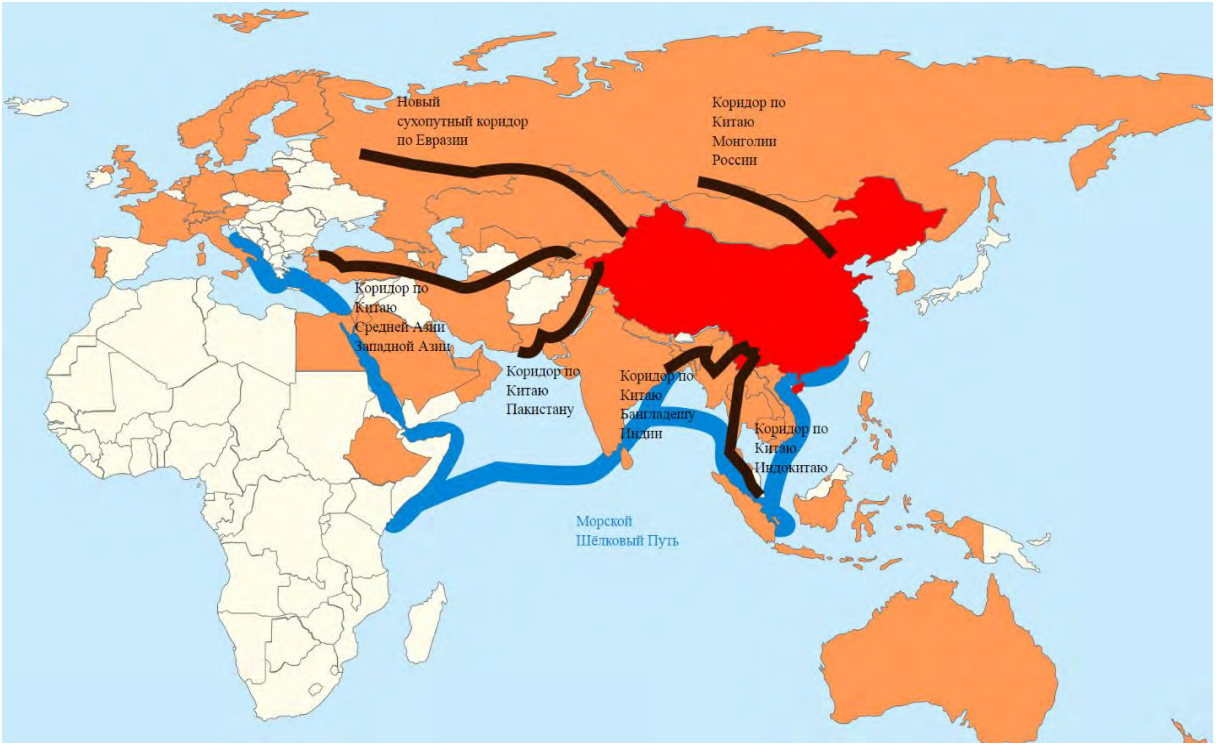


Рис. 5. Схема транспортных магистралей проекта «Один пояс – один путь», нового Шелкового пути.

Посмотрев на происходящее с позиций экобионики, можно сказать, что мы имеем типичную ситуацию, не раз встречающуюся в биологической эволюции. В ней порой возникали Абсолютные Хищники, которых со временем тем или иным способом превосходили другие виды, создававшие свои технологии выживания и развития. Экобионике и здесь есть, чем заняться.

Каковы возможности экобионики в прогнозировании развития и конкретной реализации систем вооружений? Они огромны! Это наглядно показал выдающийся философ, фантаст и футуролог Станислав Лем (1921 – 2006).

Сейчас очень популярна мысль о том, что вскоре «наш» ИИ будет воевать с «их» ИИ. Человек оказывается лишним в этой игре – действовать надо со скоростью, многократно превышающей то, что доступно человеку. «Последние решения» при таком раскладе будут приниматься не людьми, а машинами. Такой поворот событий, который можно назвать «Тупиком ИИ» Лем предвидел и описал в шутливом эссе, которое оказалось намного более конструктивным и полезным, чем тома документов, подготовленные профессиональными военными. Итак: «Появляющаяся одна за другой новые системы оружия характеризовались возрастающим быстродействием, начиная с *принятия решений* (атаковать или *не* атаковать, *где, каким образом, с какой* степенью риска, *какие* силы оставить в резерве и т.д.); и именно это возрастающее быстродействие снова вводило в игру фактор случайности, который принципиально не поддается расчету. Это можно выразить так: системы неслыханно быстрые ошибаются неслыханно быстро. Словом, гонка вооружений вела к «пирровой ситуации» [11, с. 551].

Отсюда следует очевидный вывод – следует «тормозить» военные системы, чтобы ключевые решения принимали люди, а не машины. Вероятно, надо заключать международные договоры, принимать меры, блокирующие эту ситуацию, стремительно меняющуюся от плохого к худшему. Делать это надо быстро, пока не стало слишком поздно.

В настоящее время происходит революция в развитии систем вооружений – осуществляется переход к оружию, использование которого не требует присутствия солдат на поле боя, а также к оружию, которое трудно будет уничтожить. И этот поворот предвидел Лем! Здесь он исходил из принципов теории самоорганизации: «В то же время боевой единицей становилась *микроармия*, лишь как целое обладавшая заданной мощью и боеспособностью (точно так же, только рой пчел, а не отдельная изолированная пчела, может рассматриваться как самостоятельный организм)».

Поскольку театры военных действий были постоянно подвержены опасности ядерного удара, который уничтожает не только боевые силы, но и всякую связь между войсками и командованием, появились неживые микроармии множества типов, в своих действиях руководствовавшиеся двумя противоположенными принципами. Согласно ПЕРВОМУ ПРИНЦИПУ – принципу *автономности* такая армия действовала, словно боевой поход муравьев, волна болезнетворных микробов или нашествие саранчи.

Согласно ВТОРОМУ ПРИНЦИПУ – военной неостратегии, принципу *телетронизма* микроармия была одной огромной (плывущей по морю или рекам либо летающей) *совокупностью самособирающихся элементов.* Поэтому такие армии называли *самосборными»* [11, с. 564-566].

В терминах биологии мы имеем дело с ароморфозом – выходом в ходе эволюции на принципиально новый уровень. Конечно, и здесь было бы важно позаботиться, чтобы этого не произошло. Тем не менее, второй принцип уже реализуется в бинарных отравляющих веществах. Они состоят из двух безопасных компонентов, которые легко транспортировать. Оружие возникает лишь при их взаимодействии.

Экобионика требует междисциплинарности. Если бы этот подход был развит и полученные результаты были использованы, то российским солдатам и ополченцам воевать в ходе специальной военной операции было бы значительно легче. Большие проблемы вызывает использование системы реактивной артиллерии HIMERS (выпускается с 2003 года), гаубицы M777 (с 2005 года), беспилотники Байрактар ТБ2 (с 2014 года), системы спутников на низких орбитах Старлинк (с 2018 года). Призывы создать эффективных конкурентов для них или соответствующие системы защиты от них не были услышаны, поэтому сейчас многое приходится делать срочно.

Говоря языком теории эволюции, в течение последнего десятилетия произошла «мутация», в результате которой появились новые виды вооружений, существенно превосходящие существующие, либо имеющие принципиально новые свойства. Жизнеспособная система должна на них быстро и эффективно реагировать. Как это сделать, могла бы подсказать экобионика.

Не менее важный момент связан с тем, что в ходе развития систем вооружений (как и в ходе эволюции) происходит освоение новых средств противостояния. Перечислим их и при необходимости можем обсудить каждую их них подробно.

В прошлом: Суша (до н.э.), Море (до н.э.), Подводная среда (1914), Воздух (1939), Космос (1962), Кибернетическое пространство (1991), Массовое сознание (1991), Город боя (2014).

В будущем: Биопространство, Нанопространство, Глубокий океан, Техногенная среда, Геофизическая среда, Атака на сознание.

Кто предупрежден, тот вооружен и предупредить о многом может и должна экобионика.

> «Вид Homo Sapiens – вовсе не вершина эволюции, и человек будущего будет резко отличаться от современного, «структуры мозга будут изменены по существу».
>
> *В.И. Вернадский*

Открывая дверь в сказку… Бионика призывает «подсмотреть» у природы решения различных задач и перенести их аналоги в технические системы. Однако естественным представляется следующий шаг – посмот-

реть на наш организм как на техническое устройство и постараться перенести «подсмотренное» в него. Это еще один магистральный путь развития экобионики.

Одной из ключевых проблем естествознания является выяснение механизма морфогенеза. Дело в том, что все клетки несут одну и ту же наследственную информацию. Как же клетки «узнают», что потомкам одной из них предстоит стать частью мозга, а другой – желудка? В попытке разрешить эту проблему были построены удивительно красивые математические теории Джоном Нейманом, Аланом Тьюрингом, Ренэ Томом.

Эмбриологи в первой половине XX века считали, что процесс клеточной дифференциации – «билет в один конец», что путь назад невозможен, подобно тому как взрослому человеку нельзя вернуться в детство. В первичном состоянии, которое называют плюрипотентным, все пути для дальнейшего развития открыты; далее, казалось, что эти возможности теряются.

Однако оказалось, что все обстоит иначе. В 2012 году Нобелевская премия по физиологии и медицине была вручена Джону Гордону и Шинья Яманака «за открытие факта, что зрелые клетки могут быть «перепрограммированы» обратно в плюрипотентное состояние».

Всегда считалось, что живые организмы отличаются от технических систем тем, что для них нет запасных частей. Это ограничение постепенно снимается. На основе плюрипотентных клеток можно вырастить в лаборатории новый орган взамен утраченного. К тому же появляется возможность замещать больные или утраченные клетки, восстанавливая ткани. Это крайне важно для лечения болезней Альцгеймера, Паркинсона, диабета, последствий инфаркта. Разумеется, до клинической практики и замены многих органов – путь неблизкий. Мало «сделать» ткань – важно, чтобы удалось подключить ее к нервной и кровеносной системам. Однако некоторые органы уже выращиваются и пересаживаются. Все это – *путь к кардинальному повышению продолжительности жизни человека*. Как говорит Шинья Яманака: «Цель не в том, чтобы человек жил долго, но в том, чтобы он жил долго, оставаясь при этом здоровым».

Одним из прорывов науки XX века стал проект «Геном человека», позволивший создать технологии для выяснения (секвенирования) генома человека, то есть выяснения текста примерно из 3-х миллиардов оснований (А – аденин, Т – тимин, Г – гуанин, Ц – цитозин). Настоящий прорыв произошел именно здесь – за 10 лет цена секвенирования генома уменьшилась в 20 тысяч раз (рис. 6). Это кардинально изменило медицину, фармацевтику, сельское хозяйство, правоохранительную деятельность, национальную оборону.

Этот проект дал огромные доходы. Около $3,2 млрд, вложенных США в проект «Геном человека», еще до начала правления Барака Обамы дали $800 млрд. прибыли (1/140).

В свое время Линда Авей и Сергей Брин создали компанию «32 and me», которая по присланному геному давала информацию о сотне с лишним болезней, по отношению к которым человек уязвим, и по сотне, которые ему не угрожают, а также рекомендации по желательному образу жизни.

Мы пока не умеем достаточно хорошо «читать» геном. Но это дело недалекого будущего. И это изменит многое. Лауреат Нобелевской премии по физиологии и медицине (1962) Джеймс Уотсон во время поездки в Москву дал удивительный прогноз. Через 10-15 лет, анализируя геном ребенка, еще находящегося в утробе матери, мы будем знать, кто придет в этот мир – посредственность, маньяк, выдающийся математик, блестящий спринтер или кто-то еще. Значит, мы будем знать, чему следует учить этого человека. Такое знание кардинально изменит нашу цивилизацию. Как? – вопрос к экобионике.

Рис. 6. Изменение стоимости секвенирования генома человека в зависимости от времени. Прогресс представляется удивительно быстрым.

Нобелевскую премию по химии 2020 года получили Э. Шарпантье и Д. Дудна, создавшие *технологию редактирования генома CRISRP/Cas9*. С ее помощью можно изменить гены растений, животных, микроорганизмов и человека.

Это принципиальный результат. Как правило, мы имеем дело с *вертикальной эволюцией*, происходящей плавно, медленно, стихийно в соответствии с дарвиновской триадой. Создание растений и животных с заданными свойствами до сих пор является сложным и долгим процессом, даже несмотря на современные технологии.

Однако картина кардинально меняется – появляется возможность *горизонтальной эволюции* – быстрого целенаправленного создания желаемых организмов, в перспективе, «детей по заказу». Мы живем около 3-х миллиардов секунд, – значит, не можем уделить даже секунду на осмысле-

ние роли каждого основания в геноме. Следовательно, анализ и оперирование придется поручить вычислительным машинам и роботам. При этом важно не получить «подарок Люцифера», – качеств и свойств, которые наряду с желаемыми получит «продукт» такой технологии. Кроме того, история учит, что «сверхчеловек» часто оказывается недочеловеком.

Другими словами, у человека появляется роль Бога (в дарвиновском понимании), творца биосферы. К этой роли мы пока не готовы. Кроме того, локальные изменения могут определить системные свойства нашей реальности. И это вновь вопрос к экобионике.

Похожая реальность, опирающаяся на массовое использование генетических технологий, описана в антиутопии Олдоса Хаксли «О дивный новый мир», изданной в 1932 году. Прошел почти век со дня публикации, и мы с тревогой перечитываем слова русского философа Николая Бердяева: «Но утопии оказались гораздо более существенными, чем казалось раньше. И теперь стоит другой мучительный вопрос, как избежать их окончательного осуществления. Жизнь движется к утопиям» [12, с. 5].

По мнению американского социолога Ф. Фукуямы «дети по заказу» и средства, позволяющие «надевать» любую личность по желанию (одну для работы, другую по выходным и т.д.) приведут человечество к катастрофе. Эпиграфом к одной из глав его книги выбраны слова Мартина Хайдеггера из работы «Вопрос о технологии»: «Угроза человеку исходит, в первую очередь, не от потенциально смертоносных машин и технологических аппаратов. Настоящая угроза всегда направлена против сути человека» [13, с. 13].

Пространство синергетики сейчас очень широко [14] и, конечно, в нем найдется место и для экобионики, и для того, чтобы дать ответы на вопросы, от которых зависит будущее человечества.

«Направление, в котором человек
начинает свое образование,
определят его будущее».

Платон

Что делать дальше? Что нужно сейчас сделать?

1. Создание Института экобионики, ориентированного на междисциплинарность, на использование идей синергетики. Привлечение в Институт специалистов из разных областей, позволяющих целостно и системно описывать, моделировать и понимать реальность.

2. Разработка прогнозов, касающихся стратегии развития ключевых сфер жизнедеятельности. Экобионика носит не только академический, но и прикладной характер. Стратегические ошибки являются самыми дорогими – обычно их не удается исправить на следующих уровнях академической иерархии. И если в результате деятельности исследователей мы сможем не делать хотя бы части из них, то работу ученых будет трудно переоценить. Продолжение семинара по экобионике и организация издания, в котором

будут публиковаться работы по данной проблематике. Научное, образовательное, инженерное, экспертное сообщество, ряд лиц, принимающих решения, должны представлять ход работ в данном направлении.

3. Организация магистратуры в МГТУ им. Н.Э. Баумана и ряде других ведущих вузов, в Академии Генерального штаба, дающую подготовку в области экобионики.

России во многих сферах жизнедеятельности требуются стратегические решения, и экобионика должна помочь их найти.

Литература

1. Малинецкий, Г.Г. Синергетика – новый стиль мышления: Предметное знание, математическое моделирование и философская рефлексия в новой реальности. – М.: URSS, 2022. – 288 с. – (Синергетика: от прошлого к будущему № 105. Будущее России № 35).

2. Моисеев, Н.Н. Человек и ноосфера: от стратегии Природы к стратегии Разума. Эволюция в грядущих десятилетиях. Изд. 2. – М.: URSS, 2021. – 352 с.

3. Вымирание динозавров. Электронный ресурс: https://paleohunters.ru/blog/article/vimiranie-dinosavrov/

4. Бак, П. Как работает природа: Теория самоорганизованной критичности / Пер. с англ. В.Э. Подобеда, А.В. Кондратьева, О.Л. Шевчук. – М.: URSS, Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2014. – 276 с. – (Синергетика: от прошлого к будущему № 66).

5. Докинз, Э. Эгоистичный ген. Пер. с англ. Э. Фомина, П. Петров. – М.: «Corpus (АСТ)». – 1989. – 239 с.

6. Сейновский, Т. Антология машинного обучения: важнейшие исследования в области ИИ за последние 60 лет / Пер. с англ. М. Райтмана, Е.В. Сазановой. – М.: Эксмо, 2022 – 304 с. – (Библиотека MIT).

7. Ли Кайфу. Сверхдержавы искусственного интеллекта. Китай, Кремниевая долина и новый мировой порядок / Пер. с англ. ООО «Манн, Иванов и Фербер». – М.: Манн, Иванов и Фербер, 2019. – 350 с.

8. Геополитика. Электронный ресурс: https://ru.wikipedia.org/wiki/Геополитика

9. Фридман, Д. Следующие 100 лет: прогноз событий XXI века / Пер. с англ. А. Калинина, В. Нарицы, М. Мацковской. – М.: Эксмо, 2010. – 336 с. – (Библиотека Коммерсантъ).

10. Ло Гуаньчжун. Троецарствие / Пер. с кит. В. Панасюк. – М.: Государственное изд-во художественной лит-ры, 1954. – 1584 с.

11. Лем, С. Системы оружия двадцать первого века, или Эволюция вверх ногами / Лем С. Библиотека XXI века / Пер. с пол. К. Душенко. – М.: ООО «Издательство АСТ», 2003. – С. 542-578.

12. Хаксли, О. О дивный новый мир / Пер. с англ. О.С. Сорока, В. Бабкова. – СПб.: Амфора, 1999. – 541 с.

13. Фукуяма, Ф. Наше постчеловеческое будущее: Последствия биотехнологической революции / Пер. с англ. М.Б. Левина. – М.: ООО «Издательство АСТ»; ОАО «ЛЮКС», 2004. – 349 с. – (Philosophy).

14. Малинецкий, Г.Г. Пространство синергетики. Взгляд с высоты. – М.: URSS, 2017. – 248 с. – (Синергетика: от прошлого к будущему, № 60).

УДК 57:007

ЭФФЕКТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ ОБУЧЕНИЕМ И ЭВОЛЮЦИЕЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ

В.Г. Редько,
НИИ системных исследований РАН, г. Москва, Россия,
М.С. Бурцев,
МФТИ, г. Долгопрудный, Московская область, Россия,
e-mail: vgredko@gmail.com, burtsev.m@gmail.com

Аннотация. *Развита и исследована компьютерная модель взаимодействия между обучением и эволюцией при формировании функциональных систем. Продемонстрированы основные эффекты взаимодействия между обучением и эволюцией в процессах формирования функциональных систем: 1) генетическая ассимиляция индивидуально приобретаемых навыков в течение ряда поколений эволюционного процесса, 2) эффект экранирования, при котором сильное обучение тормозит эволюционный поиск оптимального генотипа, 3) эффект влияния нагрузки на обучение.*
Ключевые слова: *функциональная система, генотип, фенотип, эволюция, обучение, взаимодействие между обучением и эволюцией.*

EFFECTS OF INTERACTION BETWEEN LEARNING AND EVOLUTION AT THE FORMATION OF FUNCTIONAL SYSTEMS

V.G. Red'ko,
Scientific Research Institute for System Analysis,
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation,
M.S. Burtsev,
Moscow Institute of Physics and Technology (National research university),
Dolgoprudny, Moscow region, Russian Federation

Abstract. *A computer model of the interaction between learning and evolution at the formation of functional systems has been developed and investigated. The main effects of the interaction between learning and evolution in the processes of formation of functional systems have been demonstrated. These effects are the following: 1) the genetic assimilation of individually acquired skills over many generations of the evolutionary process, 2) the hiding effect, in which strong learning slows down the evolutionary search for the optimal genotype, 3) the effect of the influence of the load on learning.*
Keywords: *functional system, genotype, phenotype, evolution, learning, interaction between learning and evolution.*

Введение. Моделирование взаимодействия между обучением и эволюцией проводились рядом авторов, см., например, [1 - 3]. При этом рассматривалась эволюция популяций обучающихся агентов (модельных ор-

ганизмов), которые имеют генотипы и фенотипы. Генотипы агентов оптимизируются в процессе эволюции путем мутаций и отбора, а фенотипы оптимизируются в течение каждого поколения эволюции путем обучения. Генотипы в течение поколения не меняются, а отбор агентов в следующее поколение осуществляется в соответствии с конечными фенотипами, полученными в результате обучения.

В работе [1] с помощью компьютерного моделирования было продемонстрировано, что обучение может направлять эволюционный процесс к нахождению оптимума. В работе [2] было показано, что эффективное обучение также может, наоборот, препятствовать эволюционной оптимизации, если обучение увеличивает шансы нахождения хорошего фенотипа независимо от генотипа особи. В [2] это было названо эффектом экранирования (Hiding effect). Суть этого эффекта состоит в том, что, если обучение достаточно сильно меняет фенотип особей и особи отбираются при эволюции в соответствии с фенотипом, полученным в результате обучения, то селекция особей, определяемая фенотипом, может слабо зависеть от генотипа. В [2] было также учтено, что процесс обучения имеет дополнительную нагрузку на особь.

Настоящая работа является развитием предыдущих работ авторов [3, 4]. В [4] была построена и исследована модель влияния обучения на эволюцию при формировании функциональных систем. В работе [3] были исследованы эффекты взаимодействия между обучением и эволюцией для простой модели эволюции популяции агентов, генотипы и фенотипы которых определялись цепочками бинарных символов. Основными являются следующие эффекты взаимодействия между обучением и эволюцией [1-3].

1) Генетическая ассимиляция приобретаемых навыков в течение многих поколений эволюционного процесса. При генетической ассимиляции первоначально определенный навык приобретается путем индивидуального обучения и формируется в фенотипе агента, а затем этот навык перекодируется в генотип агента.

2) Эффект экранирования, который приводит к тому, что сильное обучение тормозит эволюционный поиск оптимального генотипа, если оно увеличивает шансы нахождения хорошего фенотипа независимо от генотипа агента.

3) Эффект влияния нагрузки на обучение. Нагрузка на обучение приводит к уменьшению приспособленности агента таким образом, что это уменьшение тем больше, чем больше было изменение фенотипа в процессе обучения. Этот эффект учитывает то, что на обучение требуется энергия и время.

В настоящей работе используется подход работы [4] и методы работы [3]. Развивается модель взаимодействия между обучением и эволюцией при формировании функциональных систем. Путем компьютерного моделирования анализируются перечисленные эффекты.

1. Описание модели. Рассматриваем эволюцию популяции обучающихся агентов. Будем использовать концепцию функциональных систем (ФС), предложенную и исследованную П.К. Анохиным [5]. Отдельная ФС

состоит из ряда элементов, для функционирования ФС необходимо включение в ФС всех этих элементов. Считаем, что новые ФС последовательно добавляются к уже имеющимся у агента ранее сформированным ФС.

Каждая ФС кодируется цепочкой бинарных символов. Количество элементов в отдельной ФС равно C. Наличие или отсутствие элемента в рассматриваемой ФС кодируется 1 (наличие элемента) или 0 (отсутствие элемента). Когда все элементы в рассматриваемую ФС введены, то эта ФС считается полностью сформированной (все символы цепочки данной ФС равны 1).

Каждый агент имеет генотип и фенотип. Генотип и фенотип имеют одинаковую структуру, они кодируются цепочками бинарных символов, при этом цепочка генотипа или фенотипа составляется из цепочек символов, описанных выше ФС. Генотипы агентов оптимизируются в процессе эволюции, в результате отбора и точечных мутаций. Интенсивность мутаций определяется параметром P_M: в процессе перехода к новому поколению при передаче генотипа от агента-родителя к агенту-потомку с вероятностью P_M каждый символ в цепочке генотипа меняется случайно на 0 либо 1. В течение поколения генотипы агентов не меняются. А фенотипы агентов оптимизируются в процессе поколения путем обучения. В начале поколения фенотип агента равен его генотипу. В первом поколении эволюции символы цепочек генотипов агентов популяции задавались случайно.

Обучение агентов происходит следующим образом. Поколение длится определенное число тактов времени T_G. Каждый такт времени каждый символ цепочки фенотипа любого агента с вероятностью P_L заменяется на «1». Таким образом, при обучении происходит формирование новых ФС, т.е. число полностью сформированных ФС в фенотипе агента при обучении увеличивается.

В конце поколения определяются приспособленности агентов, эти приспособленности определяются числом сформированных ФС в конечных фенотипах: чем больше число полностью сформированных ФС в фенотипе обученного агента, тем выше приспособленность этого агента.

После окончания поколения происходит отбор агентов в следующее поколение с вероятностями, пропорциональными их приспособленностям. Более конкретно, используется хорошо известный в эволюционном моделировании метод отбора с вероятностями, пропорциональными приспособленностям (fitness-proportionate selection) [https://en.wikipedia.org/wiki/Fitness_proportionate_selection]. Отобранный агент рождает потомка, генотип агента-потомка с точностью до небольших мутаций равен генотипу агента-родителя.

Численность популяции постоянна и равна n. Отбор нового агента в следующее поколение производится ровно n раз, в результате этого численность популяции во всех поколениях равна постоянной величине n.

Таким образом, отбор агентов в следующее поколение осуществляется в соответствии с их конечными фенотипами, оптимизированными в течение текущего поколения в результате обучения, а потомкам передают-

ся модифицированные небольшими мутациями генотипы. Так как потомкам передаются генотипы (а не фенотипы) родителей, то эволюция имеет Дарвиновский характер.

Определим приспособленность агентов. Без учета нагрузки на обучение считаем, что приспособленность агента равна

$$F_0 = \exp(-\rho), \tag{1}$$

где ρ – нормированное расстояние между максимальным числом полностью сформированных ФС для фенотипов агентов в популяции N_{FSmax} и числом полностью сформированных ФС для фенотипа рассматриваемого агента N_{FSi}. Величина ρ равна

$$\rho = (N_{FSmax} - N_{FSi})/N_{FSmax}. \tag{2}$$

Выражения (1), (2) использовались при анализе генетической ассимиляции и эффекта экранирования. Для учета нагрузки на обучение была введена модифицированная приспособленность

$$F_M = F_0 \exp(-\alpha D_L), \tag{3}$$

где α – параметр влияния нагрузки на обучение; D_L – изменение числа ФС в фенотипе рассматриваемого агента при обучении.

При моделировании анализировались два типа процессов: 1) эволюция популяции обучающихся агентов и 2) эволюция без обучения.

2. Результаты моделирования. Были использованы следующие параметры моделирования: численность популяции агентов $n = 100$, число символов, кодирующих одну ФС, $C = 10$, вероятность замены символа на «1» в фенотипе при обучении $P_L = 0{,}5$, длительность поколения (число тактов времени в поколении) $T_G = 2$ или 20, параметр интенсивности точечной мутации в генотипе агента-потомка при переходе к новому поколению $P_M = 0{,}0005$, параметр влияния нагрузки на обучение $\alpha = 0{,}003$.

Генетическая ассимиляция. При анализе генетической ассимиляции и эффекта экранирования влияние нагрузки на обучение не учитывалось, т.е. приспособленность определялась выражениями (1), (2). Только в подразделе «Эффект влияния нагрузки на обучение» учитывалась эта нагрузка и приспособленность определялась тремя выражениями (1) - (3).

Далее под числом ФС N_{FS} подразумевается число полностью сформированных ФС, т.е. число реально функционирующих ФС. Зависимость среднего по популяции числа ФС в генотипах агентов N_{FS} (т.е. числа ФС, кодируемых генотипами) от номера поколения эволюции G при наличии обучения и без обучения для небольшой длительности поколения $T_G = 2$ представлена на рис. 1.

Зависимость среднего по популяции числа ФС в генотипах и фенотипах обучающихся агентов N_{FS} от номера поколения G представлена на рис. 2. Видно, что число ФС в генотипе обученного агента близко к числу ФС в его фенотипе.

Рис. 1, 2 демонстрируют явную генетическую ассимиляцию – при обучении число ФС в генотипе растет. Рис. 2 показывает, что рост числа ФС в фенотипах (ФС, полученных в результате индивидуального обучения) приводит к росту числа ФС и в генотипах. А если обучение отсутствует (нижняя кривая на рис. 1), то рост числа ФС в генотипах радикально меньше, чем при наличии обучения.

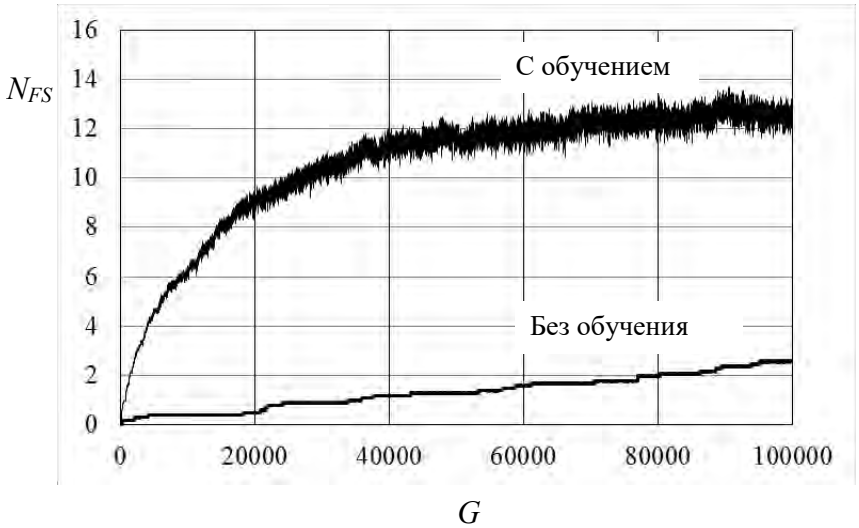


Рис. 1. Зависимость среднего по популяции числа ФС в генотипах агентов N_{FS} от номера поколения эволюции G. Верхняя кривая – при наличии обучения, нижняя кривая – без обучения. Длительность поколения T_G =2. Результаты усреднены по 10 различным расчетам.

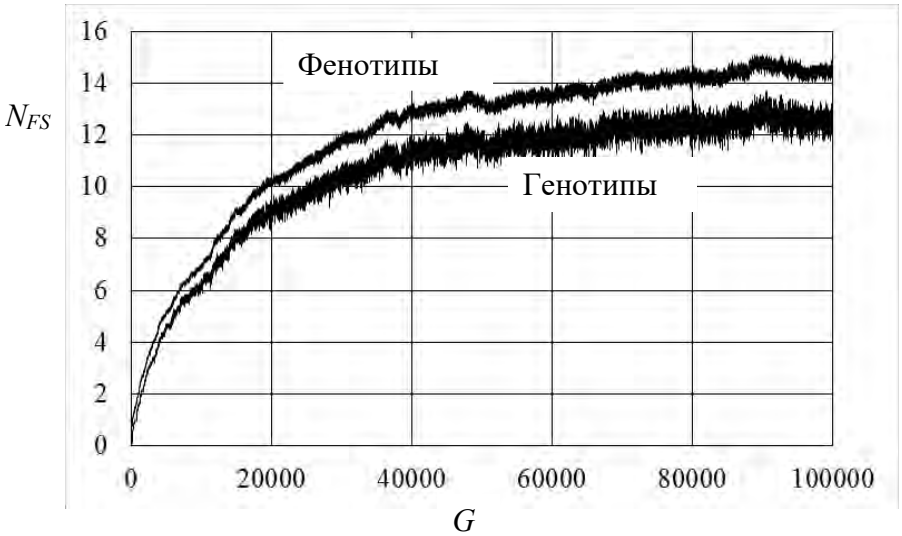


Рис. 2. Зависимость среднего по популяции числа ФС в генотипах и фенотипах агентов N_{FS} от номера поколения G. Верхняя кривая – число ФС в фенотипах агентов после обучения, нижняя кривая – число ФС в генотипах агентов. Длительность поколения T_G =2. Результаты усреднены по 10 различным расчетам.

Эффект экранирования. Чтобы охарактеризовать эффект экранирования, увеличим интенсивность обучения. Положим, что длительность поколения равна 20: T_G = 20. То есть мы увеличиваем число шагов при обучении фенотипов. Рис. 3 показывает зависимость усредненного по популяции числа ФС для генотипов и фенотипов агентов от номера поколения эволюции G при таком «усиленном» обучении.

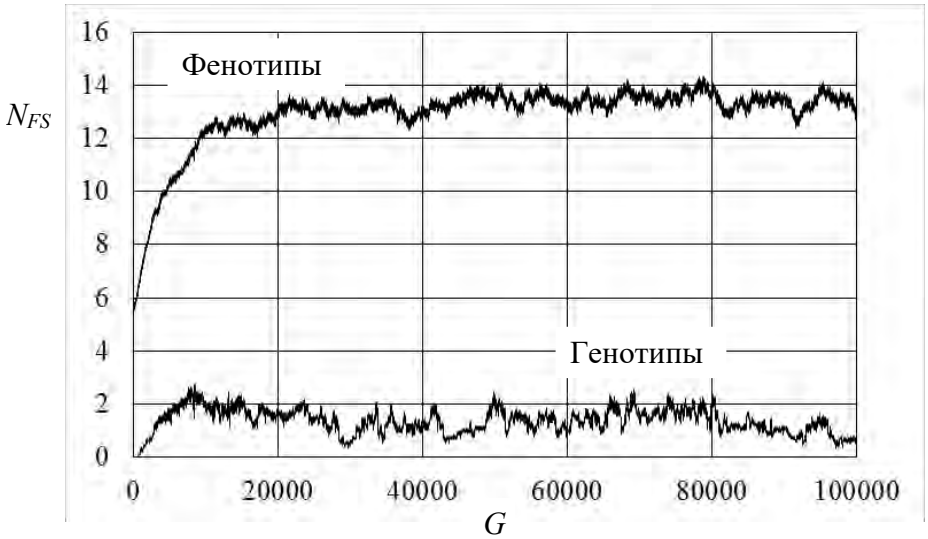


Рис. 3. Зависимость среднего по популяции числа ФС в генотипах и фенотипах агентов N_{FS} от номера поколения G при усиленно обучении. Верхняя кривая – число ФС в фенотипах агентов после обучения, нижняя кривая – число ФС в генотипах агентов. Длительность поколения T_G=20. Наблюдается эффект экранирования: сильное обучение тормозит эволюционный поиск оптимальных генотипов. Результаты усреднены по 10 различным расчетам.

Сопоставление рис. 2, 3 показывает, что при сильном обучении (рис. 3) оптимизация генотипов значительно затрудняется. Явно наблюдается эффект экранирования: сильное обучение тормозит эволюционный поиск оптимальных генотипов, так как оно увеличивает шансы нахождения хорошего фенотипа независимо от генотипа агента (или слабо зависимо от генотипа). А фенотипы оптимизируются при T_G = 20 примерно так же, как и при T_G = 2 (см. верхние кривые на этих двух рисунках).

Эффект влияния нагрузки на обучение. Проанализируем эффект влияния нагрузки на обучение. До сих пор приспособленность агентов определялась выражениями (1), (2). В этом подразделе учитывается влияние нагрузки, и приспособленность определяется всеми тремя выражениями (1) - (3). Введем нагрузку на обучение и рассмотрим, как модифицируются результаты, представленные на рис. 3.

На рис. 4 показаны зависимости среднего по популяции числа ФС в генотипах и фенотипах агентов N_{FS} от номера поколения G. Параметры моделирования такие же, как и для результатов, представленных на рис. 3, только дополнительно учитывается нагрузка на обучение, параметр α=0,003.

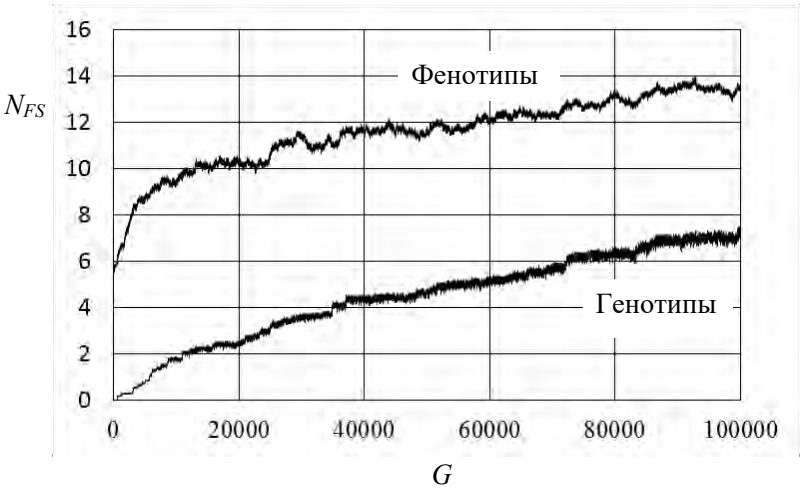


Рис. 4. Зависимость среднего по популяции числа ФС в генотипах и фенотипах агентов N_{FS} от номера поколения G. Верхняя кривая – число ФС в фенотипах агентов после обучения, нижняя кривая – число ФС в генотипах агентов. Учитывается нагрузка на обучение. Результаты усреднены по 10 различным расчетам.

Сопоставление рис. 3, 4 показывает, что введение нагрузки на обучение в этом случае приводит к существенному ослаблению эффекта экранирования и значительному усилению генетической ассимиляции.

Заключение. Таким образом, развита и исследована модель взаимодействия между обучением и эволюцией при формировании функциональных систем. Путем компьютерного моделирования были продемонстрированы основные эффекты взаимодействия между обучением и эволюцией в процессах формирования ФС: 1) генетическая ассимиляция, 2) эффект экранирования, 3) эффект влияния нагрузки на обучение.

Настоящая работа была выполнена в рамках государственного задания по проведению фундаментальных научных исследований по теме «Исследование нейроморфных систем обработки больших данных и технологии их изготовления», проект № FNEF-2022-0003.

Литература

1. Hinton, G.E., Nowlan, S.J. How learning can guide evolution. *Complex Systems*, 1987. – 1(3). – P. 495–502.

2. Mayley, G. Guiding or hiding: Explorations into the effects of learning on the rate of evolution. *In: Proceedings of the Fourth European Conference on Artificial Life (ECAL 97)*. Cambridge, Massachusetts, USA, 1997. – P.135–144.

3. Редько, В.Г. Модель взаимодействия между обучением и эволюционной оптимизацией. *Математическая биология и биоинформатика (электронный журнал)*. 2012; 7(2); 676–691 URL: http://www.matbio.org/2012/Redko_7_676.pdf (дата обращения: 10.01.2023). doi: 10.17537/2012.7.676.

4. Burtsev, M., Anokhin, K., Bateson, P. Plasticity facilitates rapid evolution. *BioRxiv of Cold Spring Harbor Laboratory.* URL: https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2022.05.04.490584v1.abstract (accessed 10.01.2023). doi: 10.1101/2022.05.04.490584.

5. Anokhin, P.K. Biology and Neurophysiology of the Conditioned Reflex and Its Role in Adaptive Behavior. Oxford: Pergamon Press; 1974.

УДК 69.033

ПРИЕМЫ КОРРЕКТИРОВКИ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ФИЗИЧЕСКОЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ БИОНИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ

Н.А. Сапрыкина,
МАРХИ (государственная академия), г. Москва, Россия,
e-mail: nas@markhi.ru

Аннотация. *Рассмотрены инновационные концепции формирования пространства жизнедеятельности с использованием бионических приемов в теоретических исследованиях и практических проектно-экспериментальных разработках. Сценарии решения проблемы разработаны на основе анализа прецедентов ее проявления в следующих направленностях: Компенсационные тренды для решения проблем мегаполиса: «паразитарная» архитектура; Проблемы пассивной безопасности: «интровертная» и враждебная архитектура. Результаты исследования позволили наметить в теории архитектуры некоторые новые бионические подходы, применяемые для перспективной разработки пространственной среды обитания.*
Ключевые слова: *бионические подходы, пространство жизнедеятельности, паразитарная и интровертная архитектура, факторы психологии, компенсационные приемы, пассивная безопасность.*

INSTABILITY CORRECTION TECHNIQUES OF THE PHYSICAL ENVIRONMENT BASED ON BIONIC APPROACHES

N.A. Saprykina,
Moscow Institute of Architecture (State Academy), Moscow, Russian Federation

Abstract. *Innovative concepts of the formation of the space of vital activity with the use of bionic techniques in theoretical research and practical design and experimental developments are considered. Scenarios for solving the problem are developed based on the analysis of precedents of its manifestation in the following directions: Compensatory trends for solving the problems of the metropolis: «parasitic» architecture, Passive security problems: «introverted» and hostile architecture. The results of the study made it possible to outline in the theory of architecture some new bionic approaches used for the prospective development of spatial habitat.*
Keywords: *bionic approaches, living space, parasitic and introverted architecture, psychological factors, compensatory techniques, passive safety.*

Введение. В связи с возрастающей динамичностью жизни общества и увеличением объемов строительства все чаще предпринимаются попытки решить существующие в архитектуре проблемы с помощью бионичe-

ских подходов к формированию пространства жизнедеятельности. Это открывает перспективу использования достаточно оригинальных средств в архитектурной практике на основе изучения строения и поведения биоаналогов, а также механизмов их приспособления к изменениям условий среды, особенно в уникальных ситуациях.

Специальную актуальность и профессиональный интерес этот тренд представляет при корректировке нестабильности физической окружающей среды, где биофизические процессы поддерживаются за счет сознательного вмешательства, активного участия и управления человеком. Системные перемены и новая этика в современном обществе создают условия для использования методов такого направления в бионике как «архитектурный трансплантизм».

Это особенно актуально при внедрении объекта в новый контекст его адаптации к новым функциям. В данном случае представляют интерес исследования механизмов генной инженерии и технологии «самостроя» посредством природной ретрансляции и модификации формы и структуры объекта, которые рассматриваются в данной статье.

1. Постановка задачи. Выявление инновационных концепций формирования пространства жизнедеятельности, использующих бионические методы при корректировке нестабильности физической окружающей среды, на основе анализа проводимых теоретических исследований и практических проектно-экспериментальных разработок в этой области.

2. Сценарии решения проблемы и прецеденты ее проявления

2.1. Компенсационные приемы для решения проблем мегаполиса: «паразитарная» архитектура. В связи с решением проблем плотно застроенных городов в архитектуре возник современный тренд – «паразитарная» архитектура как новый способ увеличения жилой площади, восстановления неиспользуемых городских пространств и организации доступного социального жилья в городских центрах, в особенности в мегаполисах. Суть ее заключается в создании новых архитектурных объемов на базе и пространственном ресурсе старых объектов.

Одна из главных проблем, которую такая архитектура призвана решить – нехватка экономного жилья для бездомных, людей креативного класса и молодежи. Популярность таких построек связана с тем, что эти здания быстро строятся и выглядят достаточно оригинально. Как правило, объекты-«паразиты» отличаются своим стилем, текстурой и строительными материалами от окружающих их зданий. Такие постройки крепятся или строятся либо внутри уже существующих зданий, либо снаружи таким образом, чтобы зависеть от коммунальных услуг основного здания.

Так возникли предложения о постройке арендных капсул, где могли бы остановиться нуждающиеся в ночлеге люди. Эти идеи развиваются не так активно из-за ограничений в строительных правилах, так как это новый вид обитаемого пространства, пользуясь тем, что пока нет законов, которые могли бы урегулировать этот вопрос. Необходимо отметить, что в

России ярко выраженным примером «паразитарной» архитектуры выступает так называемое направление «самострой» как несанкционированное строительство, в основном, в виде пристройки к капитальному объекту [1].

Сооружения паразитарной архитектуры как нового движения в современной архитектуре также используются в качестве нового вида жилья для мобильных городских жителей, которые предпочитают практичное и компактное жилье, много путешествуют и отдают предпочтение минимализму в выборе образа жизни. В то время как многие паразитарные конструкции гармонично сливаются со своими «хозяевами», некоторые образцы подобной архитектуры целенаправленно и заведомо создаются контрастирующими с базовой архитектурой.

«Паразитарная» архитектура – тенденция, которая постепенно растет по мере уплотнения современных городов. Чаще всего примеры таких проектов основываются на восстановлении неиспользуемых городских пространств. Подобные постройки внедряются в существующие застройки, прикрепляются к инженерным сетям и вертикальным коммуникациям основного здания. По назначению и размерам прецеденты «паразитарной» архитектуры возникают в неординарных ситуациях и имеют различные формы [2].

а) *Арт-объекты*. Сооружения-«паразиты» не только выполняют функции приюта для бездомных, привлекают внимание к проблеме жилищных условий в городах, но и выступают как инсталляции. Примером является инсталляция «*Катализатор*» (KAPKAR/HWR-L45), представленной на выставке FLUX-5 (автор Фрэнк Хаверманс, 2009 г.) в Эйндховене (Нидерланды). Подвесной объект (5,5 х 7,4 х 9,0 м) крепится на фасаде (размером 30х30 м) заброшенного здания фабрики Philips, предназначенного для дальнейшей реконструкции [3].

Другим примером может служить деревянные паразитарные инсталляции японского художника Тадаши Кавамата. Автор устанавливает их на 44-метровой высоте Вандомской колонны на площади в Париже или же на последних этажах близлежащих домов XIX века наподобие птичьего гнезда. Эта серия работ носит название «*Tree Hut*» («Хижина на дереве»). Сколоченные из досок «дома» художник расставил по одной из пяти королевских площадей Парижа в рамках ярмарки современного искусства FIAC в 2015 году всего на несколько дней. Цель такой инсталляции является испортить «хижинами из досок» тот безупречный исторический вид, к которому все так привыкли, что непременно заставляет обратить на себя внимание [4].

б) *Сезонные постройки*. В зависимости от ситуации и сезона применяются объекты, которые прикрепляются к основным зданиям. Так, палатки «*paraSITE*» из прозрачного пластика для бездомных (автор Майкл Раковитц в Нью-Йорке, США, 2014 г.), которые можно использовать на улице, не нарушая закон, запрещающий устанавливать палатки и любые структуры размером 3,5 фута (чуть больше метра) или выше [5].

в) *Объекты-симбионты.* Для организации дополнительного помещения на крыше практически любого существующего здания в городских

условиях разработан проект «*Bird's Nest*» (бюро ONZ Architects, Турция). По мнению разработчиков (архитекторы Онат Октем, Зия Имрен и Зейнеп Октем, 2013 г.), такое небольшое сооружение с наклонной крышей, предназначенное для сбора дождевой воды и предотвращения вредных стоков также может быть использовано для предоставления жилья бездомным гражданам, студии для художников или небольшого вспомогательного помещения для гостей.

Благодаря конструктивному решению фотоэлектрические панели на крыше объекта оптимизированы для максимального поглощения солнечной энергии, которой много не потребуется в связи с использованием естественного дневного света для освещения интерьера в течение дня. Приток солнечного света ограничивает необходимость механического нагрева и охлаждения, а также используется для обогрева помещений. Очищенная собранная дождевая вода используется для орошения небольшого сада на крыше, что улучшает качество воздуха и создает здоровую зеленую эстетику в городе [6].

г) *Интегрированные пристройки.* Проект сборного дома-паразита «*Prefab Parasite*» (австралийская студия Lara Calder Architects, 2009 г.) предназначен для освоения неиспользуемых пространств в городских ландшафтах**.** Форма объекта, разработанная с использованием программного обеспечения путем параметрического 3D-моделирования, представляет собой гибкий объект, в котором все компоненты, такие как несущая система, облицовка фасада, перекрытия и лестница, интегрированы в единую параметрическую модель. Интеграция системы проектирования повышает эффективность и точность процесса строительства.

К задней стенке моста крепится монтажная пластина, на которую прикрепляется здание-«паразит». На первом уровне объекта находится главный вход и кабинет. Спальня и ванная комната расположены на втором уровне. Из главной комнаты предусмотрен выход на балкон, защищенный ширмой. Верхние этажи содержат жилое пространство, кухню и небольшую террасу на крыше, которая обеспечивает возможность естественной перекрестной вентиляции. Доступ к проекту осуществляется по выдвижной лестнице, чтобы не мешать пешеходам или движению легкого транспорта [7].

д) *Малогабаритные жилые капсулы.* Примерами могут служить «*Дом-рюкзак*» (автор Стефан Эберштадт, 2018 г.), Лейпциг (Германия) и мобильное жилище «*Дом на аккумуляторной платформе*» на колесах для жизни в условиях плотной застройки мегаполисов Сеула и Токио (архитекторы Future Mobility Solution Group). Жилище может быть использовано как пристройка к основному стационарному дому как мобильный офис, студия или магазин. Конструкция выполнена на основе использования аккумуляторной платформы для электромобиля. Это позволяет доставить мобильное жилище также в места стихийных бедствий для использования в качестве энергоносителя [8].

е) *Капсулы для организации приюта и временных гостиниц.* С целью заботы о бездомных и их защиты предложено создать проект модульных приютов. Жилые капсулы-«паразиты» в проекте «*Homes for Homeless*» архитектора Джеймс Фурзер (James Furzer, 2015 г.), Великобритания (Лондон) выполнены из подручных материалов. Модули прикрепляются к наружным стенам существующих зданий и обеспечивают безопасное убежище для бездомных во время ночного отдыха, защищая их от суровых и непредсказуемых погодных условий Лондона [9].

ж) *Постройки между основными зданиями.* Известным примером является один из проектов – дизайн «*Офиса-паразита*» (Parasite Office) архитектурного бюро «Za Bor Architects» в Москве (авторы Арсений Борисенко и Петр Зайцев). Объект планировался строить из поликарбоната и стекла, на высоте второго этажа, между двумя жилыми зданиями. Целью строительства было использование свободных пространств между домами для создания оригинальных и экономичных офисов, не ограничивающих доступ во дворы. Здание имеет три этажа с выходом на крышу.

Новое здание компенсирует дефицит площадей в тесно застроенной столице. Для подобного строительства не требуется дорогостоящих земельных участков. Легкая трехэтажная стальная конструкция крепится к глухим стенам соседних построек, оставляя проход снизу для людей. Многоугольный главный фасад, обращенный во двор, полностью остеклен и сделан из сотового поликарбоната. В здании предусмотрено несколько кабинетов, переговорная, рабочая зона, место для отдыха и санузел [10].

Другим примером может служить проект «*Жилой дом в Токио*» (фирма Yoshinori Sakano Architects, 2020 г.), расположенный на участке в 26 м^2 в условиях высокоплотной застройки. Внутри дома отсутствует привычное деление на этажи, а функциональные зоны расположены на семи уровнях–полуэтажах, соединенных лестницей. Разделение на микроуровни внутри единого пространства дает ощущение приватности, избегая при этом стесненных маленьких комнат. Фасад минимального дома-паразита облицован алюминиевыми панелями с треугольным рисунком фактуры. На нижнем уровне расположена кухня и столовая, в средних уровнях – гостиная, а на верхнем – спальня. Ванная кухня и кладовая расположены в подземной части дома [11].

з) *Подвесные постройки-паразиты*. В проекте ночного клуба (бюро Urbanplunger, 2012 г.) в Гонконге (Китай) в соответствии с существующей ситуацией, отличающейся чрезвычайно компактной планировкой данного района, основным критерием выступала компактность здания [12]. Архитекторы спроектировали здание, подняв этот объект над землей, буквально «висящим» в воздухе. Пространственная конструктивная структура позволяет всему зданию парить в пространстве. Внизу, под зданием, планировалось разбить небольшую зеленую зону для прогулок, с которой непосредственно в ночной клуб вели бы специальные лифты для людей и их автомобилей (автостоянка также находится над землёй, в нижней части двух боковых ярусов-ответвлений здания). На крыше отеля также планировалось разбить небольшой сад [13].

и) *Структуры-паразиты* как полноценные жилые квартиры, прикрепленные к основному объему здания, все чаще появляются в архитектурных концепциях. Один из таких проектов принадлежит тайским специалистам, которые предлагают создавать «*Квартиры-ульи*» (архитекторы Montakan Manosong, Achawin Laohavichairat и Peerapon Karunwiwat), Таиланд (Бангкок). Авторы проекта считают, что сегодня существует множество зданий, которые производят огромное количество сточных вод и разнообразных твердых отходов, которые могут быть переработаны и составить энергетическую основу для функционирования таких квартир-ульев [14].

к) *Объекты-сапрофиты.* Это постройки, которые внедряется в уже переставшую функционировать застройку, например, в бывшие фабрики, склады, промышленные объекты. При этом преследуется цель оживить деградирующую территорию, внедрить новые функции. Так, с целью расширения музыкальной школы Эми Фрирсон в Лувье в бывшем монастыре Нотр-Дам-де-Консоласьон, Париж (Франция) построен концертный зал на вершине бывшего монастыря семнадцатого века на севере Франции (фирма «Opus 5», 2012 г.).

Объект был задуман на очень узком участке, что побудило архитекторов заполнить все свободные пространства, подняв их поверх существующих стен. Стеклянная пристройка охватывает южное крыло комплекса, создавая оркестровый зал с волнообразным зеркальным потолком на верхнем этаже и музыкальную библиотеку на первом этаже внизу. Новое входное фойе расположено за монастырями на первом этаже, которые были заполнены остеклением, чтобы предоставить посетителям вид на реку [15].

Другая концепция проекта «*Pont9*» (бюро Malka Architecture, 2014 г.), так называемого, паразитарного архитектурного сооружения использует функциональные возможности моста через Сену в Париже путем его расширения за счет возведения на нем комплекса интегрированных объемов, который, по замыслу авторов, будет расположен на 12 метров выше плоскости основного сооружения. Проект «Pont9» представляет собой сочетание модульных объемов, которые предполагается использовать под офисы, дома, общественные пространства, рестораны и галереи. Модульная конструкция будет закреплена на системе пилонов, связанных между собой мостиками перемычками [16].

л) *Пристройки-трансплантыы* в концепции «растущий дом», происходит использование надстроек-«паразитов» на крышах зданий с целью увеличения их этажности. Так, на крыше вышедшего из употребления чугунолитейного завода в Бергене (Норвегия) был пристроен ряд строений, чтобы создать совмещенный жилой и деловой центр (бюро Link Architects). Комплекс состоит из трех самостоятельных блоков, в которых разместились 45 новых домов, кафе и магазинов, Авторы решили сохранить старое заводское пространство под ним, чтобы создать связь между современным городом и его промышленным прошлым [17].

В другом проекте *пристройки-трансплантa*, расположенного на вершине викторианского склада в центре Лондона, использована стальная конструкция (фирма Tonkin Liu). Внутри помещения раздвижные двери используются для создания пространственных перегородок между шестью спальнями и кухней/гостиной открытой планировки, которые занимают компактное пространство общей площадью 2800 квадратных футов. Окна от стены до стены позволяют его обитателям максимально использовать естественный дневной свет, обеспечивая при этом удивительный вид на городской пейзаж лондонского Сити. Висячие растения снаружи квартиры создают естественную тень, образовывая комфортную внутреннюю и внешнюю обстановку [18].

м) *Паразитарные объекты на фасаде.* Проект «*Plug-in City 75*» предполагает установку паразитарных кубов на фасаде здания, расширяющих плиты пола существующих квартир по горизонтали (парижское бюро Stephane Malka Architecture, 2018 г.). В проекте из модульных домов на внешних стенах старых зданий используется пустующие пространства между домами в 16-м округе Парижа, что может утеплить основные стены здания и сделать их энергетически эффективными. По мнению архитекторов, помимо увеличения пространства внутри домов, пристройки также будут снижать потребление энергии здания. Каждая модульная коробка изготавливается за пределами площадки из древесины, а затем устанавливается в объем здания и может быть адаптирована к конкретным потребностям каждого жильца [19].

Аналогичный проект «*Homed*» (бюро Framlab) в Нью-Йорке по масштабу больше и подразумевает пристройку неограниченного количества шестиугольных капсул в виде пчелиных сот, распечатанных на 3D принтерах. Поскольку земельные участки в Нью-Йорке ограничены и очень дорогостоящи, капсулы можно будет выстроить вертикально, друг на друге, при помощи механизмов, повторяющих дизайн строительных лесов [20].

н) *Паразитарные мегаструктуры*. Проект «*Flux Haus*» в Гонконге (авторы Каммиль Каррансой, Джитендра Фаркаде и Винай Кхаре, 2019 г.) разработан как паразитарная жилищная структура, которая будет подвешена к пространственной сети и охватит пять башен с одноместными капсулами комплекса Green Harbour Tower. Эта структура представляет собой сетку из рельсов, построенных роботами, которые со временем будут автономно расширять несущую раму. Все кубические жилые капсулы, имеющие площадь чуть более шести квадратных метров, оснащены искусственным интеллектом и включают в себя технологию роя роботов, которые быстро адаптируются и могут мгновенно создать желаемую планировку комнаты и мебель, позволяя мгновенно трансформировать кубы из гостиной или столовой в спальню. Жители будут получать доступ к строению через существующие входы в здание, прежде чем их доставят к доступному стыковочному месту.

В рамках предложения существующее здание будет приспособлено для размещения всех помещений общего пользования, включая ванные комнаты и кухни. Затем капсулы, когда это необходимо, будут запрограммированы на доставку пассажиров в эти помещения. Каждая капсула оснащена искусственной вентиляцией и имитатором солнечного света, спроектированным таким образом, что в капсулах отсутствуют окна. Вместо этого стены состоят из экранов, которые можно изменить, чтобы сформировать любой желаемый фон. В совокупности эти конструкции позволяют обитателям с комфортом занимать любое пространство в комплексе и, в свою очередь, максимально увеличивать количество жителей, которые могут там жить [21].

2.2. Проблемы пассивной безопасности: прецеденты «интровертной» и враждебной архитектуры. В последнее время становится актуальным дизайн *пассивной безопасности*. Известны примеры отрицательного психологического влияния городского пространства, которые образуются при отсутствии учета психологических факторов. Причина возникновения животного страха – отсутствие контроля над ситуацией и наличие неизвестной угрозы приводят к крайним последствиям деградации личности. Обеспечение безопасности в первую очередь связано с защитой от физического воздействия на человека. Только здоровая человеческая психика способствует принятию правильных решений в экстремальных ситуациях. Человеческий организм представляет собой целостность, в которой физические и психологические явления неразрывно связаны. Физическое утомление ведёт к утомлению психики и точно так же наоборот. Психические повреждения неизменно ведут к повреждениям физическим. Ключ к пониманию проблемы безопасности – адаптация, то есть, способность организма перестроиться, приспособиться к изменившимся условиям окружающей среды [22].

В общей биологии все индивиды имеют в той или иной мере пассивную физическую адаптацию. Существенное значение имеет приспосабливаемость человека к физическим условиям своего окружения. Психологическая проблема возникновения страха в связи с отсутствием контроля над ситуацией и наличием неизвестной угрозы приводит к крайним последствиям деградации личности. В связи с этим в практике проектирования возникают неординарные концепты объектов-интровертов, полностью закрытых от внешнего мира домов-бункеров, больше похожих на закрытую добровольную крепость. В связи с психологическими проблемами, происходящими в обществе, неординарные концепты объектов-интровертов проявляются в архитектурной практике в различных обстоятельствах.

а) Примером может служить *Дом-крепость «Casa introvert is dream house»* в Средиземноморском стиле, который создан по форме и конструкции аналогично древнеримским домам. Объект-интроверт при отсутствии окон по наружному фасаду имеет замкнутый дворик, в котором благодаря

наклонным крышам внутрь дома возникает возможность сбора воды для различного использования [23].

б) Полностью закрытым от внешнего мира создан *Дом-убежище «RG House»* в городе Badajoz (Испания) строительной компанией «Estudio Arquitectura Hago». Объект-интроверт скомпонован из отдельных объемов, не имеющих ни одного окна по внешнему фасаду и образующих внутренний двор. Помимо этого, дом имеет монолитный бетонный забор, который дополнительно защищает обитателей дома от внешних посягательств [24].

в) Другой дом *Особняк-забор* «*Private Residence*» (архитектурное бюро Archiplan Studio) в Италии расположен вдоль сплошной монолитной стены без оконных и дверных проемов. Внутренний фасад дома полностью остеклен, что обеспечивает солнечным светом огромный особняк. Уникальность этого дома заключается в том, что снаружи невозможно разглядеть, что происходит внутри, но при этом обитатели дома могут видеть все, что происходит на улице, даже не открывая окон и дверей [24].

г) Трансформирующийся *Дом-бункер* (фирма «KWK Promes», Польша) позволяет изолироваться от окружающего мира и во избежание ограбления при отсутствии хозяина превращается в монолитный куб. Оригинальный дом с массивными ставнями может иметь в зависимости от ситуации различную форму объема, которая меняется автоматически при нажатии кнопки. Со стороны двора открытая часть дома надежно скрыта высоким забором [24].

д) Полностью закрытый корпус *«Засекреченной лаборатории для исследования животных»* при университете Гронингена (голландская архитектурная фирма «UN Студио») 2005 г. (Нидерланды) возник в связи с необходимостью проведения конфиденциальных исследований, требующих защиты от солнечных лучей. Поэтому фасад здания монолитно закрыт панелями, а освещение лестниц и коридоров осуществляется конусообразными световыми шахтами [24].

е) Проект «*Дом-занавес*» в Токио (архитектор Шигеру Бан, 1993 г.), в котором совмещен традиционный японский стиль с западными мотивами. Об этом свидетельствует наличие широких веранд при общей компактности трехэтажного сооружения. Первый этаж является полностью открытым и предназначен для использования в качестве автостоянки. Оба этажа имеют минимум перегородок и стеклянные двери. Для защиты от зимнего холода в доме есть система отопления. Занавес, протянувшийся по периметру сооружения, создает эффект штор, закрывая находящихся в здании людей от посторонних глаз и при этом не перекрывая доступ свежего воздуха [25].

ж) Представляет интерес концептуальный проект *интровертного объекта* на скале над морем «*Casa Brutale*». Планируется, что дом будет построен заглубленным в скалу с видом на море, а его объем не будет выступать над уровнем земли. Крыша резиденции представляет собой стеклянный бассейн и служит естественным освещением для всего дома. Вход в дом осуществляется по широкой деревянной лестнице в пятьдесят ступе-

ней вниз. Из всех комнат открывается вид на Эгейское море. Конструкции дома сделаны из самых простых материалов – бетон, стекло и дерево. В доме три этажа: мезонин с жилыми помещениями, гостевой полуэтаж со спальней и нижний этаж с зоной отдыха, ванной и кухней [26].

з) Психология восприятия объекта учитывается для создания дизайна с учетом пассивной безопасности, что в последнее время становится особенно актуальным. Представляют интерес объекты, созданные с учетом психологии их восприятия с целью защиты от посещения, которые выглядят *зрительно разрушающимися и «опасными» для визита*. Так, при восприятии объекта, состоящего из нескольких консолей с бетонными фасадами (бюро BYGGFENOMEN в Стокгольме, Швеция, 2015 г.) кажется, что здание постепенно срастается в единую конструкцию, но в любой момент может рассыпаться. Таким приемом архитекторы добились эффекта неустойчивой опасности, для создания эффекта предупреждения в случае его посещения [27].

и) Офисное *здание-интроверт* «*Cube Berlin*» с зеркальным фасадом-аттракционом (датское архитектурное бюро 3XN, 2020 г.) находится в самом благоустроенном районе Берлина (рядом с центральным вокзалом, на берегу реки Шпрее). Благодаря зеркальному фасаду здание кажется суперсовременным и выделяется на фоне соседних обычных построек. Отражая окружающую среду, оно фактически растворяется в ней и скрывает офисных «обитателей» от внимания шумного мегаполиса [28].

к) Интровертное мегаздание *«Зеркальная линия»* предполагается возвести на берегу Красного моря в Саудовской Аравии – оно имеет ширину 200 метров, высоту 500 и длину 170 тысяч метров. Зеркальный слой внешнего ограждения объекта имеет отражающий эффект, что снимет проблемы кондиционирования по сравнению с типичными небоскребами в такой местности. Внутри мегаздания-интроверта все перевозится по железной дороге сверхбыстрыми поездами со скоростью в 512 километров в час. Линии железных дорог проходят под землей – фактически речь идет и о крупнейшем метро в истории. Энергосистемы на возобновляемой солнечной и ветровой энергии позволят сэкономить затраты на энергообеспечение. Использование автоматизированных инженерных систем и искусственного интеллекта позволят осуществить автономное существование мегаздания [29].

Заключение. В настоящей статье сценарии решения проблемы и прецедентов ее проявления при использовании бионических приемов корректировки нестабильности физической окружающей среды жизнедеятельности рассмотрены в следующих направленностях.

а) Компенсационные приемы для решения проблем мегаполиса («паразитарная» архитектура) выявлены на основе исследования теоретических и практических проектно-экспериментальных разработок в этой области. В связи с этим рассмотрены прецеденты «паразитарной» архитектуры различного назначения и величины: Арт-объекты; Сезонные постройки; Объекты-симбионты; Интегрированные пристройки;

Малогабаритные жилые капсулы; Капсулы для организации приюта и временных гостиниц; Постройки между основными зданиями; Подвесные постройки–паразиты; Структуры-паразиты как полноценные жилые квартиры; Объекты-сапрофиты; Пристройки-трансплантыв концепции «растущий дом»; Паразитарные объекты на фасаде; Паразитарные мегаструктуры.

б) Проблемы пассивной безопасности (прецеденты «интровертной» и враждебной архитектуры) рассмотрены в связи с психологической проблемой существования в условиях социальной напряженности, что стимулирует возникновение новых подходов к организации среды жизнедеятельности. В связи с этим приведены неординарные концепты объектов-интровертов из практики архитектурного проектирования: Дом-крепость; Дом-убежище; Особняк-забор; Дом-бункер; Засекреченная лаборатория для исследования животных; Дом-занавес; Интровертный объект на скале над морем; Зрительно разрушающиеся объекты и «опасные» для визита; Офисное здание интроверт; Мегаздание «Зеркальная линия».

Существование в условиях социальной напряженности стимулирует возникновение новых подходов к организации среды жизнедеятельности. Перечисленные актуальные направления изысканий, использующих бионические подходы в качестве инструмента, доступного для применения в исследовательской практике, дают большие преимущества и возможности при формировании пространства обитания уникального типа.

Полученные результаты позволяют наметить в теории архитектуры некоторые новые бионические подходы к разработке перспективных архитектурных концепций, использующих принципиально новые современные научные парадигмы и методы, применяемые для корректировки нестабильности физической окружающей среды, а также дают возможность выявить инновационные направления дальнейших исследований.

Литература

1. Ахтямов, И.И., Ахтямова, Р.Х., Габдрфхманова, И.И. Адаптивная архитектура как реакция города на изменяющиеся запросы общества // Известия КГАСУ. – 2017. – №3(41). – С. 32-40.
2. Максимова, Д.А., Иконописцева, О.Г. «Паразитарная» архитектура как уникальный визуальный посредник между обществом и городской системой // Шаг в науку / Технические науки. – 2019. – №3. – С. 33-36.
3. Инсталляция KAPKAR/HWR-L45. 2009. URL: https://frankhavermans.space/project/strijip-s/
4. Горшкова, Д. Инсталляции-паразиты на Вандомской площади в Париже. 2015. URL: https://www.buro247.ru/culture/arts/installyatcii-parazity-na-vandomskoy-ploshcadi-v-p.html
5. Как согреть бездомного – укрытие paraSITE. 2014. URL: https://facepla.net/the-news/4373-kak-sogret-bezdomnogo-ukrytie-parasite.html
6. «Птичье гнездо»: насесты на солнечных батареях на школьных крышах. URL: https://www.greenprophet.com/2013/07/birds-nest-solar-powered-studio-perches-on-school-roofs/
7. Cilento, K. Parasite Prefab / Lara Calder Architects. 2009. URL: https://www.archdaily.com/35859/parasite-prefab-lara-calder-architects

8. Myers, L. FMSG envisions 'docking-house' mobile units for future living. URL: https://www.designboom.com/design/future-mobility-solution-group-docking-house-seoul-02-23- 2019/

9. Mairs, J. James Furzer to crowdfund parasitic sleeping pods for London's homeless // Dezeen. 2015. URL: https://www.dezeen.com/2015/08/19/james-furzer-crowdfundparasiticsleeping-pods-london-homeless-indiegogo/

10. Официальный сайт мастерской «Za Bor Architects». URL: https://zabor.net/ portfolio/ofis-parazit/

11. Angelopoulou, S. L. Yoshinori-sakano architects divides tiny Tokyo house into seven split levels clad in plywood. URL: https://www.designboom.com/architecture/yoshinori-sakano- architects-tiny-tokyo-house-split-levels-plywood-11-30-2020/

12. Официальный сайт Urbanplunger s.r.o. URL: http://urbanplunger. com/pendant-hotel/

13. Suspended Night Club in Hong Kong / Urbanplunger. 2012. URL: https://www.evolo.us/suspended-night-club-in-hong-kong-urbanplunger

14. Здания-паразиты как экологичный тренд: квартира-улей в Бангкоке. URL: https://www.ecobyt.ru/article/040712/312/

15. Amy Frearson Music School Louviers extension by Opus 5 // Dezeen. 2012. URL: https://www.dezeen.com/2012/07/16/music-school-louviers-extension-by-opus-5/

16. Архитектурный паразит, 2014. URL: https://archiprofi.ru/journal/detail/arkhitekturnyy- parazit/

17. Чугунолитейный завод в Бергене (Норвегия). URL: https://www.loveproperty.com/gallerylist/68684/parasite-homes-springing-up-all-over- over-crowded-cities

18. Растущий дом в Лондоне (Великобритания). URL :https://www.loveproperty.com/gallerylist/68684/parasite-homes-springing-up-all-over- over-crowded-cities

19. Линдси, К. Паразитические пристройки к многоквартирному дому в Париже могут снизить потребление энергии. URL: https://www.dezeen.com/2018/03/14/video-malka-architecture-plug-in-city-75-parasitic-extensions-paris-reduce-energy-consumption-movie/

20. Идея: Поселить бездомных Нью-Йорка в стильных капсулах на стенах зданий. URL: https://bigpicture.ru/kak-pereselit-bezdomnyx-nyu-jorka-s-ulic-na-steny/

21. Крук, Л. Паразитические стручки в качестве альтернативы домам-клеткам в Гонконге. 2019. URL: https://www.dezeen.com/2019/08/19/iaac-flux-haus-conceptual-architecture-china-housing/

22. Раков, А.П. Проблемы психологической безопасности и дисбаланса композиционных и технических факторов архитектурного процесса // AMIT 1 (18). 2012

23. Дом-интроверт в Средиземноморском стиле. URL: https://vk.com/wall-129055121_7706

24. Дома-интроверты. URL: https://novate.ru/blogs/060420/53990/

25. «Дом-занавес» в Токио. URL: http://viewout.ru/news/dom_zanaves_v_tokio/2017-01-30-1904

26. An unusual house by the sea / Open Platform of Architecture. URL: https://dzen.ru/a/W3mtmp3OawCqiOrl

27. Архитектурный интроверт, 2015. URL: https://archiprofi.ru/journal/detail/arkhitekturnyy-introvert/

28. Здание-интроверт с зеркальным фасадом-атракционом. 2020. URL: https://gge.ru/press-center/news/zdanie-introvert-s-zerkalnym-fasadom-attraktsionom/

29. Сидорова, Д. Мегаздание «Зеркальная линия». 2022. URL: https://rb.ru/story/mirror-line/

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ БИОНИКА

УДК 519.6

БИОНИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К СИНТЕЗУ АЛГОРИТМОВ ОПТИМИЗАЦИИ

А.П. Карпенко,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия,
e-mail: apkarpenko@mail.ru

Аннотация. *Предлагаем авторскую классификацию основных сущностей и, прежде всего, эволюционных операторов популяционных алгоритмов глобальной оптимизации, инспирированных живой природой (бионических алгоритмов). Предлагаем следующие классы поисковых операторов бионических алгоритмов: аттракторные; когнитивные; социальные; исторические; инерционные; операторы случайного поиска; комбинированные операторы (когнитивно-социальные, историко-социальные и другие). Представляем итерационные схемы этих классов алгоритмов, а также соответствующие примеры бионических алгоритмов.*
Ключевые слова: *глобальная оптимизация; популяционный алгоритм; алгоритмы оптимизации, вдохновленные живой природой.*

BIONIC APPROACHES TO THE SYNTHESIS OF OPTIMIZATION ALGORITHMS

A.P. Karpenko,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract. *We offer the author's classification of the main entities and, above all, evolutionary operators of population-based global optimization algorithms inspired by living nature (bionic algorithms). The following classes of operators of bionic algorithms are proposed in the work: attractor; cognitive; social; historical; inertial; random search operators; combined operators (cognitive-social, historical-social and others). Iterative schemes of these classes of algorithms are presented, as well as examples of bionic algorithms that use them.*
Keywords: *global optimization, population algorithm, wildlife-inspired optimization algorithms.*

Введение. Рассматриваем алгоритмы глобальной (непрерывной) оптимизации) которые относятся к классу прямых (не использующих производные целевой функции) стохастических поисковых алгоритмов. Эти алгоритмы в разных публикациях называют поведенческими, интеллектуальными, метаэвристическими, вдохновленными (инспирированными) природой, роевыми, многоагентными, *популяционными* и т.д. [1].

Популяционные алгоритмы (population based algorithms) предполагают одновременную обработку нескольких вариантов решения задачи оптимизации и представляют собой альтернативу классическим *траекторным* поисковым алгоритмам, в которых в области поиска эволюционирует только один кандидат в решение этой задачи.

В настоящее время известно более 100 канонических популяционных алгоритмов, инспирированных живой и неживой природой, а также человеческим обществом. Для каждого из этих алгоритмов предложено большое число модификаций (иногда измеряемое десятками). Предметом рассмотрения являются популяционные алгоритмы, вдохновленные живой природой (*бионические алгоритмы*, *Б-алгоритмы*).

Выделяем следующие классы Б-алгоритмов: бактериальные алгоритмы; алгоритмы паукообразных; алгоритмы насекомых (муравьиные, пчелиные, тараканьи, светлячковые); алгоритмы млекопитающих (летучих мышей, кошек, обезьян, волков); птичьи алгоритмы; алгоритмы земноводных; алгоритмы рыб; алгоритмы растений; прочие Б-алгоритмы.

Б-алгоритмы находят широкое применение при решении задач глобальной оптимизации, возникающих в технике, а также, например, в машинном обучения, распознавания образов и др. [2]. Важно, что эти алгоритмы хорошо масштабируются – скорость, с которой растет объем вычислений при увеличении размерности задачи обычно меньше, чем у классических методов оптимизации. В результате, если задача не может быть решена классическими методами из-за неприемлемо высоких вычислительных затрат, Б-алгоритмы часто позволяют найти хотя бы близкие к оптимальным (квазиоптимальные) решения.

Часто среди Б-алгоритмов, выделяют классы алгоритмов, основанных на роевом интеллекте (Swarm Intelligence based, SI-based).

Все Б-алгоритмы относятся к классу *эвристических* алгоритмов (heuristic algorithms), то есть алгоритмов, для которых сходимость к глобальному решению не доказана, но экспериментально установлено, что в большинстве случаев они дают достаточно «хорошее» решение.

В качестве общего названия членов популяции Б-алгоритма используем термин особь (individual). В исходных публикациях особи различных Б-алгоритмов называют индивидами, агентами, частицами, муравьями, пчелами и т.д.

Обзоры Б-алгоритмов различного уровня широты, а также различные аспекты анализа и синтеза Б-алгоритмов рассмотрены, например, в публикациях [3 - 14].

1. Постановка задачи и общая структура Б-алгоритма. Рассматриваем задачу глобальной условной оптимизации вида

$$\min_{X \in D} \varphi(X) = \varphi(X^*) = \varphi^*,$$

где $X \in \Re^{|X|}$ – вектор варьируемых параметров; $D \subset \Re^{|X|}$ – область допустимых значений X; $\varphi(X)$ - фитнесс-функция; X^*, φ^* – искомые оптимальный вектор X и значение фитнесс-функции соответственно.

Структура (однопопуляционного) Б-алгоритма оптимизации имеет следующий вид.

1) Инициализация популяции. Полагаем $t = 0$ (номер итерации), задаем начальные положения особей популяции $S = \{s_i,\ i \in [1:|S|]\}$, а также значения свободных параметров Б-алгоритма. Здесь s_i - i-ая особь популяции S мощностью $|S|$.

2) Применяем ко всем особям популяции S эволюционные операторы Б-алгоритма – формируем популяцию S'. На основе популяций S, S' формируем популяцию $S(t+1)$.

3) Продолжаем итерации, полагая $t = t + 1$, либо завершаем поиск, принимая в качестве решения задачи лучшее достигнутое положение особей популяции.

2. Основные сущности и операторы Б-алгоритмов. Исключая операторы, к основным относим следующие сущности Б-алгоритмов: параметры; особь, популяция и субпопуляция; пространства, графы и метрики соседства особей и совокупностей особей; окрестности особей; регионы поиска и следы особей; объединения особей и множества соседей; характеристики сущностей; аттракторы и каналы связей между особями [1].

Обычно, в Б-алгоритмах каждый из операторов используется в рамках соответствующей процедуры, которая, в общем случае, реализует следующие функции: принятие решения об использовании или не использовании этого оператора; формирование наборов «входных» особей; применение к этим особям данного оператора; нумерация или перенумерация особей выходного набора (если его мощность превышает единицу); приложение результатов применения оператора.

Чаще всего в Б-алгоритмах эволюционные операторы используются на каждой их итерации. В общей постановке, правила принятия решения об использовании или не использовании оператора могут быть детерминированными или стохастическими (хаотическими), стационарными или динамическими (программными, адаптивными, программно-адаптивными).

Оператор может применяться к каждой из особей популяции (субпопуляции), но могут использоваться, как канонические, так и специфические для данного оператора методы формирования набора «входных» особей.

Применение к входным особям рассматриваемого оператора может осуществляться безусловно и условно по детерминированным и стохастическим (хаотическим), стационарным или динамическим (программным, адаптивным, программно-адаптивным) правилам.

В общем случае, результаты применения оператора могут использоваться безусловно или условно по тем или иным детерминированным или

стохастическим (хаотическим), стационарным или динамическим (программным, адаптивным, программно-адаптивным) правилам.

Различаем операторы Б-алгоритмов, реализующие следующие основные функции: инициализация популяции и завершение итерационного процесса; селекция, мутация, скрещивание особей; локальный поиск; глобальный поиск; управление популяцией и субпопуляциями; удовлетворение ограничений; коммуникации особей и их объединений.

Ограничиваемся рассмотрением бионических операторов глобального поиска, которые составляют суть Б-алгоритмов.

Вводим следующие обозначения [1]:

$X_i, \Delta X_i$ – $|X|$-мерные векторы, определяющие положение особи s_i и ее «скорость» соответственно;

$A(s_i, r_X) = \{X \mid \mu(X_i, X) \le r_X\}$ – *окрестность* особи s_i радиуса r_X в пространстве $\Re^{|X|}$;

$\mu(\cdot,\cdot)$ – некоторая метрика этого пространства;

$Tr_i = \{(X_i(\tau), \varphi(X_i(\tau)),\ \tau \in [t_b : t_e]\}$ – обыкновенный *след* особи s_i в пространстве поиска на итерациях $t_b,\ldots,t_e$.

3. Бионические операторы глобального поиска. Различаем следующие основные классы Б-операторов глобального поиска: аттракторные; когнитивные; социальные; исторические; инерционные; операторы случайного поиска; комбинированные операторы (когнитивно-социальные, историко-социальные и другие).

Аттракторые операторы. При использовании аттракторного оператора итерационная формула особи s_i содержит составляющую вида

$$X_i' = X_i \pm \lambda(t) U_{|X|}(a^-; a^+)\,(O - X_i).$$

Здесь $O \in \Re_{|X|}$ – текущее положение рассматриваемого аттрактора (антиаттрактора); $\lambda(t)$ – «шаг» перемещения; $U_{|X|}(a^-; \alpha^+)$ – $|X|$-мерный вектор случайных чисел, равномерно распределенных в интервале $[a^-; a^+]$, где a^-, a^+ – заданные константы.

Пример 1. Обезьяний алгоритм (Monkey algorithm, MA) [15]. Алгоритм MA моделирует поведение обезьян в процессе их лазания по горам с целью поиска пищи. Полагаем, что обезьяны исходят из того, что чем выше гора, тем больше пищи на ее вершине. Местность, которую обследуют обезьяны, представляет собой ландшафт фитнесс-функции рассматриваемой задачи оптимизации, так что решению соответствуют самая высокая гора (в задаче глобальной максимизации).

1) Из своего текущего положения обезьяна движется вверх до тех пор, пока не достигнет вершины горы.

2) Затем обезьяна делает серию *локальных прыжков* (локальный поиск) в случайном направлении в надежде найти более высокую гору и движение вверх повторяется.

3) После выполнения некоторого числа подъемов и локальных прыжков обезьяна полагает, что в достаточной степени исследовала ландшафт в окрестности своего начального положения и для того, чтобы обследовать новую область пространства поиска, выполняет длинный *глобальный прыжок* (глобальный поиск).

Глобальные прыжки (somersault process) реализует итерационная формула вида

$$X_i' = X_i + U_{|X|}(a^-; a^+)(O^c - X_i),$$

где O^c – положение текущего центра «тяжести» особей популяции.

Когнитивные операторы. Итерационная формула особи в этом случае содержит составляющую вида

$$X_i' = X_i \pm \lambda(t) U_{|X|}(a^-; a^+)\,(X_i^{hbest} - X_i),$$

где X_i^{hbest} – исторически лучшее положение особи s_i (ее лучшее положение в полном следе $Tr_i(0; t)$).

Пример 2. Алгоритм оптимизации колонией бактерий (Bacterial Colony Optimization Algorithm, BCO) [15]. Подвижные бактерии такие, как *кишечная палочка* или *сальмонелла* (лат. *Salmonella*), продвигают себя при помощи вращающихся жгутиков. Чтобы двигаться вперед, все жгутики вращаются в одном направлении. При этом бактерия совершает движение, которое называют *плавание* (swims). При вращении жгутиков в разные стороны, бактерия разворачивается – совершает движение, называемое *кувырком* (tumble).

В целом, поведение бактерий обусловлено механизмом, который носит название *бактериального хемотаксиса* (bacterial chemotaxis) и представляет собой двигательную реакцию микроорганизмов на химический раздражитель. Этот механизм позволяет бактерии двигаться по направлениям к аттрактантам (чаще всего, питательным веществам) и от *репеллентов* (потенциально вредным для бактерии веществам). Если выбранное бактерией направление движения соответствует увеличению концентрации аттрактанта (снижению концентрации репеллента), то время до следующего кувырка увеличивается. В силу малого размера бактерии, сильное влияние на ее перемещения оказывает броуновское движение молекул жидкости, в которой осуществляется это перемещение. В результате бактерия только в среднем движется в направлениях к полезным веществам и от вредных веществ.

Алгоритм BCO использует комбинированный когнитивно-социальный оператор плавания (swimming)

$$X_i' = X_i + \lambda(t)\Big(U_1(0;1)(X^{gbest} - X_i) + (1 - U_1(0;1))(X_i^{hbest} - X_i)\Big),$$

в котором слагаемое $\left(U_1(0;1)(X^{gbest} - X_i)\right)$ реализует социальный, а слагаемое $\left((1 - U_1(0;1))(X_i^{hbest} - X_i)\right)$ – когнитивный поиск, где X^{gbest} – текущее положение глобально лучшей особи популяции.

Социальные операторы. Социальный поиск обеспечивает составляющая итерационной формулы вида

$$X_i' = X_i \pm \lambda(t) U_{|X|}(a^-; a^+)\,(X_i^{another} - X_i),$$

где $s_i^{another}$ – некоторая особь популяции, отличная от s_i .

Пример 3. Алгоритм хемотаксиса колонии бактерий (Bacterial Colony Chemotaxis, BCC) [15]. Алгоритм BCC использует две конкурирующие модели поведения особей: *индивидуальное поведение* (optimize by a single bacterium), не учитывающее социальные эффекты; *социальное поведение* (optimize by the bacterial colony).

Социальное поведение определяет итерационная формула

$$\widetilde{X}_i' = X_i + U_1(0;2)\,(X_i^{NBbest} - X_i),$$

где s_i^{NBbest} – лучшая соседняя особь в $\Re_X$ окрестности $A_i(X_i, r)$ особи s_i.

Исторические операторы. Исторический оператор использует составляющую итерационной формулы вида

$$X_i' = X_i \pm \lambda(t) U_{|X|}(a^-; a^+) \otimes (X^{hgbest} - X_i),$$

где X^{hgbest} – глобально лучшее решение, найденное популяцией за всю предысторию поиска (исторически лучшее решение).

Пример 4. Алгоритм летучих мышей (Bat Algorithm, BaA) [15]. Большинство летучих мышей обладают способностью к эхолокации, которая используется ими для обнаружения добычи и препятствий, а также для обеспечения возможности разместиться в темноте на насесте. Алгоритм BaB предполагает следующую модель поведения летучих мышей:

– с помощью эхолокации все мыши могут измерять расстояние до добычи и препятствий, а также различать их;

– мыши движутся случайным образом;

– для поиска добычи мышь s_i генерирует сигналы частотой ϖ_i и громкостью a_i;

– в процессе поиска мышь s_i может менять частоту сигналов ϖ_i в диапазоне $[\varpi^{\min}; \varpi^{\max}]$, частоту повторения излучаемых импульсов (rate of pulse) $r \in [0;1]$, а также громкость сигналов a_i в пределах $[0;1]$.

В алгоритме BaB исторический оператор перемещения особи в пространстве поиска имеет вид

$$X_i' = X_i + U_1(a^-; a^+)\left(X^{hgbest} - X_i\right).$$

Инерционные операторы. Итерационная формула особи содержит в этом случае составляющую вида

$$X_i' = X_i + \lambda(t)\,\Delta X_i\,(t-1),$$

где $\Delta X_i\,(t-1)$ – вектор перемещения особи на предыдущей итерации.

Пример 5. Оптимизационный алгоритм распространения тараканов (Roach Infestation Optimization, RIO) [15]. Алгоритм RIO моделирует три следующих аспекта поведения тараканов.

Find Darkness. Тараканы ищут самое «темное» место в пространстве поиска $\Re_X$. Полагаем, что степень «темноты» в точке $X \in \Re_X$ прямо пропорциональна значению фитнес-функции $\varphi(X)$ в этой точке.

Find Friends. Тараканы вероятностно ищут соседних тараканов (тараканов своей *группы*). В качестве меры близости используется евклидова метрика пространства $\Re_X$.

Find Food. Тараканы периодически становятся голодными и в поисках пищи покидают достигнутые темные места и свои группы.

Алгоритм основан на моделировании коллективного и индивидуального поведения тараканов и в нескольких аспектах близок широко известному алгоритму роя частиц PSO. Алгоритм RIO использует когнитивно-инерционный-социальный оператор вида

$$X_i' = X_i + \Delta X_i$$

$$\Delta X_i = c_0\,\Delta X_i\,(t-1) + U_{|X|}(0;c_{\max}) \otimes \left(X_i^{hbest} - X_i\right) + U_{|X|}(0;c_{\max}) \otimes \left(X_i^{NBhbest} - X_i\right),$$

где $c_0, c_{\max}$ – заданные константы.

Операторы случайного поиска. Случайный поиск в Б-алгоритмах реализуют с помощью составляющей итерационной формулы вида

$$X_i' = X_i \pm \lambda(t) U_{|X|}(a^-;a^+)\ .$$

Пример 6. Алгоритм оптимизации роем тараканов (Cockroach Swarm Optimization, CSO) [15]. Алгоритм вдохновлен поведением роя тараканов в процессе поиска пищи и использует модели, основанные на имитации их коллективного поведения, индивидуального поведения и поведения типа «выживает сильнейший».

Модель индивидуального поведения (Dispersing) определяет итерационная формула

$$X_i' = \begin{cases} X_i + U_{|X|}(-a;a), & \varphi(X_i') \le \varphi(X_i), \\ X_i, & \text{иначе}, \end{cases}$$

где a – заданная константа.

Комбинированные операторы. Итерационные формулы комбинированных операторов содержат две и более составляющих указанных выше классов.

Пример 7. Оптимизационный алгоритм социальных пауков (Social spider optimization algorithm, SSOA). Алгоритм SSOA основан на моделировании некоторых аспектов поведения социальных пауков-самцов (male spiders) и пауков-самок (female spiders), которые имеют определенные различия в своем поведении [15].

Дважды социальный алгоритм эволюции особей-самок $\{s_i^f\}$ определяет итерационная формула

$$X_i'^f = \begin{cases} {}^{\xi_f}\left| X_i^f + u_1 v(w_{i_j}^{NBbest})(X_{i_j}^{NBbest} - X_i^f) + u_2 v(w^{gbest})(X^{gbest} - X_i^f) + u_3(u_4 - \frac{1}{2}), \right. \\ {}^{1-\xi_f}\left| X_i^f - u_1 v(w_{i_j}^{NBbest})(X_{i_j}^{NBbest} - X_i^f) - u_2 v(w^{gbest})(X^{gbest} - X_i^f) + u_3(u_4 - \frac{1}{2}). \right. \end{cases}$$

Здесь $s_{i_j}^{NBbest}$ – соседняя особь-самец, имеющая лучшее значение фитнесс-функции; $u_l = U_1(0;1), l \in [1:4]$; $v(w_{i_j}^{NBbest})$ – *сила влияния* (vibrations perceived) особи $s_{i_j}^{NBbest}$ на данную особь s_i^f; $v(w^{gbest})$ – аналогичная *сила влияния* особи s^{gbest} на особь s_i^f; $w(s_i)$ – текущий «вес» (weights) особи s_i (ее нормированное текущее значение фитнесс-функции).

Социальный / аттракторный оператор эволюции особей-самцов $\{s_i^m\}$ имеет следующий вид:

$$X_i'^m = \begin{cases} X_i^m + u_1 v(w_{i_j}^{f\ NB})(X_{i_j}^{f\ NB} - X_i^m) + u_2(u_3 - \frac{1}{2}), \text{ если } s_i^m = s^{m\ best}, \\ X_i^m + u_4(O_C^m - X_i^m), \text{ иначе.} \end{cases}$$

Здесь приняты обозначения: $s_{i_j}^{f\ NB}$ – ближайшая к s_i^m особь-самка; O_C^m – координаты центра тяжести популяции особей-самцов S^m (притягивающего аттрактор); $s^{m\ best}$ – лучшая (доминантная) особь-самец; $u_l = U_1(0;1), l \in [1:3]$.

Заключение.

В силу ограниченности объема статьи, мы привели лишь небольшое число примеров Б-алгоритмов. Другие алгоритмы этого класса представлены, например, в [15].

Бионические подходы широко используются для синтеза не только операторов глобального поиска, но и других эволюционных и не эволюционных операторов Б-алгоритмов. Так, на основе бионических принципов могут быть построены операторы селекции, мутации и скрещивания осо-

бей. Идеи, близкие к идеям, реализованным в рассмотренных операторах глобального поиска, применяют в операторах локального поиска. Бионические аналогии находят место в операторах управления популяцией и субпопуляциями. Наконец, прямые аналогии с соответствующими биологическими процессами используют в операторах, осуществляющих коммуникации особей и их объединений.

При синтезе Б-алгоритмов возникает вопрос: существует ли некоторый такой алгоритм, который дает всегда лучшие результаты при решении всевозможных задач глобальной оптимизации? Ответ отрицательный: такого алгоритма нет и не может быть! Это следует из известной No Free Lunch теоремы (NFL-теоремы – бесплатных завтраков не бывает) [16]. С другой стороны, для решения любой задачи глобальной оптимизации во множестве всех известных оптимизационных алгоритмов, включая Б-алгоритмы, наверняка найдется хотя бы один алгоритм, который даст, как минимум, удовлетворительные результаты. Однако нет и не может быть алгоритма, который мог бы обеспечить высокую эффективность при решении всех задач оптимизации. Поэтому для каждого из Б-алгоритмов могут быть выделены классы задач, которые он решает: а) лучше других алгоритмов, б) примерно, как другие алгоритмы, в) хуже других алгоритмов.

Литература

1. Карпенко, А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 446 с.
2. Godfrey, C., Onwubolu, B., Babu, V. New Optimization Techniques in Engineering. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2004. – 712 p.
3. Гладков, Л.А., Курейчик, В.В, Курейчик, В.М. и др. Биоинспирированные методы в оптимизации: монография. – М.: Физматлит, 2009. – С. 384.
4. Курейчик, В. М. Основы теории эволюционных вычислений / Курейчик В. М., Курейчик В. В., Родзин С. И. – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2010. – 222 с.
5. Родзин, С.И., Скобцов, Ю.А., Эль-Хатиб, С.А. Биоэвристика: теория, алгоритмы и приложения: монография. – Чебоксары: ИД «Среда», 2019. – 224 с.
6. Пантелеев, А.В., Метлицкая, Д.В., Алешина, Е.А. Методы глобальной оптимизации: Метаэвристические стратегии и алгоритмы. – М.: Вузовская книга, 2013. – 244 с.
7. Brownlee, Jason. Clever Algorithms: Nature-Inspired Programming Recipes, 2011. 441 p. (https://github.com/clever-algorithms/CleverAlgorithms).
8. Can Umit, Alatas Bilas. Physics Based Metaheuristic Algorithms for Global Optimization // American Journal of Information Science and Computer Engineering, 2015. Vol. 1. – №. 3. – pp. 94-106.
9. Krishnaveni, A., Shankar, R., Duraisamy, S. A Survey on Nature-Inspired Computing (NIC): Algorithms and Challenges // Global Journal of Computer Science and Technology: Neural & Artificial Intelligence, 2019. – Vol. 19. Iss. 3-D. Online ISSN: 0975-4172 & Print ISSN: 0975-4350
10. Nazmul Siddique, Hojjat Adeli. Nature Inspired Computing: An Overview and Some Future Directions // Cognitive Computation, 2015. – Vol. 7. – pp. 706-714.
11. Sangita Roy, Samir Biswas, Sheli Sinha Chaudhuri. Nature-Inspired Swarm Intelligence and Its Applications // International Journal of Modern Education and Computer Science (IJMECS), 2014. – Vol.12. – pp. 55-65.

12. Sean Luke. Essentials of Metaheuristics (Second Edition). 2013. Publisher: lulu.com. – P. 242.
13. Xin-She Yang. Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms. Second Edition. Luniver Press, United Kingdom, 2010. –115 p.
14. Ashraf Darwish. Bio-inspired computing: Algorithms review, deep analysis, and the scope of applications // Future Computing and Informatics Journal. 2018. – Vol.3. – pp. 231-246.
15. Bo Xing, Wen-Jing Gao. Innovative Computational Intelligence: A Rough Guide to 134 Clever Algorithms. Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London. – P. 451.
16. Macready W.G., Wolpert D.H.No free lunch theorems for search / Operations research. Santa Fe Institute, 1995.

УДК 519.6

МОДЕЛЬ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМЫ «УМНОЙ» БИОЛОГИЧЕСКОЙ ЖИЗНИ РАСТЕНИЙ, ЖИВОТНОГО МИРА, ЧЕЛОВЕКА

А.А. Никольский,
РГУ им. А.Н. Косыгина, г. Москва, Россия,
А.Е. Никольский,
МГГЭУ, г. Москва, Россия,
Т.Е. Никольский,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия,
e-mail: nikae@mail.ru, nikae1936@yandex.ru, timkratos956@gmail.com

Аннотация. *В работе дано представление комплексных средств создания цифровой платформы для применения в дизайне перспективных объектов, вещей и экологии на базе основ бионических технологий жизни растений, животного мира, как «умной» биологической жизни, используя математические методы, элементы теоретической биофизики, технологии информационных интеллектуальных систем. Базой цифровой информационно-аналитической системы является онтологическая модель, представимая в виде взаимодействия трех уровней: – виды живых организмов (человек, животные, растения); – объекты живых систем (молекула, клетка, система; – модели исследования (эксперимент, математическая модель, математическое моделирование). Одним из примеров использования общей теории системы цифровой платформы «умной» биологической жизни рассмотрен инновационный проект реализации умной одежды, при производстве которой используется материал – ткань-невидимка, меняющая свой цвет в соответствии с окружающей средой.*

Ключевые слова*: биологическая жизнь, цифровая платформа, дизайн, биофизика, нейроны, рефлексы, поведение, растения, животные, биомимикрия онтологическая модель, аналитическая система, нейронные сети, эксперимент, устойчивость, биосемиотика.*

A MODEL OF INTELLIGENT DIGITAL PLATFORM OF «SMART» BIOLOGICAL LIFE OF PLANTS, ANIMALS, HUMANS

A.A. Nikolsky,
Kosygin Russian State University, Moscow, Russian Federation,
A.E. Nikolsky,
Moscow State University
for the Humanities and Economics, Moscow, Russian Federation,
T.E. Nikolsky,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract. *The paper describes system approach to creating a digital platform for biological design based on the bionic approach to the design of various technical objects and use of biomimicry. The basis of the digital platform is an ontological model, represented as the interaction of three levels: types of biological organisms (human, animals, plants); objects of biological systems (molecule, cell, system); research models (experiment, model, mathematical modeling). One of the examples of using the digital platform for «smart» biological design is an innovative project for the implementation of «smart» clothes, the production of which uses invisible material that changes its color in accordance with the environment.*
Keywords: *biological design, biomimicry, nature-inspired solutions, biosemiotics, digital platform, biophysics, ontological model, analytical system, computing tools, experiment, sustainable systems design.*

Введение. Исследование биологической жизни природы, животного мира, растений направлено на решение задач развития и сохранения условий обитания, деятельности человека и экологической сферы. В этой связи будем рассматривать свойства и средства животного мира, растений, которые могут активно и адекватно реагировать на действия окружающей среды, обеспечивая приспособление животных и растений к различным изменениям внешней среды и являться источником идей дизайна объектов жизнедеятельности для человека [1]. В мире все большую популярность набирает модель «от потребностей к продукту». Наука изначально фокусируется на существующих потребностях отраслей и предлагает разработки, способные их заполнить, используя бионические цифровые платформы. В американских биотехнологиях такие модели реализуют программы Stanford Biodesign Innovasion (США, Калифорния, Stanford Byers center for Biodesign) [2]. В Италии Стефано Манкузо – нейробиолог растений, профессор Флорентийского университета, директор международной лаборатории растительной нейробиологии во Флоренции и основатель Международного общества поведения и передачи сигналов среди растений представляет многочисленные примеры, связанные с жизнью и поведением

растений, с сознанием растений, зрением, слухом, речью, интеллектом, способностью разрешать проблемы выживания и роли корней в поведении растений [3]. В России первой стала акселерационная программа «Формула БИОТЕХ 2016» на базе Научного парка и Биотехнологического бизнес-инкубатора МГУ. Программа «Цифровой биодизайн и персонализированное здравоохранение» разрабатывается Объединением ведущих научных коллективов России по проблемам социально значимых заболеваний и управления активным долголетием.

Целью статьи является представление комплексных средств создания цифровой платформы для применения в дизайне перспективных объектов, вещей и экологии, на базе основ бионических технологий жизни растений, животного мира, как «умной» биологической жизни, используя математические методы, элементы теоретической биофизики, технологии информационных интеллектуальных систем.

1. Анализ живых организмов беспозвоночных и позвоночных. Анализ живых организмов беспозвоночных и позвоночных, их функций и структуры вносят вклад в понимание клеточных и молекулярных механизмов и нейронных процессов [4]. Свойства нейронов и клеток беспозвоночных, таких как: черви, муравьи, мухи, пчелы, пауки, улитки, пиявки, тараканы, сверчки, саранча, ракообразные, аналогичны свойствам клеток позвоночных, но значительно проще и позволяют проследить роль нейронов в восприятии магнитных полей, поляризованного света, температур, давлений и реализации поведенческих актов живых организмов. Одна из целей изучения подобных животных – каким образом простейшие рефлексы образуют сложное поведение. Ярким примером является изучение системы навигации пустынного муравья, использующего поляризованный свет как компас. Фоторецепторы восприятия поляризованного света и нервные механизмы навигации, позволяют ему следить за солнцем и формировать кратчайший путь к цели. Построенный робот по схеме муравья, экспериментально подтвердил возможность навигации с поляризованным светом. Фундаментальные механизмы развития и функционирование нервной системы живых организмов остаются очень похожими от вида к виду в процессе эволюции. На этой основе аналогично строятся «умные» робототехнические системы.

2. Применение биофизических представлений при изучении явлений жизни растений. Изучение явлений жизни растений (травы, деревьев), биофизических представлений, различных процессов роста и развития растительного организма в целом связано с превращением питательных веществ в вещества и изменением структуры самой клетки на этапах ее развития. Ведущим фактором роста многоклеточного организма является взаимодействие клеток с участием межклеточных систем самоорганизации и регуляции. Особенности биофизических представлений при изучении различных явлений жизни лесной экосистемы, оценки биологических

закономерностей роста и продуктивности, позволяют объяснить, например, способность дерева к морозостойкости и выживанию при низкой температуре, что достигается при помощи выработки устойчивости клеток к обезвоживанию при низких температурах и препятствию кристаллизации воды или способностью клетки выдержать обезвоживание при вымораживании воды. Подобные факторы могут использоваться, например, при проектировании систем для низкотемпературных регионов. В качестве основной концепции в модели описания физических и биологических процессов, протекающих на различных иерархических уровнях лесной экосистемы, использована системная технология взаимосвязи функциональных элементов: от уровня отдельного листа до уровня отдельного дерева, древостоя и всей экосистемы в целом. Модель состоит из взаимосвязанных функциональных блоков, описывающих: перенос солнечной энергии внутри растительности; турбулентный перенос тепла, водяного пара и CO_2 внутри растительности и в пределах приземного слоя атмосферы; *транспирацию*, движение влаги в растениях, изменение запасов влаги в листьях и заболони деревьев; испарение перехваченных растительностью атмосферных осадков, испарение с поверхности почвы; фотосинтез, гетеротрофное и автотрофное дыхание растений и почвы; перенос тепла и влаги в почве. Основным преимуществом модели является ее способность не только определить интегральные потоки H_2O, N и CO_2 на уровне всей экосистемы, но также и адекватно оценить вклад почвы, лесной подстилки, а также деревьев разных пород в суммарные потоки с учетом их индивидуальной реакции на изменения условий внешней среды, фенологии, а также различий в структуре и биофизических свойствах. Расчет потоков в модели может выполняться с шагом по времени один час, что позволяет смоделировать, как годовую, так и суточную динамику теплового и вещественного обмена в растительных сообществах, с учетом нестационарности влагопереноса в древесных растениях [5]. Процесс фотосинтеза – преобразования световой энергии в энергию химических связей органических веществ, необходимых для жизнедеятельности, как самих фотосинтезирующих организмов, так и других организмов, не способных к самостоятельному синтезу органических веществ, осуществляется различными группами организмов – высшими зелеными растениями, многоклеточными зелеными, красными и бурыми водорослями, одноклеточными: эвгленовыми, динофлагеллятами и диатомовыми водорослями, а также цианобактериями, зелеными и пурпурными бактериями. Суммарное уравнение фотосинтеза в общем виде можно записать следующим образом:

$$2ДH_2+CO_2\text{->}hv\text{->}(CH_2O)+2Д+H_2O,$$

где hv – квант света, $ДH_2$ – донор водорода, Д – окисленное состояние донора, а CH_2O – фрагмент молекулы углевода.

Биосемиотический подход динамики жизни растений определяется информационным, энергетическим и вещественным взаимодействием организмов лесной экосистемы, как агентов в многоагентной системе. Гипотеза о биосемиотическом самоуправлении и регулировании в лесной экосистеме, утверждает, что корневая система, как «мозг» экосистемы, играет основную функцию коммуникации и смыслового взаимодействия растений. В этом смысле биосемиотика, как понятие, близка теории сложных систем, биокибернетике, теории функциональных систем, концепции когнитивных, конвергентных, нейрофизических коммуникаций [6]. Биосемиотика предлагает новые концептуальные и методологические средства для научного понимания смысла, для изучения богатого разнообразия невербальных человеческих, животных и растительных коммуникативных процессов, конвергентной связи восприятия и действия жизненного мира организмов и структуры их семантических ландшафтов.

3. Исследование биологической жизнедеятельности животного мира, растений. Рассматривая свойства и средства животного мира, растений, которые могут активно и адекватно реагировать на действия окружающей среды, обеспечивая приспособление животных и растений к различным изменениям внешней среды, можно сделать вывод об их способности к жизнедеятельности. Жизнедеятельность проявляется через обмен объектов природы информацией, веществом, энергией, с окружающей средой и использование ее на поддержание своей структуры, способности к развитию, адаптации к среде, реагированию на окружающую среду, на размножение, передачу наследственной генетической информации и на эволюцию. Так как объектом исследования является живой организм, то при изучении процессов жизнедеятельности в основном используются методы теоретической биофизики. Этапы развития биофизики связаны с рядом открытий, таких, как пространственные структуры белка, спирали ДНК, биоэлектрические ионные явления, фотосинтез, генерация тока и др., которые определили три направления в биофизике: молекулярную биофизику, биофизику клетки, биофизику сложных систем.

Исследование биофизики живого организма обеспечивается использованием методов физического эксперимента, химических и математических методов, методов математического моделирования. К биофизике относят и области науки, изучающие механизмы воздействий на биологические системы различных физических факторов: свет, ионизирующие излучения, электромагнитные поля, температура и др. В рамках биофизики выделяют биомеханику, биологическую оптику, биомагнетизм, а также биологическую термодинамику, изучающую общие закономерности превращения энергии, которые связаны с переходом системы из одного состояния в другое, а также проблемы устойчивости и эволюции биологических систем. При переходе какой-либо системы из одного состояния в другое в соответствии с первым законом термодинамики предполагается, что сумма

произведенной работы и теплоты зависит только от начального и конечного состояния и не зависит от пройденного при этом переходе пути. Математически это выражается формулой:

$$U1–U2=A+Q,$$

где U1 и U2 означают всю энергию системы в начальном и в конечном состоянии; A – произведенная механическая работа; Q – количество отданной теплоты.

Живые организмы для обеспечения своей жизнедеятельности всегда должны находиться в устойчивом неравновесном термодинамическом состоянии, любые изменения параметров внешней среды немедленно вызывают определенные изменения в протекании в них биологических процессов. Утверждается, что всякое изменение одного из факторов равновесия видоизменяет систему, в соответствии с принципом Ле Шателье, в том направлении, в котором рассматриваемый фактор испытывает изменение, противоположное первоначальному. Эти положения используются при построении, аналитическом исследовании и машинных экспериментах устойчивости параметров моделей круговорота углерода, азота в системе «атмосфера – растения (трава, деревья) – почва». Математическая теория жестких и мягких моделей живых систем позволяет оценить условия и наличие информации, подтверждающей структурную устойчивость реальных живых систем.

Дальнейшее развитие получили работы по алгебраическому анализу стохастической организации геномных ДНК, которые дают подходы к созданию искусственного интеллекта геноморфного типа. [7]. Под генетическим интеллектом понимается часть интеллектуальных потенций живых организмов позволяющих на основе генетической информации в молекулах ДНК и РНК строить, например, из одной оплодотворенной клетки организма организм с множеством клеток, при меняющихся условиях внешних воздействий. Утверждается доктрина энерго-информационной эволюции на основе био-антенных решеток, выявления глубокой связи ДНК информатики с формализмами квантовой информатики, а также алгебро-биологическим подходом к искусственному интеллекту. Эти положения являются основой традиционного синтеза баз данных и причинно-следственных продукционных правил, правил принятия решений в системе знаний аналитических информационных интеллектуальных систем, используемых в структуре интеллектуальной цифровой платформы «умной» биологической жизни растений, животного мира и экологии.

4. Общие принципы построения и использования платформы биодизайна. Системное представление процесса использования идей свойств и средств живых растений, животного мира, как «умной» биологической жизни, которая позволяет активно и адекватно реагировать на

действия окружающей среды, обеспечивая приспособление растений и животных к различным изменениям внешней среды, может быть принято за основу онтологической модели интеллектуальной платформы «умной» биологической жизни, представляющей классификационное пространство видов живых объектов. Для представления процесса и результатов использования инновационных разработок необходимо построение онтологической модели предметной области для сопровождения динамического процесса дизайна. Очевидно, онтологическая модель представима системой вида

$$PS = \langle F,P,I \rangle,$$

где F – база данных; P – база знаний, содержащая множество продукций; I – решатель, реализующий процессы вывода.

Общая модель онтологической системы представима в виде взаимодействия трех уровней онтологических моделей:

- онтологическая модель первого уровня – виды живых организмов: человек, животные, растения;
- онтологическая модель второго уровня – объекты живых систем: молекула, клетка, система;
- онтологическая модель третьего уровня – модели исследования: эксперимент, математическая модель, математическое моделирование.

Процессы выбора инновационных разработок возможны при взаимодействии трех уровней функциональных систем онтологической модели, используя исходные данные и экспериментальные алгоритмы, теоретические химические, динамические нелинейные уравнения и технологии математического моделирования. Онтологическая модель является базой цифровой информационно-аналитической системы, представимой в виде экспертной системы, реализующей рефлексивно-активную саморазвивающуюся технологию восприятия ситуаций внешней среды и результативных действий поддержки гармонической деятельности. Общая структурная схема цифровой платформы биодизайна и его окружения показана на рис. 1.

Цифровая платформа «умной» биологической жизни, как программная среда, в которой аппаратные средства интегрируются с прикладными решениями на основе нейронных сетей, повышают эффективность сферы деятельности. Чтобы использовать принципы биодизайна и, в частности, биомимикрию, как систему подражания живой природе, которая помогает находить эффективные технические и дизайнерские решения, необходимо, основываясь на испытанных природой процессах и стратегиях выживания, действенность и эффективность которых проверялась в течение нескольких миллиардов лет, определить и понять сущность моделируемых функций объекта исследования.

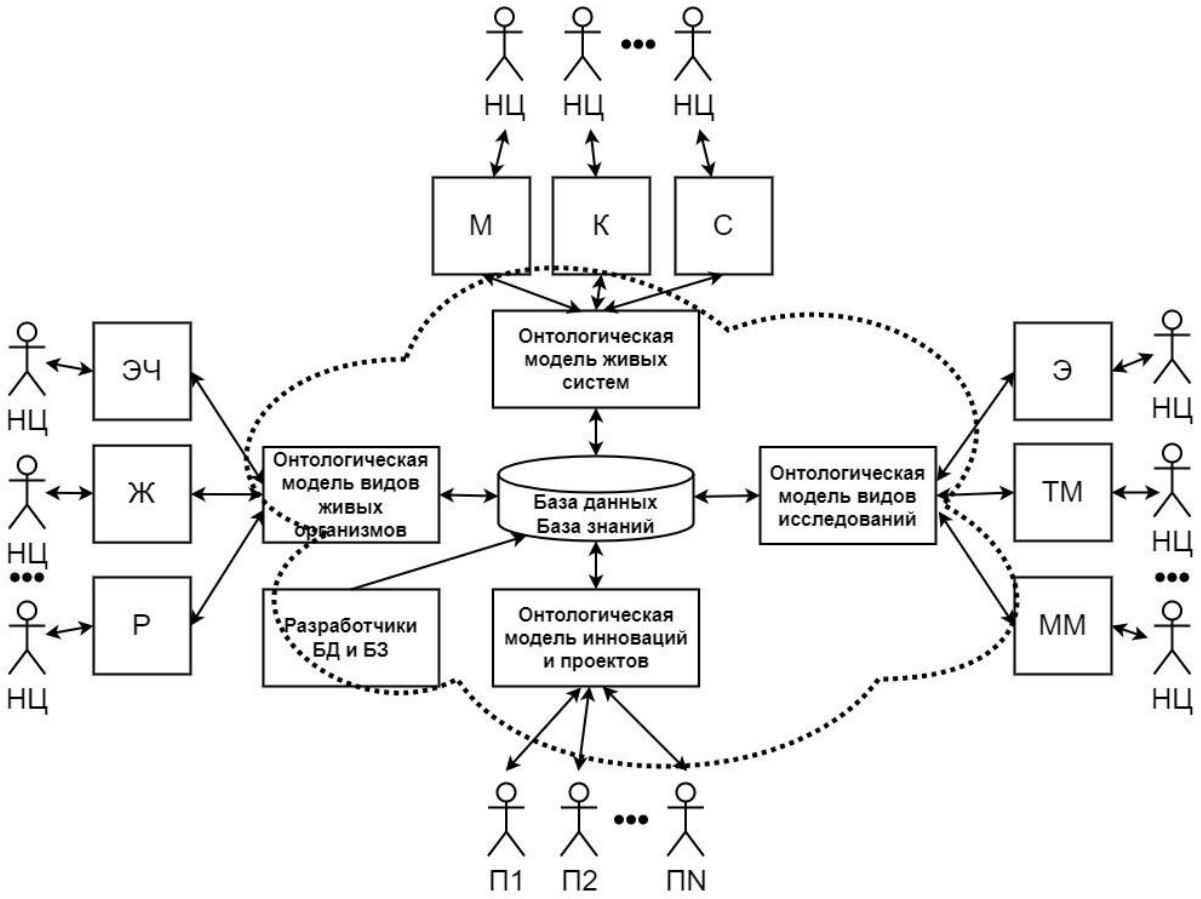


Рис. 1. Структурная схема цифровой платформы биодизайна и его окружения: ЭЧ – эргономика; М – молекула человека; К – клетка; Ж – животные; С – система; Р – растения; Э – эксперимент; НЦ – научный центр;ТМ – теоретическая модель; П1, П2, ПN – пользователи; ММ – математическая модель.

Функция является важной основой биомимикрии и одним из элементов, отличающих биомимикрический дизайн от биофильного и биоморфного дизайна. Вместо того, чтобы изучать и использовать в качестве аналогии визуальные и эстетические качества биологического мира, биомимикрия фокусируется на изучении того, как живые существа выполняют определенные функции. В контексте биомимикрии функция относится к роли, которую играют адаптации или поведение биологического организма, которые позволяют ему выжить. Биологическая функция может также рассматриваться в контексте цели дизайнерского решения. Биологические организмы удовлетворяют функциональные потребности с помощью биологических стратегий. Биологическая стратегия – это характеристика, механизм или процесс, выполняющий определенную функцию для биологического организма, в том числе связанную с его приспособлением для целей выживания. Например, биологическая стратегия и функция мехатронной системы муравья состоит в обеспечении возможности поднимать и нести полезную нагрузку, в 11 раз превышающую его собственный вес или выбор маршрута при поиске пищи. Биологическая стратегия и функция меха

арктических животных состоит в сохранении тепла и изоляции жизненно важных систем организма от воздействия холода. Биологическая стратегия и функция кожи хамелеона состоит в изменении цвета кожи в соответствии с цветом окружающей среды и др. Определение и изучение функции и стратегии биологического организма позволит собрать и выбрать необходимую биологическую информацию, которая имеет отношение к задаче дизайна, проектирования и моделирования на основе принципов биомимикрии. Различные концепции биодизайна, и в том числе биомимикрии, получили значительное развитие в связи с тем, что в настоящее время уделяется большое внимание так называемым ESG-принципам (экология, социальная ответственность, корпоративное управление), где на первый план выходят вопросы экологичности изделий и технологий. Очевидной тенденцией современного времени является приоритет проектов, направленных на экологию, использование натуральных материалов, рециклинг ресурсов, снижение углеродного следа и др. Причем, руководствуются принципами ESG не только компании, разрабатывающие инновационные технологии и продукты, но и другие субъекты, участвующие в экономических и социальных процессах: государственные органы, банки, инвестиционные компании и др. В этой связи, создание платформы биодизайна и биомимикрии, которая может выступать в роли инструмента, позволяющего решать практические задачи, связанные с реализацией ESG-повестки, является очень актуальным. Под платформой биодизайна и биомимикрии в данном случае мы будем понимать информационный ресурс или информационную систему, содержащую в себе:

1) структурированную информацию (базу знаний) о конкретных примерах использования принципов биодизайна и биомимикрии, а также научного обоснования возможностей использования данных принципов на практике;

2) информацию о субъектах инноваций, имеющих научный и практический задел или имеющих подтвержденный опыт реализации проектов в области биодизайна и биомимикрии.

Ключевыми пользователями платформы биодизайна и биомимикрии будут выступать субъекты инноваций (научные и исследовательские лаборатории проводящие фундаментальные исследования, научные и исследовательские лаборатории, выполняющие практические научно-исследовательские разработки по заказу хозяйствующих субъектов, консалтинговые компании, работающие в сфере R&D, исследовательские подразделения компаний). Основной функционал данной платформы будет сводиться к поиску ответов на несколько следующих вопросов, интересующих различные субъекты инноваций.

1) Как можно применить на практике ту или иную биологическую функцию или стратегию, которая является целевой для дизайнера, инженера или разработчика.

2) Имеются ли примеры в живой природе, реализующие некоторый функционал или имеющие характеристики, являющиеся целевыми для дизайнера, инженера или разработчика.

3) Существует ли научная база или результаты интеллектуальной деятельности (РИД) – научные статьи, патенты, ноу-хау, на технологии или изделия, которые соответствуют примерам в живой природе, реализующим некоторый заданный функционал или имеющим характеристики, являющимися целевыми для дизайнера, инженера или разработчика.

5. Структура и инструменты платформы биодизайна на основе подхода биомимикрии. В соответствии с вышеизложенным, база знаний платформы биодизайна и биомимикрии включает в себя:

1) кейсы (примеры) использования биологических стратегий и функций живых организмов с подробным описанием научных основ механизмов реализации биологических стратегий и функций;

2) кейсы (примеры) с описанием инноваций (разработок, исследований, РИД) на основе использования биологических стратегий и функций живых организмов;

3) онтологический классификатор живых организмов и биологических систем;

4) онтологический классификатор биологических стратегий и функций живых организмов и биологических систем;

5) классификатор сфер применения биологических стратегий и функций живых организмов и биологических систем.

Дополнительный инструментарий для работы с базой знаний платформы биодизайна и биомимикрии может включать в себя:

1) экспертную систему, реализованную на основе продукционных правил и обеспечивающую быстрое нахождение кейсов (примеров) биологических стратегий и кейсов (примеров) с описанием инноваций (разработок, исследований) на основе заданных параметров биологических стратегий и функций живых организмов, характеристик живых организмов, сфер применения;

2) систему гипертекстовых ссылок, с помощью которой обеспечивается возможность быстрой навигации и поиска по видам живых организмов, видам биологических стратегий и функций, кейсам (примерам) реализации биологических стратегий и функций, кейсам (примерам) с описанием инноваций, сферам применения.

6. Пример использования платформы биодизайна. В качестве примера рассмотрим механизм работы на платформе биодизайна AskNature [8], разработанной Институтом биомимикрии (США).

Функционал информационного ресурса AskNature включает в себя инструменты поиска подходящих проектов биомимикрии по классификатору биологических стратегий/функций, по классификатору живых организмов и систем, а также классификатору сфер деятельности человека. Фрагменты данных классификаторов представлены на рис. 2.

Фрагмент классификатора биологических стратегий/функций

1. Изменение
   - 1.2. Адаптация/Оптимизация
     - 1.2.1. Адаптация поведения
     - 1.2.2. Адаптация фенотипа
     - 1.2.3. Адаптация генотипа
     - 1.2.4. Эволюция
     - 1.2.5. Оптимизация формы/материалов
   - 1.3. Изменение химического/электрического состояния
   - 1.4. Изменение физического состояния
     - 1.4.1. Изменение размера/формы/массы/объема
     - 1.4.2. Изменение характеристик материала
     - 1.4.3. Изменение плотности
     - 1.4.4. Изменение света/цвета
     - 1.4.5. Изменение фазового состояния
     - 1.4.6. Изменение положения, структуры
     - 1.4.7. Изменение давления
     - 1.4.8. Изменение скорости
     - 1.4.9. Изменение плавучести
   - 1.5. Преобразование/преобразование энергии
2. Разрушение, измельчение, расчленение
   - 2.2. Химическое
     - 2.2.1. Химическое разрушение неорганических соединений
     - 2.2.2. Химическое разрушение органических соединений
     - 2.2.3. Химическое разрушение полимеров
     - 2.2.4. Отщепление галогенов от органических соединений
     - 2.2.5. Расщепление тяжелых металлов из органических соединений
   - 2.3. Физическое
   - 2.4. Разрушение неживых материалов
3. Защита от физического вреда
4. Движение
5. Другие

Фрагмент классификатора видов живых систем

1. Животные
2. Археи
3. Бактерии
4. Экосистемы
5. Грибы
6. Растения
7. Протисты
8. Другие

Фрагмент классификатора видов областей применения

1. Аэрокосмическая промышленность
2. Архитектура
3. Автоматизация
4. Связь
5. Электроника
6. Фильтрация
7. Продовольствие и сельское хозяйство
8. Зеленая химия
9. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха
10. Инфраструктура
11. Производство
12. Материалы
13. Медицина и биотехнологии
14. Возобновляемая энергия
15. Робототехника
16. Безопасность
17. Информатизация (ПО и ИТ)
18. Транспорт
19. Очистка сточных вод
20. Переработка отходов
21. Другие

Рис. 2. Фрагменты классификаторов.

Фрагмент интерфейса взаимодействия с платформой AskNature представлен на рис. 3. В качестве практического приложения использования платформы AskNature была выбрана следующая задача: «*Как можно использовать принципы биодизайна и биомимикрии для поиска решений по созданию инновационных средств маскировки на основе использования новых материалов или использования иных принципов?*». На начальном этапе работы с платформой AskNature с использованием классификатора биологических стратегий/функций задача была уточнена в следующем виде: *«Провести анализ биологических стратегий/функций, связанных с изменением и адаптацией цвета биологических систем в зависимости от окружающей среды и делающих объект маскировки невидимым для систем видеонаблюдения»*.

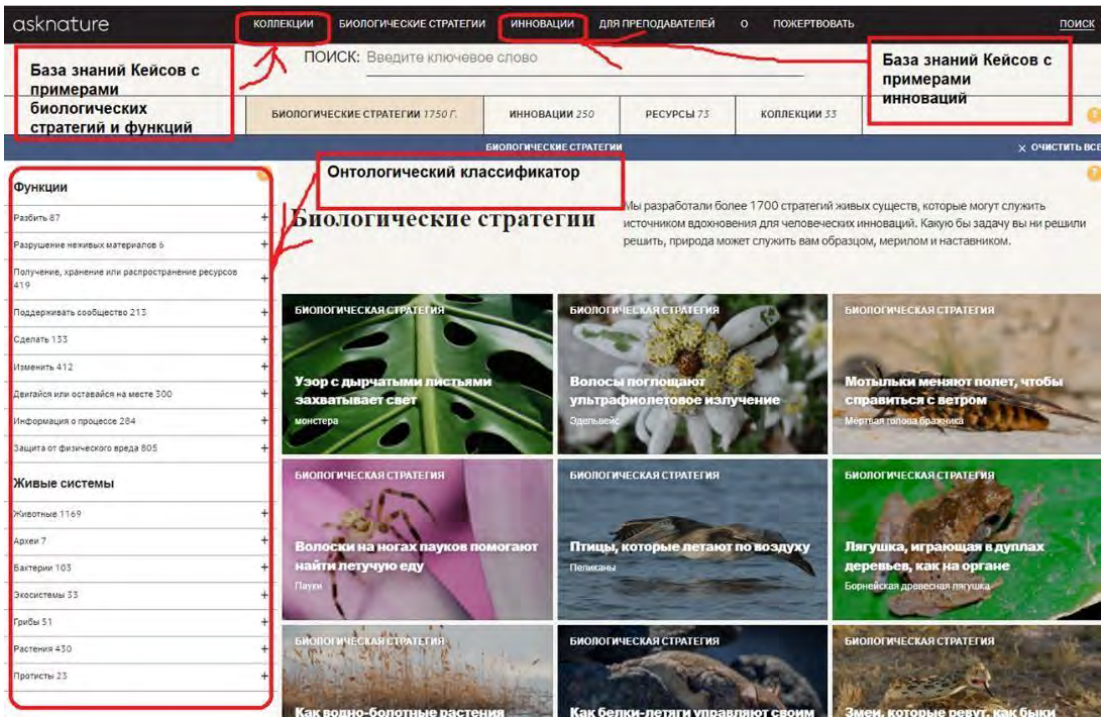


Рис. 3. Фрагмент интерфейса взаимодействия с платформой AskNature.

Путь уточнения биологических стратегий/функций с использованием классификатора биологических стратегий/функций был следующий: «Изменение (1) > Изменение физического состояния (2) > Изменение света/цвета (3)». С использованием классификатора видов живых систем был установлен фильтр «1. Животные». А с помощью классификатора видов областей применения были установлены фильтры «12. Материалы» и «16. Безопасность». Результат выбора, подходящих кейсов (примеров) использования биологических стратегий и функций живых организмов применительно к поставленной задаче приведен на рис. 4.

В качестве наиболее подходящего кейса (примера), исходя из целей нашей задачи, был выбран кейс (пример) «Адаптивный камуфляж помогает слиться с окружающей средой/Каракатица». Фрагмент экрана, иллюстрирующего процесс более подробного изучения данного кейса (примера) представлен на рис. 5.

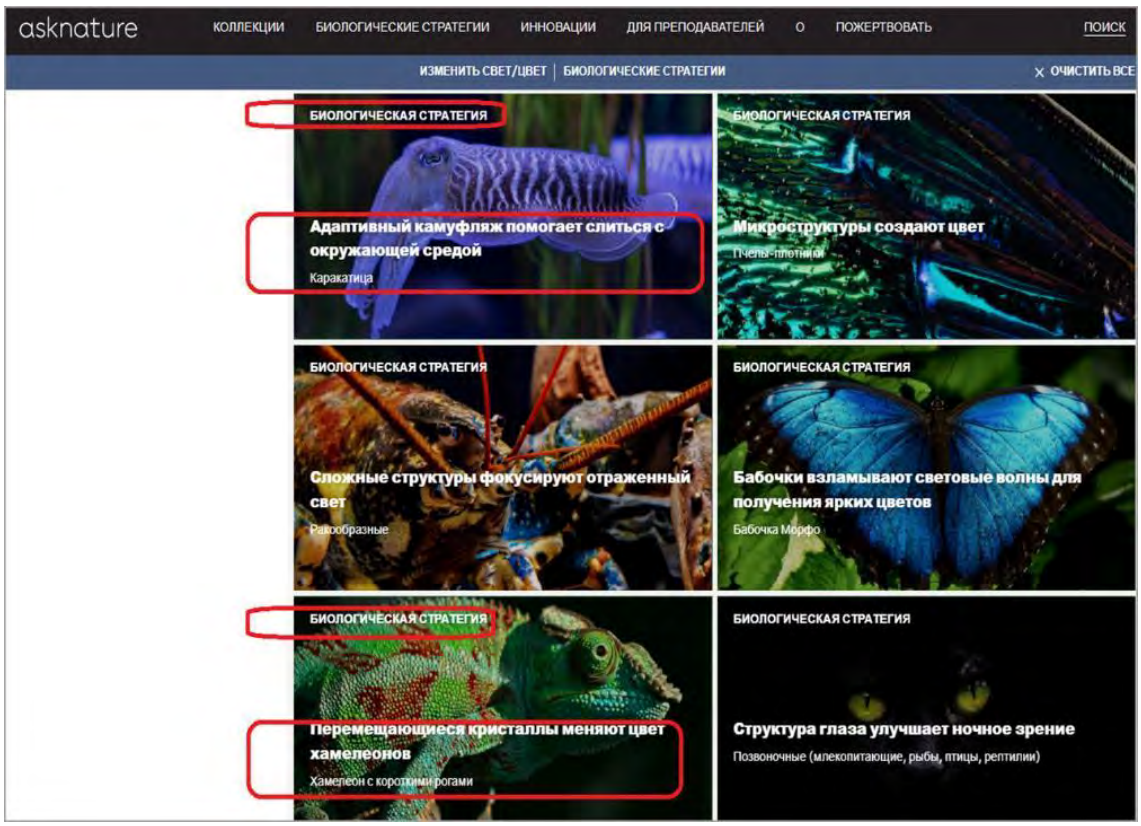


Рис. 4. Результат выбора подходящих кейсов (примеров) использования биологических стратегий и функций живых организмов.

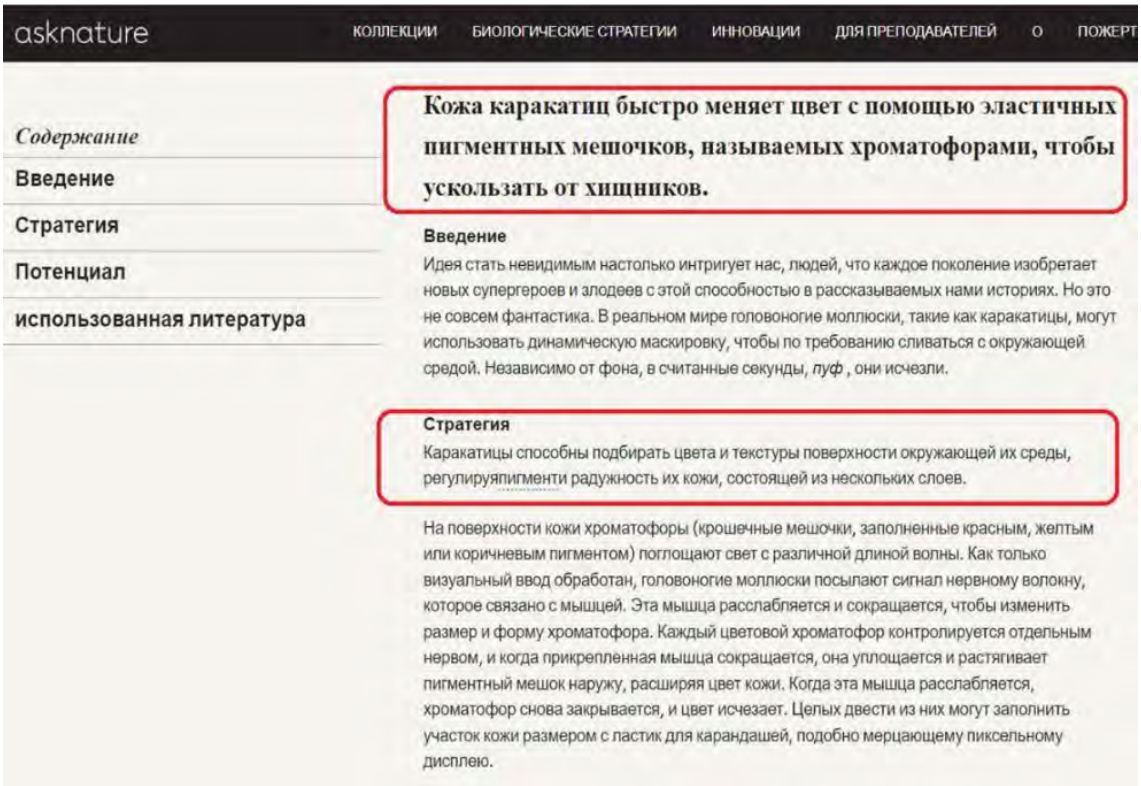


Рис. 5. Анализ кейса (примера) с описанием механизма реализации биологической функции.

По результатам анализа кейса (примера) «Адаптивный камуфляж помогает слиться с окружающей средой/Каракатица» с использованием платформы AskNature были отобраны примеры инновационных проектов и направлений исследований, являющихся наиболее близкими по содержанию к поставленной в рамках рассматриваемого примера задаче. В частности, были выбраны следующие профили инновационных проектов и исследований: ткань-невидимка; умная одежда, при производстве которой используются материалы, меняющие свой цвет в соответствии с окружающей средой.

Заключение. В работе представлены основы бионических технологий и показана возможность их использования в дизайне перспективных объектов и вещей на основе модели интеллектуальной цифровой платформы «умной» биологической жизни растений, животного мира, человека.

Литература

1. Бауэр, Э.С. Теоретическая биология. – Ленинград: Изд. ВИЭМ, 1935.
2. Biodesign Innovation Course. biodesign. stanford. Edu. stanford. innovation. https://biodesign.stanford.edu/programs/stanford-courses/biodesign-innovation.html
3. Стефано Манкузо, Алессандра Виола // О чем думают растения. Тайная жизнь, скрытая от посторонних глаз. dzen.ru›a/X7PqsfaHL0N-Ju1j
4. Николс Джон, Мартин Роберт, Брюс Валлас, Пол Фукс. От нейрона к мозгу: Пер с англ. Изд.3. – Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012.
5. Придача, В.Б., Ольчев, А.В., Сазонова, Т.А., Тихова, Г.П. Параметры CO_2/H_2O-обмена древесных растений как инструмент мониторинга и оценки состояния природной среды // Успехи современного естествознания. – Изд. Ак. естествознания, 2019. – № 11. – С. 25-30.
6. Князева, Е.Н. Биосемиотика: истоки междисциплинарного направления // Вопросы философии. – 2018. – № 11.
7. Петухов, С.В. Алгебраическая биология, гешталь-генетика, наследственный и искусственный интеллект. – М.: Биомашсистемы. – 2021. – том 5. – №1. – С. 82-147.
8. GitHub - AskNature AN-React: AskNature 2.0.0 и выше"github.com AskNature, http://www.asknature.org.

УДК 165.2

ЗНАНИЕ КАК БИОНИЧЕСКИЙ КОНЦЕПТ

М.Б. Оселедчик,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия,
e-mail: Balu13@yandex.ru

Аннотация. *Знание является необходимым атрибутом живого, здорового, активного индивида, приобретенным и развитым им в процессе эволюции и ставшим одним из главных факторов эволюционного успеха человека современного типа. В силу этого обстоятельства знание выступает как*

бионический концепт, являясь не только свойством живой системы, но и само по себе представляя живую систему – самособирающуюся неравновесную динамическую систему с фрактальными характеристиками. Основные особенности живых систем – обмен веществ, саморегуляция, раздражимость, наследственность и изменчивость, единый структурный принцип организации, самовоспроизведение, рост и развитие, ритмичность, целостность и дискретность – в полной мере присущи и знанию индивида, и знанию социума.
Ключевые слова: *знание, бионический концепт, бионическая архитектура, бионический подход, функциональная теория знания, атрибуты живой системы, когнитивное функционирование.*

KNOWLEDGE AS A BIONIC CONCEPT

M.B. Oseledchik,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract*. Knowledge is a necessary attribute of a living, healthy, active individual, acquired and developed by him in the process of evolution and has become one of the main factors of the evolutionary success of a modern type of man. Due to this circumstance, knowledge acts as a bionic concept, being not only a property of a living system, but also representing a living system in itself – a self-assembling nonequilibrium dynamic system with fractal characteristics. The main features of living systems – metabolism, self-regulation, irritability, heredity and variability, a single structural principle of organization, self-reproduction, growth and development, rhythm, integrity and discreteness – are fully inherent in both the knowledge of the individual and the knowledge of society.*
Keywords: *knowledge, bionic concept, bionic architecture, bionic approach, functional theory of knowledge, attributes of a living system, cognitive functioning.*

Введение. Знание – один из самых популярных, но в то же время один из самых трудноопределяемых концептов современной науки. Определения знания даются буквально сотнями, но ни одно из них не имеет универсального характера.

Причина сложности определения этого понятия коренится в исторически сложившейся в науке и философии антиномии трактовки знания одновременно, как продукта познавательной деятельности, так интегративной функции когнитивных процессов в сознании индивида и как состояния когнитивного функционирования индивида.

Для преодоления этой антиномии мы предлагаем следующий тезис: знание имеет двойственную концептуально-процессуальную природу, являясь по своей сути неравновесной, самособирающейся, динамической системой с фрактальными и квантовыми характеристиками.

Мы рассматриваем знание как бионический концепт в силу двух следующих базовых соображений.

1) Знание является эволюционно выработанным свойством конкретного вида биологических объектов – людей современного типа. Знание, как постоянное интегральное состояние когнитивных процессов в сознании человека, стало одним из принципиальных факторов биологического выживания популяции и эволюционного успеха современного человека как вида.

2) Знание обладает сложной, но, в то же время, гибкой бионической архитектурой, так как оно одновременно является свойством такой живой системы как человек и само, по сути, обладает всеми необходимыми атрибутами живой системы.

1. **Постановка задачи.** Мы рассматриваем знание с точки зрения функциональной теории [1, 2]: «Знание как интегрирующая функция континуальных сенсорных, перцептивных, мнемических, имажинитивных, аттенционных и мыслительных процессов в сознании человека – это исторически сложившаяся и постоянно развивающаяся и изменяющаяся во времени нелинейная динамическая система лингвокреативного континуально-дискретного онтосемантического конструирования моделей в виде ментальных концептов фрагментов внешней и внутренней действительности в сознании индивида, обеспечивающая оптимальную жизнедеятельность индивида и благодаря своему распределению в социуме поддерживающая функционирование социума и создающая предпосылки для возможности его развития».

Исходя из такой трактовки знания, мы можем проанализировать его как живую систему, обладающую основными существенными признаками живых систем.

Жизнь часто трактуется как «форма существования саморегулирующихся, самовоспроизводящихся, макромолекулярных систем, характеризующихся иерархической организацией, обменом веществ, регулируемым потоком информации и энергии» [3]. При этом живая система обязательно рассматривается как открытая система, обменивающаяся со средой веществом, энергией и информацией.

Живая система одновременно обладает набором следующих особых свойств:

Определенный химический состав. Живые организмы состоят из тех же химических элементов, что и объекты неживой природы, однако соотношение этих элементов различно. Основными элементами живых существ являются C, O, N и H.

Единый принцип структурной организации. Клетка является единой структурно-функциональной единицей, а также единицей развития почти для всех живых организмов. Все организмы состоят из клеток. Исключение – вирусы, но и у них некоторые свойства живого проявляются, когда они находятся в клетке (вирусы являются паразитами).

Обмен веществ (метаболизм) и энергозависимость. Живые организмы являются открытыми системами, они зависят от поступления в них веществ и энергии из внешней среды.

Саморегуляция. Живые организмы обладают способностью поддерживать постоянство своего химического состава и интенсивность обменных процессов.

Раздражимость. Живые организмы проявляют раздражимость, то есть способность отвечать на определенные внешние воздействия специфическими реакциями.

Наследственность и изменчивость. Живые организмы способны передавать признаки и свойства из поколения в поколение с помощью носителей информации – молекул ДНК и РНК. Наследственность – способность организмов обеспечивать передачу признаков, свойств и особенностей развития из поколения в поколение. Изменчивость – способность организмов приобретать новые признаки и свойства.

Самовоспроизведение (репродукция). Живые организмы способны размножаться – воспроизводить себе подобных.

Рост и развитие. Рост – увеличение массы организма (особи), органа или участка ткани за счет увеличения количества и размеров клеток и неклеточных образований. Развитие – биологический процесс тесно взаимосвязанных количественных (рост) и качественных преобразований особей с момента зарождения до конца жизни.

Ритмичность. Биологические ритмы – периодически повторяющиеся изменения в ходе биологических процессов в организме. Живые организмы проявляют ритмичность жизнедеятельности (суточную, сезонную и др.), что связано с особенностями среды обитания.

Целостность и дискретность. С одной стороны, вся живая материя целостна, определенным образом организована и подчиняется общим законам; с другой стороны, любая биологическая система состоит из обособленных, хотя и взаимосвязанных элементов [4].

Таким образом, любая живая система:

1) имеет сложную многослойную гетерогенную структуру для эффективной адаптации к разнообразию внешнего воздействия, легко адаптируется и растет при изменении условий среды;

2) не имеет внутреннего четкого разделения своих зон подобно природе, в которой нет четких линий, за счет этого она компактна, универсальна и приспособляема;

3) максимально функционально универсальна: решает задачи любых типов и уровней сложности;

4) оптимальна по своей конструкции, позволяя максимально экономно расходовать усилия и энергию для быстрого решения поставленных задач;

5) способна к саморегуляции;

6) способна гармонично сосуществовать с другими живыми системами, адаптируясь к ним и вступая в отношения обмена.

2. Знание как живая система. Посмотрим с точки зрения указанных нами базовых свойств живых систем на особенности знания: обладает ли оно такими же свойствами?

1) Знание как явление идеальное по форме своего существования, конечно же, не обладает никаким химическим составом, но в основе нашего подхода лежит функциональное рассмотрение знания как интегрирующей функции когнитивных процессов в сознании человека. Сознание же в свою очередь является производным свойством нейронной архитектуры связей индивидуального мозга, обладающих реальной и многообразной физической природой и базирующихся на сложных биохимических процессах, таких же, как и для других биологических процессов внутри живой системы [5].

2) Единый принцип структурной организации в знании проявляется сполна. С точки зрения наличия сложной многослойной гетерогенной структуры мы можем совершенно определенно утверждать, что знание – идеальная по форме своего существования топологическая структура, являющаяся нелинейной динамической системой и представляющая собой пересечение бесконечного множества мета- и гиперграфов, вершины которых являются концептами с выделенным понятийным ядром и ближней и дальней периферией; именно эти графы и являют собой своего рода «клетки-кванты» знания.

3) С точки зрения наличия в знании как в живой системе обмена веществ и энергозависимости мы утверждаем, что знание непрерывно поддерживается за счет континуального информационного обмена со средой в том числе с другими индивидами и непрерывного течения когнитивных процессов в сознании человека, а эти процессы в свою очередь зависят от состояния мозга индивида, которые естественно зависят от качества системы питания и обеспечения жизнедеятельности индивида.

4) Саморегуляция, изменчивость и раздражимость знания как живой системы проявляются в том, что при столкновении с новой ситуацией и появлении новой прагматически значимой задачи мета- и гиперграфы концептов мгновенно перестраиваются, и их гиперребра начинают соединять другой набор вершин-концептов. Это дает прирост и реконфигурацию знания, т.е. прирост и реконфигурацию новых гиперребер и изменение содержания ядер и периферии концептов. За счет этого знание как динамическая система имеет постоянно двигающиеся и меняющиеся объемы и входящие в него образы. Знание очень пластично, легко комбинаторно и обладает высокой функциональной гибкостью и живучестью для обеспечения индивида интеллектуальными ресурсами для разрешения проблемных ситуаций.

5) Целостность и дискретность знания проявляются следующим образом. В принципе, знание вообще можно рассматривать как непрерывно развивающееся и перестраивающееся семантическое пространство. Оно

постоянно совершенствуется с течением времени благодаря обучению, приобретаемому индивидом когнитивному опыту и благодаря этому получению в свой состав новых концептов и возникновению новых гиперребер. Как продукт эволюции и как живая система знание в силу своей природной структуры функционально пластично и адаптивно за счет использования концептов, которые фиксируют базовые понятийные признаки, отказываясь при этом от единичных деталей. Любая полученная индивидом задача играет роль вызова, стимула, своего рода спускового крючка для начала поиска ее решения.

Здесь работает семантическая причинно-следственная цепочка:

информация→понимание→знание→интерпретация→решение.

Являясь развивающимся семантическим пространством, знание обладает практически бесконечной возможностью не просто комбинировать для решения полученной задачи имеющиеся смыслы и формы, но также продуцировать и конструировать новые смыслы.

6) Теперь мы можем проанализировать свойства наследственности и самовоспроизведения знания. Мы исходим из той позиции, что знание приобретается не только благодаря личному опыту, когнитивной робинзонаде индивида. Знание приобретается в первую очередь благодаря процессам социализации и аккультурации индивида, т.е. благодаря социокультурной природе знания. Знание усваивающего культуру социума индивида является фрактальным по отношению к базовой культуре социума, причем, как мы уже показывали в своих работах, стохастическим фракталом.

Усваивая принятую систему концептов своего социума, индивид одновременно воспринимает привычную для этого социума систему понимания, интерпретации и логику рассуждения, т.е. индивид усваивает набор стандартных паттернов и фреймов, привычных графов со стандартными взаимосвязями концептов на их ребрах. Так, в процессе социализации, аккультурации, коммуникации и обучения осуществляется воспроизведение знания.

Учитывая все это, мы можем утверждать, что любой концепт является своего рода аттрактором: допустим, человек, увидев объект коричневого цвета любого оттенка, а человеческий глаз как известно способен различить огромное множество оттенков, моментально идентифицирует его как «коричневый», «светло-коричневый», «темно-коричневый», «шоколадный», «цвета кофе с молоком», перечень идентификационных концептов в принципе достаточно мал по сравнению с тысячами оттенками коричневого, но существующие концепты, как аттракторы, минимизируют/уплотняют полученную детальную информацию, просто относя ее к определенному кластеру, здесь работает методология теории нечетких множеств Лотфи Заде [6].

В этом проявляется крайне сложное взаимодействие функции, формы и содержания, отражающее двойственную природу знания. Концепто-

сфера содержит ограниченное количество имен-концептов, но успешно использует их для описания огромного количества объектов.

7) Теперь поговорим о росте и развитии знания. И онто-, и филогенез применительно к знанию всегда характеризуются ростом знания: исторически социум собирает и сохраняет когнитивные результаты, индивид в процессе своего взросления благодаря обучению, диффузии знания и личному опыту постоянно увеличивает объем своего знания. В индивидуальном росте знания хорошо прослеживается еще одно важное свойство живых систем: ритмичность. Как показывают работы психологов (см. работы Л.С. Выготского, Ж. Пиаже, теорию поэтапного формирования умственных действий П.Я. Гальперина), все индивиды в определенные этапы своей жизни практически по одинаковым алгоритмам в соответствии со своим возрастом приобретают и вырабатывают те или иные знания.

С развитием знания ситуация еще интереснее.

В силу идеальности своего существования в сознании индивида семантическое пространство знания в отличие от физического имеет практически неограниченное количество измерений. Составляющие его мета- и гиперграфы исключительно плотно и очень сложно переплетены между собой, что дает предельную компактность знания и возможность мгновенного перехода от одного гиперребра с его вершинами-концептами к другому гиперребру и вершине-концепту из любого другого мета- или гиперграфа благодаря квантовым свойствам концептов-вершин.

С одной стороны, знание благодаря своей компактности и внутренней пересеченности соединяет в себе стохастические (случайные) и упорядоченные (регулярные) наборы концептов, собранных в мета- и гиперграфы, с другой, оно является сложно структурированной, гетерогенной многослойной, иерархической системой.

С учетом наличия в знании устойчивых регулярных паттернов/гиперребер, играющих роль аттракторов более высокого уровня (типа «коричневый»→«цвет») задачи простого уровня решаются мгновенно, так как в подобных ситуациях воспроизводятся типовые элементы готового знания в виде устойчивой взаимосвязи двух или нескольких концептов в рамках существующих фреймов.

При столкновении с задачами более сложными, готовых структур для решения которых нет в наличии, время решения соответственно увеличивается, интенсифицируются все когнитивные процессы, начинается реконфигурация имеющегося знания и попытка конструирования и продуцирования новых гиперребер и новых концептов. Именно в такие моменты и происходит развитие знания.

В силу своей природы знание использует эволюционные алгоритмы оптимизации и оптимального распределения ресурсов и выбора параметров. Это дает семантическому пространству возможность топологической оптимизации: с одной стороны, постоянно работают механизмы долговременной и кратковременной памяти, помогающие сохранять наличное зна-

ние в активном состоянии; с другой – эффект забывания и вытеснения временно неиспользуемых элементов знания на периферию. Но при этом, при совпадении нескольких условий происходит припоминание и актуализация забытого знания, поскольку семантическая память обладает свойством обратной связи.

Саморегуляция актуального состояния знания – это непрерывный автоматический процесс, происходящий практически неосознанно и лишь иногда осознаваемый индивидом, дающий сбалансированность состоянию знания индивида, задавая его оптимизацию. Особенность саморегуляции знания – способность к интенциональности, благодаря которой для решения задач повышается степень внимания и осознанности и когнитивные ресурсы мобилизуются для решения сложных актуальных задач, но при этом решение ранее заданных задач все равно ищется в неосознанном режиме. Особенность саморегуляции знания индивида – пересмотр элементов нового знания и попытка рефлексии и перепроверки нового знания с точки зрения его качественности.

Знание как состояние, как функция способно изменять концептуальный состав поступающей информации, перерабатывая ее в новые реконфигурированные знания, постоянно находится в состоянии динамичного равновесия, несмотря на постоянное отмирание одних элементов и рождение других, перестраивая свои внутренние структуры и формы в зависимости от новых сложившихся условий внешней среды и соответственно условий и целей задач, стоящих перед индивидом.

Так и происходит развитие знания.

Заключение. Итак, мы показали, что знание по своей природе является живой системой, все признаки живой системы – обмен веществ, саморегуляция, раздражимость, наследственность и изменчивость, единый структурный принцип организации, самовоспроизведение, рост и развитие, ритмичность, целостность и дискретность – ему присущи в полной мере. Именно это и позволяет нам утверждать, что знание является бионическим концептом.

Литература

1. Оселедчик, М.Б. Функциональная теория знания. Гуманитарный вестник, 2022, вып. 4. http://dx.doi.org/.

2. Оселедчик, М.Б. Функциональная теория знания: процессы самосборки и самоорганизации знания // Гуманитарный вестник. – 2022. – Вып. 5. http://dx.doi.org/.

3. Электронный ресурс: https://bstudy.net/625044/estestvoznanie/obschaya_ biologiya#108.- (Дата выхода – 01.02.2023).

4. Электронный ресурс: http://biologyonline.ru/index.php/trudnye-voprosy-ege-po-biologii/2-uncategorised/84-svojstva-zhivogo. – (Дата выхода – 01.02.2023).

5. Baraba´si and Baraba´si, A Genetic Model of the Connectome, Neuron (2019), https://doi.org/10.1016/ j.neuron.2019.10.031.

6. Zadeh, L.A. Fuzzy sets. Information and Control, 1965. – vol. 8. – № 3. – PP. 338-353.

УДК 004.8+519.7

БИОЭВРИСТИКИ И ПАРАЛЛЕЛИЗМ

Ю.А. Скобцов,
ГУАП, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: ya_skobtsov@list.ru

Аннотация. *Представлены основные модели параллельных биоэвристик, такие как эволюционный и муравьиный алгоритмы. Рассматриваются: островная модель, клеточная, иерархическая и гибридная модели, коэволюционная и пул-модели, мультиагентные модели. Также приведены соответствующие среды программирования и физические платформы для реализации этих алгоритмов. Представленные модели анализируются с точки зрения уровня параллелизма, поискового поведения, целей, затрат на связь, масштабируемости и отказоустойчивости. Отмечены достоинства и недостатки вышеперечисленных моделей и области их применения.*
Ключевые слова: *распараллеливание, биоэвристики, генетические алгоритмы, распределенные системы.*

BIOHEURISTICS AND PARALLELISM

Yu.A. Skobtsov,
Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. *The main models of parallel bioheuristics, such as genetic, ant colony algorithms are presented. Given: island model, cellular, hierarchical and hybrid models, coevolutionary, pool models, multi-agent models. Appropriate programming environments and physical platforms for the implementation of these algorithms are also considered. The presented models were analyzed and compared with respect to the level of parallelism, search behavior, goals, communication costs, scalability and fault tolerance. The advantages and disadvantages of the above models and their areas of application are noted.*
Keywords: *parallelization, bioheuristics, genetic algorithms, distributed systems.*

Введение. В последние десятилетия быстро развивается новое направление в теории и практике искусственного интеллекта – биоинспирированные (вдохновленные природой) методы и алгоритмы, которые при поиске решений поставленной задачи используют модели некоторых биологических систем. Такие биоэвристики (БЭ) хорошо показали себя при решении многих сложных задач в реальных приложениях. Однако растущие размерность и сложность проблем, появление «больших данных» ставят перед ними новые задачи. Для нетривиальных задач выполнение одного репродуктивного цикла – поколения в биоэвристиках, как правило, требует значительных вычислительных ресурсов. При этом вычисление зна-

чения фитнесс-функции для каждой особи, оценивающей качество потенциального решения проблемы, обычно является самой трудоемкой операцией.

Для повышения эффективности разработаны параллельные БЭ. Присущие БЭ «внутренний» параллелизм и заложенная в них возможность распределенных вычислений способствовали развитию параллельных биоэвристик, которые в настоящее время получили большое распространение. В данной работе рассматриваются основные модели, которые используются для распараллеливания биоэвристик.

1. Параллельные биоэвристики. Часто подобные эвристики основаны на структуризации популяции особей – потенциальных решений, которые сами по себе уже позволяют улучшить характеристики БЭ. Поскольку основные вычислительные ресурсы в БЭ тратятся на оценку значений фитнесс функции для каждой особи популяции, БЭ достаточно хорошо распараллеливаются. Это касается практически всех популяционных алгоритмов (рис. 1).

Биоэвристики	Генетические алгоритмы, генетическое программирование, эволюционные стратегии, эволюционное программирование, роевые алгоритмы, муравьиные алгоритмы и т.п.
Параллельные модели	Рабочий-хозяин, модель островов, клеточные ЭА, коэволюционные ЭА, иерархические и гибридные модели, пул-модели, мультиагентные модели
Среды программирования	Message Passing Interface (MPI), MapReduce, Java, OpenMP, Hadoop, Remote Method Invocation (RMI), Pthreads, CouchdB
Физические платформы	Кластеры, P2P сети, Графические ускорители (GPUs), Грид сети, облачные технологии

Рис. 1. Параллельные эволюционные алгоритмы.

Далее, используя различные модели для распараллеливания ЭА, можно разработать разные параллельные БЭ. Отметим, что параллельные модели связаны с проблемами адресации, такими как распределение задач и протоколы связи между процессорами. Важнейшим является организация адресного пространства компьютерной системы: является ли оно единым или распределенным на отдельные части, которые рассматриваются независимо друг от друга.

Это создает некоторые проблемы проектирования для целостности данных и для повышения эффективности. Мультикомпьютеры с распределенной памятью являются популярной архитектурой, которая хорошо подходит для большинства параллельных алгоритмов. Поскольку адресные пространства каждого процессора разделены, обмен данными между процессорами должен быть реализован посредством некоторой формы передачи сообщений. К этому классу принадлежат сетевые компьютеры, иногда называемые компьютерными кластерами. Такой вид архитектуры интересен по нескольким причинам. Прежде всего, он имеет низкую стоимость, так как уже существующие локальные сети рабочих станций могут быть использованы только путем добавления коммуникационного программного обеспечения для реализации прохождения сообщений.

Во-вторых, машины в этих сетях, как правило, имеют совместимые процессоры и стандартную программную среду, которые делают разработку программ проще. Недостатки в том, что параллельная производительность вычислений ограничена сравнительно высокой латентностью связи, а также тем, что машины имеют различные рабочие нагрузки в любой момент времени и, возможно, являются гетерогенными. Тем не менее, проблемы, решение которых не требуют частого общения путем передачи сообщений, подходят для этой архитектуры. Более того, некоторые из недостатков могут быть преодолены с помощью сетевых компьютеров в выделенном режиме с высокопроизводительным переключателем связи. Несмотря на то, что это решение является более дорогим, оно может быть экономически эффективным по отношению к специализированным параллельным машинам. Кроме того, веб-технологии могут быть использованы, как для параллельных вычислений, так и как для информационных приложений.

Использование возможностей интернета или некоторых других территориально распределенных компьютерных ресурсов, когда они выглядят как один компьютер для пользователя, называется метакомпьютинг. Эта концепция очень привлекательна (в частности облачные вычисления), но многие проблемы остаются нерешенными. Среда Java, является важным шагом в этом направлении.

Реализация распараллеливания может быть выполнена на различных уровнях: популяции, отдельной особи, уровне оператора или отдельных переменных. Соответственно, могут использоваться различные правила коммуникации по содержанию, частоте и направлению передачи сообщений. В литературе известны следующие модели [1-3]: рабочий-хозяин, модель островов (также известная как coarse graine – крупнозернистая модель) и клеточная модель (также известная как fine graine – мелкозернистая модель). Более того, используются и другие модели, такие как иерархическая (или гибридная модель) [1], пул модель [2], коэволюционная [1, 3] и мультиагентная модели [2]. Многие из этих моделей представлены в работах [5 - 8].

После разработки параллельной биоэвристики различные языки программирования и наборы инструментарий (toolbox) могут быть адаптированы для реализации алгоритма, такие как интерфейс передачи сообщений (MPI), MapReduce и Java. Для этого также существуют программные пакеты, такие как Paladin-DEC и ParadisEO.

Наконец, различные форматы физической платформы, могут быть использованы для параллельных БЭ, включающих в себя кластер, грид-системы, сеть P2P, облачные вычисления, GPU (графический ускоритель) и чисто аппаратная реализация. Эти платформы имеют различную архитектуру, сетевое подключение, ресурсы, схемы управления и операционные системы. Выбор базовой платформы частично влияет на реализацию модели, а также определяет характеристики производительности системы, такие как масштабируемость и отказоустойчивость. Далее рассмотрим основные модели, используемые при распараллеливании ЭА.

2. Классификация моделей параллельных БЭ. Параллельные БЭ решают вычислительные задачи на основе двух типов моделей. Первая модель «распределенная популяция» (на текущий момент основная) распределяет особи популяции (или субпопуляции) на несколько процессоров или вычислительных узлов, в то время как модель «распределение размерностей» разбивает проблему на несколько размерностей (переменных) или подпространств, что показано на рис. 2.

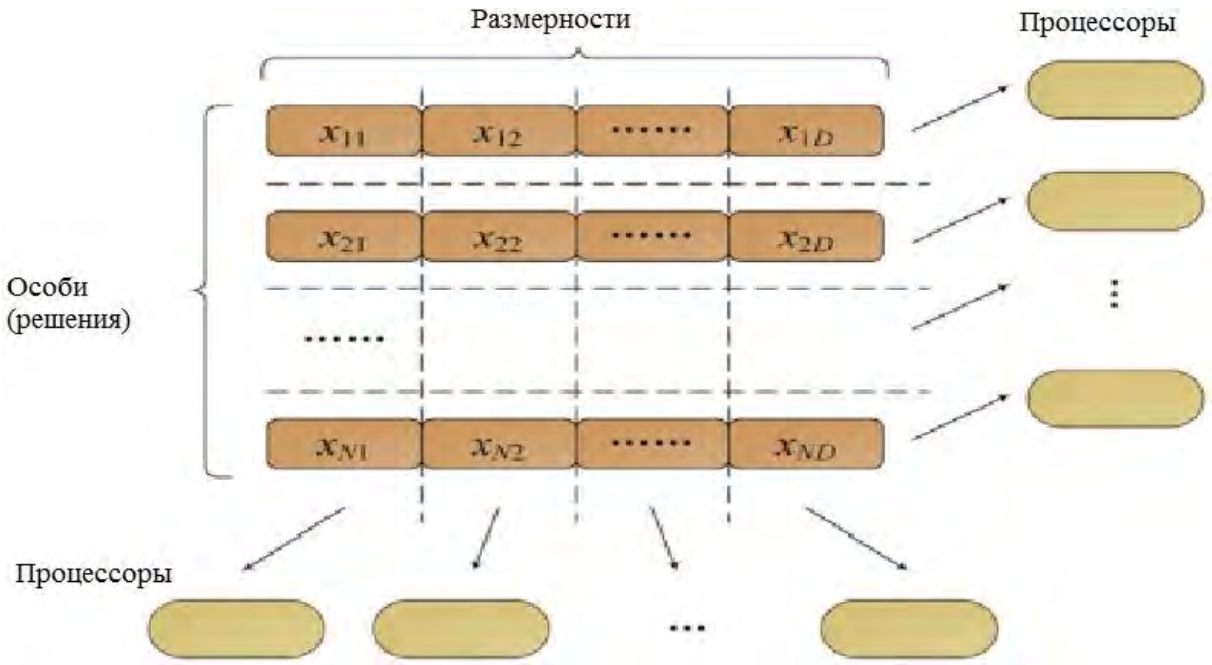


Рис. 2. Разделение: «распределенная популяция» и «распределение измерений».

В первой модели, основанной на «распределенной популяции», базовыми являются глобальные параллельные БЭ (модель «рабочий-хозяин»), распределенные БЭ (модель островов) и клеточные БЭ. Эти модели достаточно подробно описаны в литературе, например, [1 - 8], и графически

представлены на рис. 3. В простой БЭ, графически представленной на рис. 3а, используется одна популяция особей, каждая из которых может взаимодействовать с любой другой особью.

На рис. 3а каждая особь представлена точкой. Глобальная БЭ (модель «рабочий-хозяин») реализуется фактически по схеме «клиент - сервер» (рис. 3б), где на сервере, в основном, выполняется сама биоэвристика (например, генетический алгоритм – ГА), а клиенты выполняют «черновую работу» – оценку значений фитнесс-функции всех особей популяции, которая требует больших вычислительных ресурсов. В распределенной БЭ популяция разбивается на множество подпопуляций, каждая из которых эволюционирует независимо (согласно простому ГА) и обменивается через некоторое «время изоляции» с соседними подпопуляциями по определенной схеме, что графически представлено на рис. 3в. В клеточном ГА имеется множество подпопуляций, каждая из которых состоит только из одной особи. В один момент времени данная особь может взаимодействовать только с соседними особями. Отношение соседства задается в виде некоторой регулярной структуры – сетки, что графически представлено на рис. 3г.

С другой стороны, вторую модель – «распределение размерностей» можно разделить на коэволюционную [1-3] и мультиагентную модели [10].

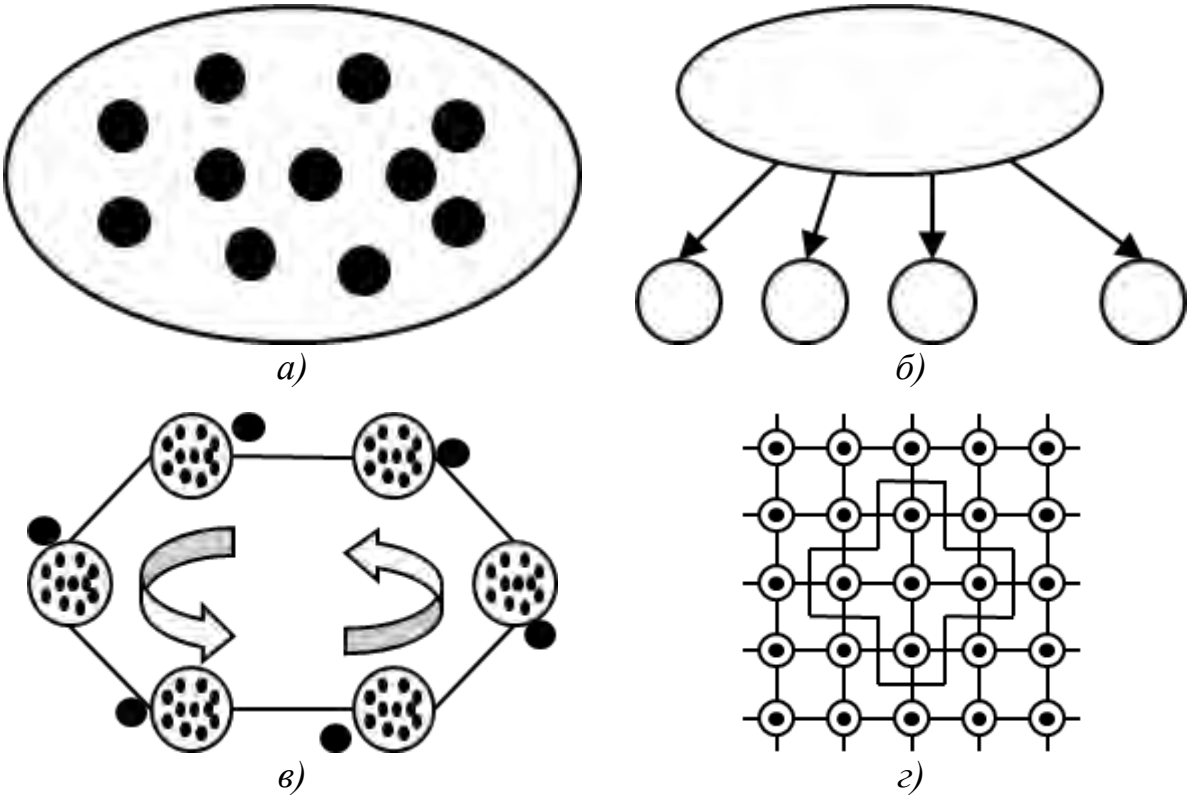


Рис. 3. а) Простой ГА, б) Распределенный ГА,
в) Модель островов, г) Клеточный ГА.

При заданной структуризации БЭ реализуется собственно ее распараллеливание. При этом ожидаются следующие преимущества:

1) поиск альтернативных решений одной и той же проблемы;
2) параллельный поиск из различных точек в пространстве решений;
3) допускают хорошую реализацию в виде островов или клеточной структуры;
4) большая эффективность поиска даже в случае реализации не на параллельных вычислительных структурах;
5) хорошая совместимость с другими эволюционными и классическими процедурами поиска;
6) существенное повышение быстродействия на многопроцессорных системах.

Представленные выше основные методы распараллеливания БЭ могут использоваться в разных комбинациях на различных уровнях, что дает возможность строить гибридные модели.

3. Пул модель. Вышеуказанные модели «ведущий-ведомый», «остров», «клеточная» и «иерархическая» модели обещают хорошую масштабируемость и отказоустойчивость, если решаемая задача может быть соответствующим образом адаптирована к их размеру и особенностям. Тем не менее, этим моделям присуща определенная негибкость и неэффективность, что мешает использованию этих моделей. Например, в модели «рабочий-хозяин» с увеличением количества подчиненных узлов ускорение в конечном итоге может стать плохим, когда мастер насыщается. В островных и клеточных моделях предопределенная и жесткая топология ограничивает возможности подключения количества используемых островов или ячеек и спонтанного сотрудничества между узлами. Хотя модели могут быть асинхронными и гетерогенными, асинхронность и гетерогенность ограничивают эффективность соответствующих РЭА. По сравнению с этим, модель пула развертывает набор автономных процессоров, работающих с общим пулом ресурсов [9]. Здесь процессоры слабо связаны, не знают о существования друг друга и взаимодействуют только с пулом. Модель обеспечивает естественный подход к реализации асинхронности и неоднородности.

Пример. Для лучшего понимания модели пула рассмотрим архитектуру распределенного пула для ПЭА, предложенную Роем и др. [10]. Как показано на рис. 3, пул – общий глобальный массив длины n, представляющий n особей в популяции. Затем массив разбивается на p сегментов размера u, которые соответствуют p процессорам (или потокам). Каждый процессор может читать особи из любых сегментов массива, но может только записывать особи обратно в свой раздел.

В процессе оптимизации процессор случайным образом выбирает u особей из всего пула для проведения эволюционных операций. После создания u потомков c1, c2, . . ., cu, процессор записывает каждое новое отдельное ci обратно в i-ю запись своего собственного раздела, если фитнесс

ci лучше, чем у текущей i-й записи. Таким образом, основные вопросы проектирования такой БЭ включают: 1) внедрение пула ресурсов, 2) различные стратегии отбора (политика потребления в пуле) и 3) различные стратегии замены (политика производства в пуле).

Преимущества. Поскольку процессоры слабо связаны при работе на общем пуле ресурсов, они могут поддерживать асинхронность и неоднородность относительно легко. Кроме того, в модели пула множество участвующих процессоров может быть динамически изменено, и система работает хорошо, даже, когда некоторые из процессоров выходят из строя. Путем репликации (резервного копирования) пула ресурсов, модель может достичь превосходной отказоустойчивости. Еще одно возможное преимущество такой слабосвязанной распределенной модели заключается в том, что она может быть рентабельной. Например, волонтеры со всего мира могут внести свой вклад, выделив время своих компьютеров для обработки задач.

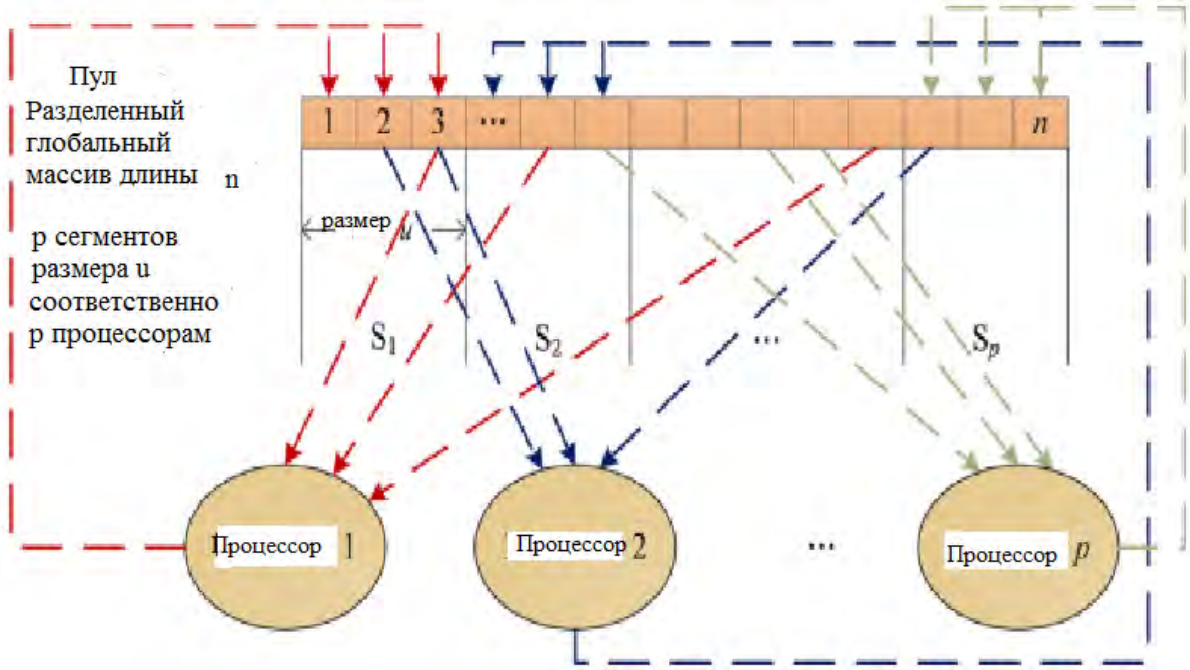


Рис. 4. Пул модель.

4. Пул ресурсов. В распределенной модели на основе пула для БЭ, реализация пула ресурсов является критически важным вопросом для решения. Модель TupleSpace (TS) и модель программирования с общей памятью предоставляют виртуальное хранилище данных с общей памятью, в которую процессоры могут писать и писать. Здесь путем сопоставления с ГА построен распределенный пул на основе пула ГА с естественной балансировкой нагрузки, так что более быстрые процессоры в конечном итоге выполняют больше работы, чем более медленные процессоры. Есть два основных преимущества использования базы данных в качестве пула. Во-первых, объектно-ориентированная система управления базами данных обеспечивает эффективные механизмы блокировки транзакций и данных.

Это позволяет любому количеству эволюционных процессов протекать параллельно в основной популяции без использования дополнительных механизмов контроля. Во-вторых, база данных может постоянно и точно (без изменений) хранить популяцию до тех пор, пока она не будет изменена пользователями. Таким образом, вычисление параллельных БЭ может занимать недели или даже месяцы. В последние годы было разработано много параллельных БЭ на основе модели пулов, которые основаны на соответствии реализаций БЭ с моделями программирования или инструментарием toolkit, таким как MapReduce и CouchDB.

5. Мультиагентная модель. Данная модель является моделью с распределенной размерностью. Но в приведенной выше модели коэволюции глобальная цель всей системы, по существу, является локальной целью каждого подкомпонента, которая достигается согласованием субпопуляций [10]. По сравнению с коэволюцией многоагентная модель не требует прямой координации агентов для достижения глобальной цели. Вместо этого здесь используется теоретико-игровой метод в области распределенного искусственного интеллекта, где агенты оптимизируют локальные функции и устанавливают некоторое равновесие. При достижении равновесия, как только локальные цели не могут быть далее улучшены, глобальная цель всей системы достигнута. Таким образом, глобальная цель реализуется путем наблюдения, а не оценки. Основная идея многоагентной модели состоит в том, чтобы рассматривать параллельную биоэвристику как многоагентную систему, в которой p игроков агентов играют в стратегическую игру. У каждого игрока в игре есть функция выигрыша, которая зависит от действий самого себя и своего ограниченного окружения. При этом каждый игрок играет в игру самостоятельно и выбирает действия для максимизации собственного выигрыша. Широко распространенное решение для этой некооперативной игры является точка равновесия Нэша – такой p-кортеж действий для всех игроков, что любой, кто отклоняется от него, не может улучшить собственный выигрыш. Один из вопросов, который необходимо решить здесь, заключается в том, как преобразовать глобальные оптимальные решения задачи (или точки максимальной цены в игре) в точки равновесия по Нэшу. Не все практические проблемы могут быть решены с помощью параллельной БЭ на основе мультиагентной модели, если только проблема не согласуется с приведенным выше процессом преобразования. Слабосвязанная БЭ разработана на основе мультиагентной модели еще в 1990-х годах в виде слабосвязанного ГА. В этом алгоритме каждый игрок создает подпопуляцию своих действий, а выигрыш рассматривается как оценка значения локальной фитнес-функции. Стандартные генетические операции, включая селекцию, кроссинговер и мутацию, применяются локально в субпопуляции действий. Затем после ряда итераций игроки находят действия, соответствующие равновесию Нэша.

Экспериментальное исследование показало, что такой метод может оптимизировать глобальную цель полностью распределенным способом оценки только для локальных фитнес-функций.

6. Сравнение основных моделей проводится в общем смысле относительно выше представленных моделей сопоставляя их параллелизм, поведение при поиске, цели, затраты на связь, масштабируемость и отказоустойчивость. Сравнительные характеристики различных распределенных моделей приведены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение моделей.

Модель	Уровень параллелизма	Целевая функция	Поведение при поиске	Общая сложность	Масштабируемость	Отказоустойчивость
Рабочий-хозяин	Операция оценки фитнеса	Глобальная	Аналогично последовательному ЭА	От средней до высокой	Средняя	Высокая
Острова	Популяция	Глобальная	Повышает разнообразие	От низкой до средней	Низкая	Средняя
Клеточная	Особь	Глобальная	Повышает разнообразие	Средняя	От средней до высокой	От средней до высокой
Иерархическая	Популяция, особь, операция	Глобальная	Повышает разнообразие	Средняя	От средней до высокой	От средней до высокой
Пул	Популяция, особь, операция	Глобальная	Зависит от компонент алгоритма	Высокая	Высокая	Высокая
Коэволюция	Перемен ная, Блок переменных	Глобальная	Снижение размерности	Низкая	Низкая	Низкая
Мультиагентная	Перемен ная, Блок переменных	Локальная	Снижение размерности	Низкая	Низкая	Низкая

7. Основные параллельные биоэвристики. Биоэвристики используют стохастический механизм при поиске решений. Как правило, используется популяция (множество) потенциальных решений, которое развивается путем применения различных (в зависимости от биоэвристики) стохастических операторов.

При этом используется модель некоторой биологической или социальной системы (например, эволюции для эволюционных эвристик, или колонии муравьев для муравьиных алгоритмов). Вид стохастических операторов поиска также обуславливается этой моделью. Далее рассмотрим применение представленных выше моделей распараллеливания для основных биоэвристик.

7.1. Генетические алгоритмы (ГА) являются очень популярной биоэвристикой [1,3]. В ней используется модель эволюции и три основные генетические операторы: репродукция (отбор родительских решений), скрещивание (обмен фрагментами решений родительских решений) и мутация. Благодаря им популяция (множество потенциальных решений) в процессе искусственной эволюции развивается и находит решение проблемы. Чаще всего потенциальное решение кодируется строкой символов (в двоичном или конечном алфавите) и используется случайная инициализация начальной популяции. При распараллеливании ГА используются практически все представленные выше модели. Для примера в таблице 3 приведены примеры программных систем, где реализованы параллельные ГА и тип используемой модели распараллеливания [4].

Таблица 2. Параллельные ГА.

Название программной системы	Модель распараллеливания
ASPARAGOS	Клеточная
dGA	Модель островов
GENITOR II	Модель островов
ECO-GA	Клеточная
EnGENEer	Рабочий-хозяин
GAME	Объектно ориентированное множество моделей
DGENESIS	Модель островов
GALOPPS	Модель островов
GDGA	Модель островов
ParadisEO	Набор моделей

Как видно из таблицы 2, при распараллеливании ГА чаще используется модель островов, которая позволяет не только повысить быстродействие, но и улучшить качество решения.

7.2. Эволюционные стратегии (ЭС), также как и ГА, относятся к эволюционным биоэвристикам и изначально предназначены для решения задач численной оптимизации. В отличие от ГА здесь нет оператора скрещивания, но применяется более продвинутый оператор мутации и потенциальное решение представляется вектором вещественных чисел. При распараллеливании, как правило, используются клеточные модели и распределенные модели островов.

7.3. Генетическое программирование использует модель эволюции для поиска решения во множестве программ (или формул). При этом потенциальное решение представляется обычно строкой символов в конечном алфавите и разные решения могут иметь различную длину (сложность), что требует динамической структуры данных. При распараллеливании здесь применяются чаще модель островов и клеточные модели. Кроме этого возможно также использование модели «рабочий-хозяин».

7.4. Муравьиные алгоритмы (МА) основаны на простейшей модели социального поведения колонии муравьев при поиске пищи и предназначены, в основном, для решения задач комбинаторной оптимизации, прежде всего, поиска путей на графах.

Особый интерес в поведении муравьиных колоний заключается в том, что относительно простые особи решают достаточно сложные задачи. Примерами такого коллективного поведения являются: 1) поведение при поиске пищи, которое направляет муравьев по кратчайшим путям к источникам пищи; 2) коллективный транспорт пищи, где группа муравьев может переносить частицы пищи, которые тяжелее суммы весов всех членов группы, которые могут транспортироваться индивидуально. При движении муравьи помечают пройденный путь – оставляют на земле химическое вещество (называемое феромоном). Это вещество влияет на выбор, который делают другие муравьи: чем больше количество феромона на конкретном пути, тем больше вероятность того, что муравьи выберут этот путь. МА – это стохастические процедуры построения, которые вероятностно строят решение путем итеративного добавления компонентов решения к частичным с учетом (1) эвристической информации о проблеме и (2) концентрации феромонов, которые изменяются динамически во время поиска решения, чтобы отразить полученный опыт поиска. Муравьиные алгоритмы также хорошо распараллеливаются, но не так много исследований сделано в параллельных муравьиных алгоритмах.

При распараллеливании МА в первых работах использовались модели «рабочий-хозяин», далее получили распространение распределенные модели островов с различной топологией. В последнее время применяются графические ускорители и аппаратная реализация МА на основе FPGA.

Кроме МА применяются и другие роевые алгоритмы, которые также хорошо распараллеливаются. С ними можно ознакомиться, например, в [3].

Заключение. Благодаря своим возможностям параллельные БЭ имеют множество применений в науке и технике. Области, где они продемонстрировали особенно хорошие перспективы – это задачи с ресурсоемкими в вычислительном отношении целевыми функциями и задачами с чрезвычайно сложными ландшафтами целевых функций. Применение параллельных БЭ включает (но не ограничивается): проектирование систем, планирование ресурсов, сетевое планирование, интеллектуальный транспорт, оптимизация классификации, выделение признаков, обучение параметров. По сравнению с последовательными БЭ, с одной стороны улучшают эффективность ЭА, но, с другой стороны, они усиливают способность к глобальному поиску и повышают точность. В этом смысле параллельные БЭ повышают способности решения реальных проблем с высокой размерностью и сложными характеристиками.

Литература

1. Скобцов, Ю.А., Сперанский, Д.В. Эволюционные вычисления. – М: Национальный университет ИНТУИТ, 2-е издание, Лань, 2016. – 326 с.
2. Cong Y.J.,Chen W.N., Zhan Z.H. etc. Distributed evolutionary algorithms and their models: A survey of the state-of-art//Applied Soft Computing, 2015. 34. P. 286–300.
3. Карпенко, А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 446 с.
4. Alba, E. Parallel metaheuristics. New class of algorithms. John Wiley & Sons, Inc., 2005. – 554 p.
5. M. Tomassini, Spatially Structured Evolutionary Algorithms: Artificial Evolution in Space and Time, Springer, 2005.
6. Alba, M. Tomassini, Parallelism and evolutionary algorithms, IEEE Trans. Evol. Comput. 2002.6 (5). P. 443–462.
7. Alba, E., Troya, J.M. A survey of parallel distributed genetic algorithms, Complexity, 1999. – 4 (4). – P.31–52.
8. Umbarkar, A., Joshi, M. Review of parallel genetic algorithm based on computing paradigm and diversity in search space, ICTACT J. Soft Comput, 2013. – 3. – P. 615–622.
9. Merelo-Guervós, A., Mora, J.A., Cruz, A.I. Esparcia-Alcazar, Pool-based distributed evolutionary algorithms using an object database, in: Applications of Evolutionary Computation, Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. – P. 446–455.
10. Roy, G., Lee, H., Welch, J. L., Zhao, Y., Pandey, V., Thurston, D. A distributed pool architecture for genetic algorithms, in: IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), 2009. – P. 1177–1184.
11. Bouvry, P., Arbab, F., Seredynski, F. Distributed evolutionary optimization, in manifold: Rosenbrock’s function case study, Inf. Sci. 122 (2) (2000). – P. 141–159.

УДК 577

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕШЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧ БИОХИМИИ

В.В. Шлыгин,
Институт проблем информатики РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: vvshly@jandex.ru

Аннотация. *Сеть ферментативных реакций, моделирующих биообъект in vivo, должна учитывать проточный характер системы и внутреннюю противоречивость модели, когда операторы являются одновременно и операндами, путем замыкания или обрыва цепочек сетей синтеза ферментов.*
Ключевые слова: *открытая система, ферментативная кинетика, митоз, синергия, самоорганизация.*

MODELING OF SOLVING SOME PROBLEMS OF BIOCHEMISTRY

V.V. Shlygin,
Institute of Computer Science Problems
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Abstract. *The network of enzymatic reactions modeling a biological object in vivo should take into account the open nature of the system and avoid the internal inconsistency of the model – in the model, operators are also operands by closing or breaking chains of enzyme synthesis networks.*
Keywords: *open system, enzymatic kinetics, mitosis, synergy, self-organization.*

Известные метаболические пути биохимических реакций [1-3] описываются системой обыкновенных дифференциальных уравнений типа уравнений Михаэлиса-Ментен ферментативных реакций. Уравнения представляем не в форме Коши, разрешенными относительно производных, а в форме уравнений между субстратом и продуктом каждой из реакций [4]. Производные оказываются функциями, зависящими от кинетических параметров реакций. При равенстве производных нулю уравнения описывают стационарное состояние биосистемы. При значениях производных, отличных от нуля, можно оценить – при каких значениях кинетических параметров реакций концентрации интермедиатов будут стремиться к стационарному состоянию, соответствующему повышению качества состояния организма за счет производства в нем минимума энтропии [6 - 8], а при каких значениях кинетических параметров или их приращений система будет стремиться к состоянию равновесия, соответствующему не живой системе. Также можно оценить – при каких приращениях кинетических параметров система может терять устойчивость, нарабатывая избыточное количество интермедиата и тем самым изменяя направление исходного пути метаболизма, какой был найден в условиях эксперимента in vitro, но может измениться в условиях in vivo. Такие пути находили, в частности, при использовании в экспериментах меченых атомов.

Начальные и текущие значения концентраций задаются произвольно. Затем с помощью метода самосогласованного поля (SCF) или метода последовательных приближений оценивается распределение запаса устойчивости у разных интермедиатов в окрестности стационара, оцениваются места с минимальным запасом устойчивости, на которые необходимо осуществить корректирующие воздействия. Данная процедура осуществляется при варьировании начального произвольного задания концентраций и кинетических параметров и рассматривается инвариантность выбора первоочередных мест корректировки запаса устойчивости от имевшего места варьирования первоначального произвольного выбора концентраций и параметров.

На рис. 1 показаны стадии деления клетки при митозе [1, 5]. Видно, что в них участвуют белки центриолей, тубулин [1], расположенные вне ядра, которые необходимы для разделения и расхождения хромосом к противоположным полюсам при делении клетки. Эти белки не могли быть синтезированы в текущем поколении клеток и привнесены из предыдущих поколений. То же можно сказать о белках рибосом, необходимых в процессе трансляции. Возможно, существует вне ядер клеток самоорганизация сопряжения внеядерных белков и рибосомальной рибонуклеиновой кислоты р-РНК, синтезируемой в ядрах при репликации и транскрипции. Самоорганизация белков, нуклеиновых кислот, ядер может происходить и у митохондрий мужских половых клеток, исчезающих до процесса оплодотворения яйцеклеток и появляющихся в последующих поколениях делящихся клеток.

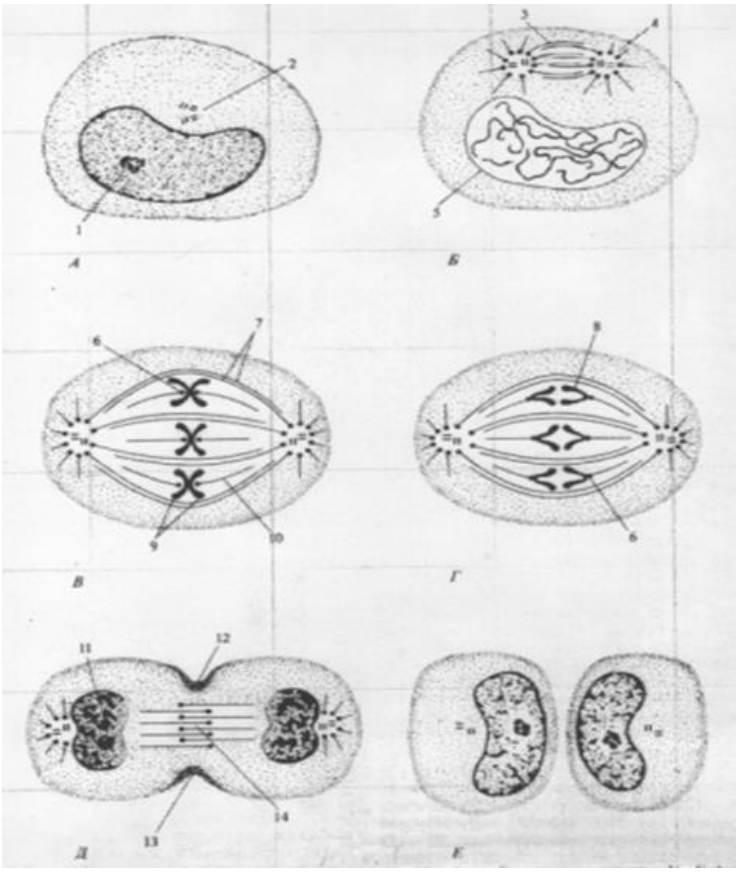


Рис. 1. Стадии митоза.

На рис. 2 показана часть большой схемы метаболических путей [2, 3], по которым происходят ферментативные реакции при митозе, где П – протеин, D – мононуклеотид дезоксирибонуклеиновой кислоты (DHK), R_0 – затравочный мононуклеотид рибонуклеиновой кислоты (РНК); AMP, c-AMP, ADP, ATP, P – соответственно аденозин моно, циклический аденозин моно, аденозин дифосфат, аденозин трифосфат, фосфат; ГП, ЛП, $ФЛ_{кер}$, $ФЛ_{кл}$ – соответственно гликопротеиды, липопротеиды, фосфолипиды ядра и сарколеммы клетки.

Траектории концентраций интермедиатов в окрестности отрезков гиперболических (1) или параболических (2) распределений стационаров были рассчитаны по уравнениям, аналогичным представленным ниже:

$$D_1 = \frac{D(K_1 A - K_1 D_1) - K K_1 \dot{D}_{1t}}{D}; \quad (1)$$

$$R_1 = \frac{R(K_1 A - K_1 R_1) - K K_1 \dot{R}_{1t}}{R}. \quad (2)$$

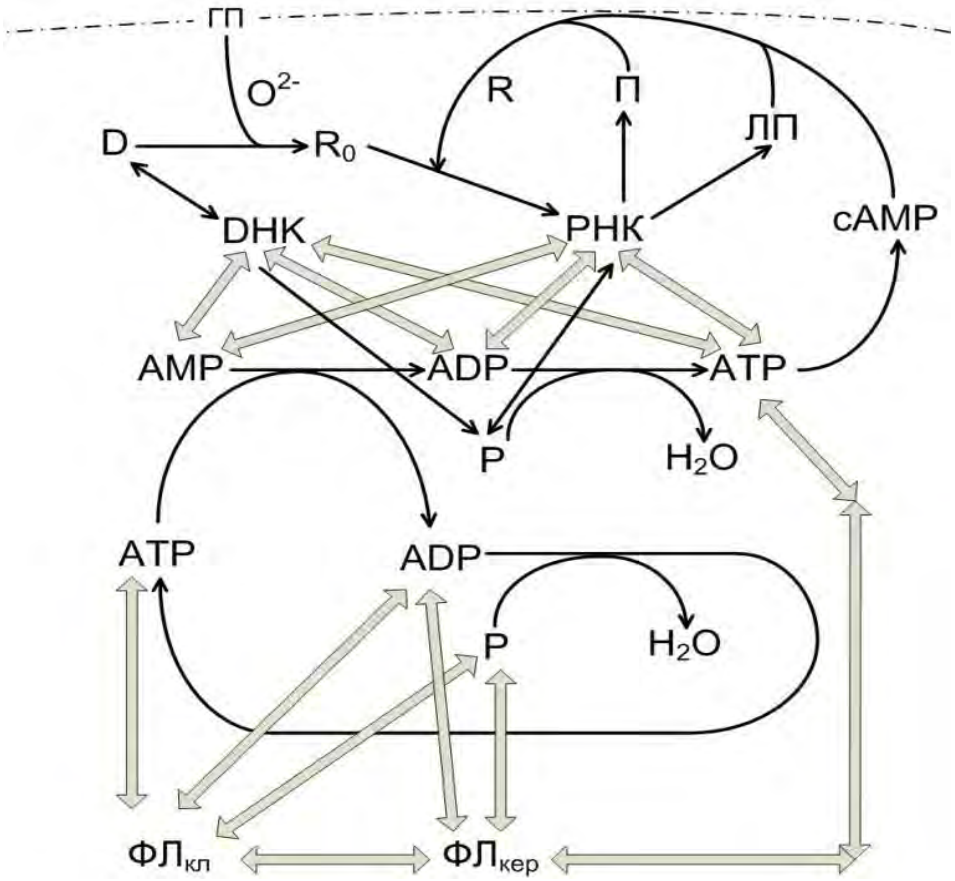


Рис. 2. Схема ферментативных реакций при митозе.

В формулах (1), (2) приняты следующие обозначения: D, D_1 (или R, R_1) – субстрат и продукт цепочек из двух ферментативных реакций с ферментами A, A_1 и константами Михаэлиса K, K_1; продукт (мононуклеотид) R_1 распадается с константой распада k, а субстрат $R_2(t)$ в функции от времени t с константой k_1 поступает в систему; $\dot{D}_{1t}, \dot{R}_{1t}$ – производные по

времени t. Если изобразить часть стационарных распределений интермедиатов из сети метаболизма (рис. 2) с использованием четырех квадрантов системы координат, то можно увидеть, что цепочка из двух последовательных ферментативных реакций имеет стационар в виде двух гипербол, исходящих из начала координат и идущих к двум асимптотам, параллельным осям абсцисс и ординат. Такая цепочка превращается в отрезки параболы при условии самопроизвольного распада продукта реакции или появления у интермедиатов дополнительных путей обмена веществ. Еще можно отметить, что стационарные концентрации могут самопроизвольно изменяться в сторону увеличения или уменьшения в зависимости от величин кинетических параметров у реакций интермедиатов соседних цепочек из-за обратных связей между цепочками.

Таким образом, в сети ферментативных реакций in vivo, в отличие от условий in vitro, неизбежно интермедиаты могут быть на месте ферментов и система в целом в определенных временных масштабах должна быть неустойчива, что соответствует известной в алгебре «аксиоме основания» [9].

Хорошо известно, что при проведении биофизических или биохимических экспериментов in vitro с полосками нервных тканей или полосками миокарда, для поддержания полосок в живом состоянии с сохранением их функции, необходимо имитировать проточные условия в местах расположения полосок.

Также известно, что поддержание процессов размножения микроорганизмов в промышленных масштабах для последующего получения из них физиологически активных препаратов, лекарств, белков требует осуществление непрерывных вибраций реакторов для моделирования вне микроорганизмов условий обмена веществ при их жизнедеятельности. В нашей модели проточный характер моделировался членами уравнений, имитировавшими самопроизвольный распад или появление некоторых интермедиатов.

Литература

1. Хэм, А., Кормак, Д. Гистология. Том 1. – М.: Издательство «Мир», 1982. – 78 с.
2. Мецлер, Д. Биохимия. Том 3. – М.: Издательство «Мир», 1980. – 487 с.
3. Мецлер, Д. Биохимия. Том 1. – М.: Издательство «Мир», 1980. – 222 с.
4. Шлыгин, В.В. Синергия диагностики, терапии, кровотока. – М: Издательский дом «Синергия», 2008. – 123 с.
5. Карлсон, Б. Основы эмбриологии по Петтену. Том1. – М.: Издательство «Мир», 1983. – 20 с.
6. Полторак, О.М. Термодинамика в физической химии. – М.: Издательство «Высшая школа», 1991. – 319 с.
7. Хакен, Г. Синергетика. – М.: Издательство «Мир», 1985. – 419 с.
8. Николис, Г., Пригожин, И. Самоорганизация в неравновесных системах. – М.: Издательство «Мир», 1979. – 512 с.
9. Кон, П. Универсальная алгебра. – М.: Издательство «Мир», 1968. – 351 с.

ПРОТОБИОНИКА

УДК 612.8

ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ БИОПОТЕНЦИАЛОВ ГОЛОВНОГО МОЗГА В ПРОГНОСТИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

Н.А. Рябчикова,
Инновационный центр «Сколково», Московская область,
МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия,
e-mail: nat@guesstest.ru

Аннотация. *Исследование посвящено изучению топографии пространственно-временной синхронизации биоритмов мозга у испытуемых с различной эффективностью прогнозирования методом спектрально-корреляци-онного анализа электроэнцефалографии (ЭЭГ). Особый интерес представляет анализ когерентности ЭЭГ в диапазоне альфа- и тета-частот как наиболее адекватно отражающих процессы ожидания, установки, преднастройки и вероятностного прогнозирования.*
Ключевые слова: *пространственная синхронизация биопотенциалов, прогностическая деятельность, тестирование, когерентность, спектры ритмической активности, электроэнцефалография.*

FEATURES OF BRAIN BIOPOTENTIALS SPATIAL-TEMPORAL SYNCHRONIZATION IN HUMAN PROGNOSTIC ACTIVITY

N.A. Ryabchikova,
Skolkovo Innovation Center, Moscow Region,
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Abstract. *Uncertainty in the brain systems of information processing, arising in the process of probabilistic and prognostic activity, causes the mobilization of energy and functional resources of various systems and subsystems of the body using the mechanism of emotional and orientation reactions. The resulting physiological shifts, being objective indicators of prognostic activity and showing subtle adaptability to current mental processes, affect almost all body systems. Prognostic activity causes a change in the frequency sectors of EEG activity. For example, the strengthening of theta and beta rhythms during the period of intense mental stress in conditions of time deficit.*

The registration of the EEG directly during the probabilistic prediction of signals showed that the anticipation of the signal is associated with the desynchronization of the alpha rhythm (242.W), and the total energy of the EEG signal in the frequency band 2 - 19.2 Hz reflects the degree of subjective expectation of the signal, however, it does not correlate with the reaction time to it (Sh.243).

The analysis of the spatial-temporal synchronization of brain biopotentials reflects the degree of coherence of the functioning of its various structures. In the study of A.G. Vasilyeva, it was shown (43) that there was a significantly higher level of synchronization between the biopotentials of the frontal and occipital regions of the right hemisphere when making a forecast about the appearance of a signal compared with the forecast about its non-appearance (the "guessing game" technique with the probabilities of alternatives 0.3: 0.7 and 0.2: 0.8). At the same time, the very fact of the appearance or absence of a signal does not have a decisive effect on the synchronization level. In other words, the level of synchronization is determined not by the sensory characteristics of the situation, but by the psychological factor of expectation and the nature of the forecast of the situation. When moving to a situation with an equal probability of alternatives (0.5: 0.5), there is an increase in the level of synchronization, which can be explained by an increased level of attention to all possible events due to the maximum uncertainty of the situation.
Keywords: *spatial synchronization of biopotentials, prognostic activity, testing, coherence, rhythmic activity spectra, electroencephalography (EEG)*

Введение. Исследование спектрально-корреляционных характеристик *электроэнцефалографии* (ЭЭГ) в процессе интеллектуальной деятельности существенно расширили возможности анализа интегративных функций мозга и изучения их нейрофизиологических механизмов. Изменения ЭЭГ в процессе интеллектуальной деятельности (например, при решении в уме арифметических задач) отмечаются практически во всех спектрально-корреляционных параметрах. Число областей, вовлеченных в синхронную деятельность, существенно возрастает по сравнению с периодом спокойного бодрствования, причем степень возрастания уровня пространственной синхронизации определенно зависит от трудности выполняемой задачи.

Методы корреляционного и спектрального анализа позволяют выявлять сложные пространственно-временные отношения электрической активности мозга человека, исследовать изменения в зависимости от различных функциональных состояний: в условиях спокойного бодрствования, под влиянием выполнения различных заданий, в ситуации стресса и т.д.

Спектрально-корреляционный анализ ЭЭГ детей с задержкой психичексого развития (ЗПР) и олигофренов в сопоставлении с нормой можно рассматривать как перспективный метод для изучения нейрофизиологических механизмов нарушения интегративной деятельности мозга при этих видах аномалий.

Применение этого метода анализа ЭЭГ дает возможность оценить структурно-функциональную организацию мозга в разных функциональных состояниях по ряду критериев.

Во-первых, представляется существенным исследование спектральных характеристик ЭЭГ различных отделов левого и правого полушарий в

покое для оценки формирования корковой ритмики в сравнении со здоровыми детьми того же возраста, что может дать сведения о степени зрелости ряда мозговых структур. Изучение пространственно-временной организации ЭЭГ покоя имеет особое значение для суждения об уровне оптимальной готовности к действию.

Во-вторых, исследование спектрограмм ЭЭГ передне- и заднеассоциативных областей коры в разных функциональных состояниях может оказаться существенным для анализа нейрофизиологических механизмов нарушения внимания и интеллектуальной деятельности у испытуемых с особенностями.

В-третьих, корреляционный анализ ЭЭГ, характеризующий степень сходства биоэлектрической активности различных областей коры в покое и в процессе деятельности, позволит выявить особенности динамики корреляционных связей ЭЭГ при нарушениях интеллекта.

В-четвертых, на основе исследования спектрально-корреляционных характеристик при множественных отведениях ЭЭГ, записанных в разных функциональных состояниях, возможно выделение ЭЭГ-признаков, позволяющих дифференцировать указанные группы испытуемых, как с нормой, так и между собой.

Неопределенность в мозговых системах переработки информации, возникающая в процессе вероятностно-прогностической деятельности, вызывает мобилизацию энергетических и функциональных ресурсов различных систем и подсистем организма с помощью механизма эмоциональных и ориентировочных реакций. Возникающие при этом физиологические сдвиги, являясь объективными показателями прогностической деятельности и проявляя тонкую адаптированность к текущим психическим процессам, затрагивают практически все системы организма.

Прогностическая деятельность вызывает изменение частотных спектров ЭЭГ-активности. Например, усиление тета- и бета-ритмов в период выполнения интенсивной умственной нагрузки в условиях дефицита времени.

Регистрация ЭЭГ непосредственно в период вероятностного прогнозирования сигналов показала, что предвосхищение сигнала связано с десинхронизацией альфа-ритма (242.Ш), а суммарная энергия ЭЭГ-сигнала в полосе частот 2 – 19,2 Гц отражает степень субъективного ожидания сигнала, однако не коррелирует со временем реакции на него (Ш.243).

Анализ пространственно-временной синхронизации биопотенциалов мозга, отражает степень согласованности функционирования различных его структур. В исследовании А.Г. Васильевой было показано [4, 3] наличие значимо большего уровня синхронизации между биопотенциалами лобной и затылочной областей правого полушария при выдвижении прогноза о появлении сигнала по сравнению с прогнозом о его непоявлении (методика «игры в угадывание» при вероятностях альтернатив 0,3 : 0,7 и 0,2 : 0,8). При этом сам факт появления или отсутствия сигнала не оказывает решающего влияния на уровень синхронизации. Иными словами, уро-

вень синхронизации определяют не сенсорные характеристики ситуации, а психологический фактор ожидания и характер прогноза ситуации. При переходе к ситуации с равной вероятностью альтернатив (0,5 : 0,5) отмечается повышение уровня синхронизации, что можно объяснить повышенным уровнем внимания ко всем возможным событиям вследствие максимальной неопределенности ситуации.

1. Постановка задачи. Генераторы волн. Пространственно-временная организация биоэлектрических процессов мозга и ее динамика тесно связаны с механизмом формирования и распространения ритмической активности мозга, выполняющей функцию объединения различных мозговых структур и их нейронов в различные функциональные системы. Интегративная функция ритмов реализуется за счет скоординированного во времени и пространстве изменения возбудимости многих нейронов, в результате чего создаются условия для их взаимодействия. Многочисленные данные свидетельствуют о том, что волновые генераторы могут выступать как специальный механизм регуляции функциональных состояний. Доказательством этому может быть тот факт, что возбудимость коры меняется не только при сдвиге ее постоянного потенциала, но и во время ритмической активности, которая тем самым осуществляет ритмическую модуляцию возбудимости нервных структур (например, альфа-ритм осуществляет фазовую модуляцию возбуждения анализаторов). Возникновение специфической пространственной синхронизации биотоков мозга было выявлено во время ориентировочного рефлекса, что позволяет рассматривать его как особую функциональную систему.

Использование различных ритмов в качестве интеграционного механизма имеет для организма принципиальное значение, так как различные ритмы имеют разные источники происхождения и функционально не идентичны. Например, тета- и альфа-ритмы имеют разные пейсмейкерные нейроны: для тета-активности это нейроны медиального септума (лимбическая система), а сетевые пейсмейкеры для альфа-ритма связывают с неспецифическим таламусом. Эти ритмы выполняют и разные функции: так, Т.Н. Ониани рассматривает тета-ритм как показатель эмоционально-мотивационного состояния, а альфа-активность – как показатель покоя и активной деятельности по обработке информацию. Имеются данные о гетерогенной природе как альфа-, так и тета-ритма и выделении в их составе нескольких самостоятельных волновых генераторов. Дж. Грей выделяет в тета-ритме животных три частотные волны, связанные с разными этапами целенаправленного поведения. Г.Г. Гасанов, Е.М. Меликов выделяют в составе тета-ритма у животных две частотные зоны: высокочастотный и низкочастотный тета-ритмы, причем первый (влияние энториальной коры) связан с состоянием готовности, а второй (септогиппокампальное влияние) – с эмоционально-мотивационным возбуждением (возбуждением ретикулярной формации и особенно гипоталамуса). О гетерогенности альфа-ритма свидетельствуют исследования японского ученого Х. Сацуки, который выделяет

у человека две частотные зоны альфа-ритма: генерализованный компонент (9,5-10 в с) и локальный (8-9 в с). Некоторые исследователи (Н.Н. Данилова) выделяют в спектральном составе альфа-ритма три самостоятельные зоны: 7,5-9,4; 9,5-11,4; 11,5-13,4 в с. Ею было показано функциональное различие низко- (7-8 в секунду) и среднечастотного (9-10 в секунду) альфа-ритмов. Так, решение интеллектуальных (арифметических) задач у большинства испытуемых связано с более высокочастотным ритмом, тогда как решение зрительных задач, требует более низкочастотного ритма. Таким образом, с одной стороны, существуют отдельные частотные полосы в пределах альфа- и тета-активности, которые имеют различный функциональный смысл и связаны с различными аспектами поведения.

2. Методика. В экспериментах приняли участие 29 студентов МГУ в возрасте 17-21 лет. Каждый испытуемый проходил психологическое тестирование и электрофизиологическое обследование.

Для выявления особенностей прогностической деятельности испытуемых проводилось психологическое тестирование по компьютерному варианту методики предсказания последовательностей элементов «Прогнозис 2.5» (5). Испытуемый прогнозировал порядок двух букв («А» и «Б») в трех регулярных симметричных (АБАБ) и асимметричных (ААБ и БАББА) последовательностях. После окончания последовательного предъявления этих трех наборов испытуемый воспроизводил порядок чередования букв в каждой из них. В соответствии с результатами выполнения прогностической задачи испытуемые были разделены на две группы: группу 1 – с адекватным формированием прогноза (АП), включающую 18 человек, и группу 2 – с трудностями прогнозирования (ТП), включающую 11 человек. Группа испытуемых с адекватным прогнозированием характеризовалась высокой скоростью формирования прогноза, т.е. минимальным количеством ошибок (до 4-х) и правильным воспроизведением порядка чередования букв во всех трех последовательностях. Испытуемые с трудностями прогнозирования характеризовались низкой скоростью выхода на правильный прогноз, что выражалось в гораздо большем количестве допущенных ошибок (в среднем 19 ошибок) и значительных затруднениях при воспроизведении порядка чередования элементов в последовательностях.

В пределах одного эксперимента после психологического тестирования проводили электрофизиологическое исследование. ЭЭГ регистрировали монополярно по международной системе 10-20%, от симметричных областей правого (d) и левого (s) полушарий головного мозга: затылочных (O), теменных (P), центральных (C), лобных (F), передне- (Ta) и задневисочных (Tp) зон на 16-ти канальном электроэнцефалографе фирмы «Medicor» (Венгрия), при полосе пропускания от 0,1 до 30 Гц с постоянной времени 0,3 сек. Референтными служили ушные электроды.

Исследование проводили в следующих ситуациях: 1) в условиях спокойного бодрствования; 2) при предъявлении 15 световых вспышек с нерегулярными интервалами (2 - 3 - 5 с) в условиях: «а» – ненаправленного и

«б» – направленного внимания, когда испытуемого просили сосчитать количество стимулов в серии. Испытуемые при обследовании находились в экранированной, звук заглушенной темной камере.

Вспышки предъявлялись в темноте на расстоянии 30 см от закрытых глаз испытуемого автоматически с помощью компьютера IBM PC AT-286. Также автоматически осуществлялось управление (в соответствии с созданными схемами стимуляции) световым стимулятором и дисплеем, оцифровывание аналоговых сигналов (частота опроса 125 Гц), а также накапливание данных для дальнейшей обработки. Для вспышек использовался фотостимулятор типа FTS 21 «Medicor» (Венгрия) с импульсной разрядной трубкой А, встроенной в излучающую головку, расположенную на уровне глаз испытуемого. Интенсивность световых сигналов (энергия свечения) составляла 0,7 Втс.

Эпоха анализа – 3000 мс при регистрации 30-ти секундных отрезков фоновой ЭЭГ, 2700 мс при регистрации вызванного потенциала (ВП) на световые стимулы (300 мс – предстимульный интервал). Нулевая линия устанавливалась на отрезке от 0 до 3000 мс до начала усреднения автоматически системой CONANm-1.5 (2). Устранение технических помех и наводок мышечных потенциалов осуществлялось также автоматически с помощью этой же программы [2].

В программе CONANm-1.5 осуществлялось вычисление спектров когерентности (КОГ), характеризующих степень статистической связанности электрических процессов в разных точках больших полушарий. Спектры КОГ вычислялись для усредненных по 3 реализациям записей в ситуации ненаправленного и направленного внимания, а также для записи фоновой активности. В усредненной записи вырезался предстимульный интервал 300 мс и первые 100 мс после стимула.

Для анализа КОГ устанавливались парные межполушарные отношения между отведениями: Fs-Fd; Cs-Cd; Ps-Pd; Ts-Td; Os-Od; а также внутриполушарные: Os-Ps; Od-Pd; Os-Cs; Od-Cd. Разрешающая способность по частоте составляла 0,39 Гц при соответствующей длительности реализации 2600 мс. Сравнение спектров КОГ осуществлялось по средним уровням КОГ, определяемым как средние значения спектральных компонент в соответствующем диапазоне частот: theta1- 4–6 Hz; theta2 - 6-8 Hz; alpha1 - 8-10 Hz; alpha2 - 10-12 Hz; alpha3 - 12-14 Hz. На основе показателей средних уровней КОГ для каждой пары отведений вычислялись внутригрупповые значения среднего уровня КОГ по всем отведениям в theta и alpha диапазонах.

Стандартная статистическая обработка осуществлялась с помощью статистического пакета «STADIA» [3]. Использован непараметрический тест Вилкоксона и Ван-дер-Вардена.

3. Результаты. Использованные нами методы корреляционного и спектрального анализа позволяют выявить сложные пространственно-временные отношения электрической активности мозга человека, их изменения в зависимости от различных функциональных состояний: в условиях спокойного бодрствования, непривлеченного и привлеченного внимания у групп испытуемых с адекватным и затрудненным прогнозированием.

Полученные нами данные показали следующее.

1) Имеются некоторые межгрупповые различия по уровню синхронизации биопотенциалов, выраженных в виде среднего значения когерентности по всем отведениям в диапазоне тета - и альфа-частот (глобальный показатель пространственной синхронизации корковых биопотенциалов).

2) Представленные в таблице 1 усредненные данные, отражают средний уровень активности ритмики в тета - и альфа 2-диапазонах.

Так, в ситуации спокойного бодрствования мы не выявили существенных различий у лиц с адекватным прогнозированием и с трудностями прогнозирования по выраженности синхронизации ритмов тета-диапазона. В диапазоне альфа-ритма у хорошо прогнозирующих испытуемых (АП) средние значения уровня когерентности были равны или несколько превышали таковые у лиц с трудностями прогнозирования (ТП) (таблица № 1). Эти различия были более выражены у конкретных испытуемых с адекватным прогнозированием (К.Т.) и с трудностями прогнозирования (А.М.): в том же диапазоне частот тета- и альфа 2-ритмов отмечаются достоверные различия (0,85 – у А.М. (ТП) и 0,82 – К.Т.(АП) в тета-диапазоне; 0,83 – у А.М. и 0,84 – у К.Т. в альфа 2-диапазоне).

В условиях ненаправленного внимания (иррелевантное стимулирование), по сравнению с ЭЭГ спокойного бодрствования у испытуемых обеих групп наблюдалось незначительное и одинаковое снижение уровня когерентности (с 0,87 до 0,85) в диапазоне тета-ритмики. При этом наиболее выразительные отличия по уровню когерентности ЭЭГ наблюдаются в группе испытуемых с адекватным прогнозированием в области альфа-диапазона (0,90), по сравнению с испытуемыми с трудностями прогнозирования (0,83) (рис. 1).

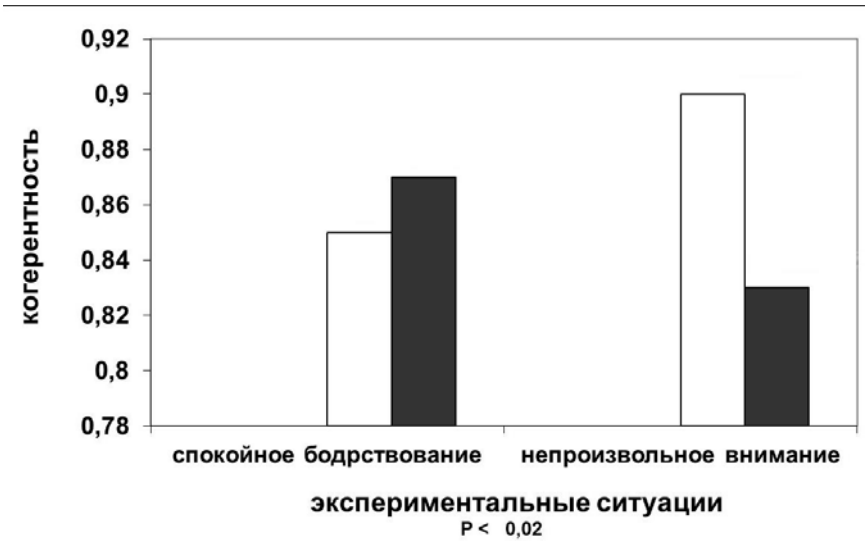


Рис. 1. Средние значения когерентности по всем отведениям в альфа2-диапазоне, зарегистрированные в условиях спокойного бодрствования и ненаправленного внимания у испытуемых разных групп. Белые столбики – испытуемые с адекватным прогнозированием, темные столбики – испытуемые с трудностями прогнозирования.

Таблица 1. Средние значения когерентности по всем отведениям в диапазоне тета - и альфа-частот в ситуациях спокойного бодрствования, ненаправленного и направленного внимания у испытуемых разных групп.

Экспериментальные ситуации	Частотные диапазоны	Группы испытуемых		К.Т. (испытуемый с адекватным прогнозированием)	А.М. (испытуемый с трудностями прогнозирования)
		с адекватным прогнозированием	с трудностями прогнозирования		
Спокойное бодрствование	θ	0.87 ± 0.03	0.87 ± 0.02	0.82 ± 0.01	0.85 ± 0.01
	α1	0.86 ± 0.02	0.84 ± 0.02	0.86 ± 0.005	0.87 ± 0.01
	α2	0.85 ± 0.02	0.87 ± 0.02	0.84 ± 0.003	0.83 ± 0.004
	α3	0.82 ± 0.03	0.80 ± 0.02	0.84 ± 0.004	0.81 ± 0.005
	α	0.84 ± 0.02	0.83 ± 0.03	0.85 ± 0.01	0.84 ± 0.03
Ненаправленное внимание	θ	0.85 ± 0.02	0.85 ± 0.02	0.82 ± 0.01	0.87 ± 0.01
	α1	0.86 ± 0.03	0.87 ± 0.03	0.91 ± 0.005	0.87 ± 0.004
	α2	0.90 ± 0.02	0.83 ± 0.02	0.91 ± 0.01	0.86 ± 0.01
	α3	0.85 ± 0.03	0.80 ± 0.02	0.87 ± 0.01	0.78 ± 0.01
	α	0.87 ± 0.02	0.83 ± 0.03	0.90 ± 0.02	0.84 ± 0.04
Направленное внимание	θ	0.85 ± 0.02	0.85 ±0.03	0.77 ± 0.005	0.90 ± 0.01
	α1	0.89 ± 0.02	0.83 ± 0.02	0.91 ± 0.01	0.80 ± 0.01
	α2	0.86 ± 0.03	0.86 ± 0.03	0.89 ± 0.004	0.84 ± 0.01
	α3	0.83 ± 0.03	0.83 ± 0.01	0.84 ± 0.01	0.88 ± 0.01
	α	0.86 ± 0.03	0.84 ± 0.01	0.88 ± 0.03	0.84 ± 0.03

В ситуации направленного внимании (релевантное стимулирование), по сравнению с ситуацией ненаправленного внимания сохраняется прежнее значение уровня когерентности тета-диапазона (0,85) для обеих групп испытуемых. В то же время уровень когерентности ритма альфа-диапазона у лиц с АП преобладает над таковым в диапазоне тета-ритма (0,86 – альфа- и 0,85 – тета-ритм). У лиц с ТП по этим же показателям когерентность снижается (0,85 – тета- и 0,84 – альфа-ритм), оставаясь выше в диапазоне тета-ритмики. При этом в альфа-диапазоне испытуемые с адекватным прогнозированием имеют более высокий уровень когерентности ЭЭГ по сравнению с таковым у лиц с ТП (АП – 0,86; ТП – 0,84), (таблица 1).

Если рассмотреть средние значения когерентности ЭЭГ у тех же испытуемых из группы с АП - К.Т. и из группы с ТП - А.М., то разница уровня когерентности в тета- и альфа2-диапазонах еще более выражена: в ЭЭГ при иррелевантном (А) и релевантном (Б) стимулировании активность медленных ритмов тета-диапазона у А.М. выше (0,87 – в ситуации А и 0,9 – в ситуации Б), чем у К.Т. (0,82 – А и 0,77 – Б). Для альфа 2-диапазона мы видим обратные соотношения (таблица 1): у адекватно прогнозирующего испытуемого - К.Т. уровень когерентности ЭЭГ (0,91 – в ситуации А и 0,89 – в ситуации Б) превышает таковой у А.М. (0,86 – в ситуации А и 0,84 – в ситуации Б).

Следует отметить, что общая картина сравнения усредненных показателей уровня когерентности ЭЭГ в ситуациях ненаправленного и направленного внимания выявила лишь незначительные различия у испытуемых с адекватным прогнозированием и с трудностями прогнозирования. При обсуждении полученных результатов мы исходили из концепции, что спектрально-корреляционные характеристики ЭЭГ в состоянии покоя и во время интеллектуальной деятельности определяются уровнем организации мозга, степенью развития активационных и тормозных механизмов и межструктурных связей, а также характером формирования функциональных связей (1,4). Эти показатели, как видно из литературы [7], различны у групп испытуемых с различными интеллектуальными возможностями и коррелируют также с эффективностью процесса вероятностного прогнозирования [7, 5].

Некоторое снижение усредненных значений спектральной когерентности ЭЭГ в области альфа-диапазона при переходе от ситуации спокойного бодрствования к ситуации ненаправленного внимания (А) у лиц с ТП (таблица 1) и, напротив, увеличение значения этих показателей у испытуемых с АП (особенно в области альфа2-диапазона) можно рассматривать как использование ЦНС различных опорных ритмов в качестве интеграционного механизма. Это имеет принципиальное значение, так как известно, что различные ритмы функционально не идентичны. Имеются данные о гетерогенной природе, как альфа-, так и тета-ритма и выделении в их составе нескольких самостоятельных волновых генераторов, ведущих себя по-разному в ситуациях направленного и ненаправленного внимания [1, 4].

При переходе к ситуации направленного внимания (ситуация Б) средние значения уровня спектральной когерентности не показали существенных изменений. При этом изменение уровня спектральной когерентности у конкретных испытуемых разных групп в отличие от суммарных данных имело достаточно выраженный характер. Так, отчетливо наблюдается преобладание альфа- и уменьшение тета- активности при переходе от ЭЭГ покоя и к состоянию направленного внимания у испытуемого первой группы (АП) К.Т. по сравнению с ЭЭГ покоя испытуемого второй группы (ТП) А.М. Этот факт свидетельствует о наличии у испытуемого К.Т. максимальной волновой активности альфа2-ритма, осуществляющего, как отмечает Н.Н. Данилова [1], ритмическую модуляцию возбудимости нервных структур и, по данным Т.Н. Ониани (цит. по 1), может быть связано с деятельностью по обработке поступающей информации. Наличие доминирующей активности тета-диапазона у испытуемого А.М. свидетельствует, вероятно, о большей активации структур, ответственных за генез тета-ритма у лиц с трудностями прогнозирования.

Недостаточность системной организации мозга, наблюдаемая у лиц с трудностями прогнозирования, может свидетельствовать о слабости функционирования таламо-корковых ритмогенных систем, ответственных за процессы селективного внимания. При этом недостаточность механизмов генерализованной и локальной активации у этой группы испытуемых обу-

словлены, вероятно, слабостью функциональных взаимоотношений лобных отделов и лимбико-ретикулярного комплекса [5]. Наши данные согласуются с данными Шоу [8], которым было показано, что частотные спектры у лиц с психическими расстройствами характеризовались увеличением мощности в области тета- и уменьшением в области альфа-ритма по сравнению с показателями нормы.

Заключение. 1) Усредненные показатели когерентности суммарных отведений ЭЭГ не выявили достоверных различий у испытуемых с различной эффективностью прогнозирования в частотном тета-диапазоне. В альфа-диапазоне значения когерентности были выше у лиц с адекватным прогнозированием при иррелевантном стимулировании.

2) Анализ полученных данных свидетельствует об использовании в качестве интеграционного механизма разными группами испытуемых различных ритмов в пределах альфа- и тета-активности, которые имеют различный функциональный смысл, разные источники происхождения и связаны с различным уровнем эффективности вероятностного прогнозирования.

Литература

1. Данилова, Н.Н. Психофизиологическая диагностика функциональных состояний. – М.: изд-во МГУ, 1992. – С.78-106.

2. Кулаичев, А.П. Интегрированная система для контроля процессов и анализа сигналов Conanm-1.5. Руководство пользователя. – М.: Информатика и компьютеры, 1993. – 59 с.

3. Кулаичев, А.П. Методы и средства анализа данных в среде Windows: Stadia 6.0. – М.: Информатика и компьютеры, 1996. – 257 с.

4. Новикова, Л.А., Фарбер, Д.А. Функциональное созревание коры и подкорковых структур мозга в различные возрастные периоды по данным электрофизиологических исследований // Возраст. Физиология. Д.А. Л., 1975. – С. 26.

5. Переслени, Л.И., Подобед, В.Л., Чупров, Л.Ф. Исследование особенностей прогностической деятельности. – Абакан, 1990. – С. 10.

6. Симонов, П.В. Эмоциональный мозг. – М., 1981. – 215 с.

7. Fienberg, J.M. Wahrscheinlichkeitsprognostizierung im System der zielgerichteten Aktivitat. AFRA-Verlag, 2000 (Serie “Reflexe Padagogischer Studien”). – P. 34-41.

8. Shaw, J.C., Roth, M. Potential distribution analysis. II. A theoretical consideration of its significance in terms of electrical field theory. – EEG and Clin. Neurophysiol, 1955. – vol. 7. – P. 285-292.

9. Искусственный интеллект в соотношении с когнитивными функциями головного мозга человека. 1, 2 Рябчикова Н.А., 1Сычев С.М. , 1 Базиян.Б.Х. 1Иновационный центр Сколково, 2МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, u https://doi.org/10.29003/m2910.sudak.ns2022-18/290-291 2022

10. Probabilistic Prognosis in Human Cognitive Functions on Problematic Situations, R, BAZIYAN Boris, Damyanovich Elena, Chigaleichik Larisa, aAllergy, asthma, copd, immunophysiology & immunorehabilitology: innovative technologies, № ISBN 978-88-85813-64-9, ,©Filodiritto Editore – Proceedings, pp. 267-275 Work code: D629C0019 2019

11. 2018 Significance of human cognitive functions in clinical medicine Ryabchikova N.A. XII World Congress on COPD, Asthma, & Respiratory Allergy, Dubai, UAE., 2-5 February, 2018

12. Significance of human cognitive functions in clinical medicine Ryabchikova N.A. International journal on immuorehabilitation,, S. ISSN 1562-3629, Meditsina-Zdorov'e Publishers Moscow, V 20.

13. Correlation between human cognitive function and circulation processes, Moskalenko Yu E., Ryabchikova N.A. XI World asthma, allergy and cord forum, Barselona, Spain, 21-25 April 2018.

14. Saccadic Eye Movements During a Prognosis Activity in Patients with Early Stages of Parkinson's Disease BAZIYAN Boris, BEZ Larisa, Chigaleichik Larisa, Damyanovich Elena, Ryabchikova Natalia, X World Congress on Asthma, Allergy and COPD (New York, USA, 2017 April 2), X World Congress on Asthma, Allergy and COPD (New York, USA, 2017 April 2), *Allergy, asthma, copd, immunophysiology & norehabilitology: innovative technologies,filodiritto international proceedings*, V. 1, № B428C0046, p. 307-312, 2017.

УДК 612.76+007

ЗАДАЧА ФАКТОРИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЙ ПАЛЬЦЕВ КИСТИ РУКИ

М.Н. Серова, Ю.В. Строганов,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия,
e-mail: serovamn@student.bmstu.ru, stroganovyv@bmstu.ru

Аннотация. *В работе рассматривается проблема управления протезами и тренажерами руки человека. Цель работы состоит в постановке задачи факторизации движений пальцев кисти руки человека для решения проблемы описания движения конечности. Особенностью исследования является выделение задачи факторизации движений на основе положений конечности и классификация базовых движений пальцев кисти руки с учетом участвующих в них мышц.*
Ключевые слова: *протезирование, классификация движений руки, факторизация движений, пальцы кисти руки, преобразование сигналов в движения.*

PROBLEM OF FACTORIZATION OF FINGERS MOVEMENT

M.N. Serova, Yu.V. Stroganov,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract. *The problem of upper limb prosthetics is discussed. The mechanism of movement execution under brain control is described. Problem of biological signals extraction for hand movements control is outlined. Reversed problem of fingers movement description is presented. Special attention is given to the first step of reversed problem – factorization of fingers movement. Classification of base fingers movements is proposed.*
Keywords: *prosthetics, hand movements classification, movements factorization, fingers, transformation of signals into movements.*

На сегодняшний день большое количество людей нуждается в протезировании и реабилитации верхней конечности или ее части в силу врожденных дефектов, ампутаций, травм позвоночника, инсультов и других заболеваний. На 2020 год из 617621 больных, состоящих на учете

протезно-ортопедических предприятий, 9031 инвалид (1,5%) имеет дефект верхней конечности, врожденный или приобретенный в результате ампутации [1]. В связи с этим актуальной является задача разработки функционального протеза, способного заменить человеку утраченную конечность [2], и методов реабилитации для восстановления функциональности руки [3, 4].

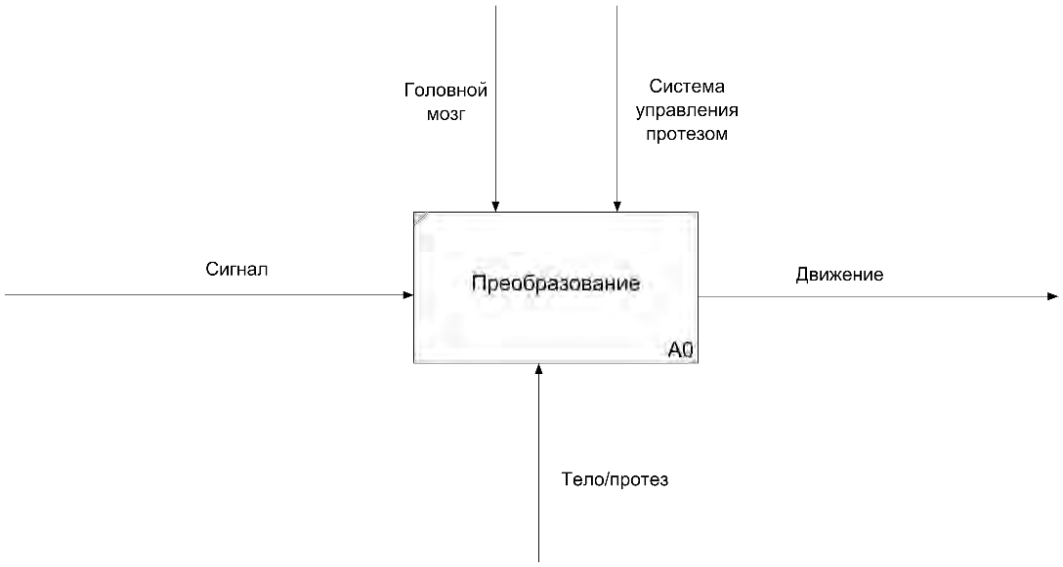


Рис. 1. Описание движения руки.

Для этого предварительно необходимо понять, как человек осуществляет движение. В общем случае движение можно представить в виде результата некоторого преобразования исходного сигнала (рис 1).

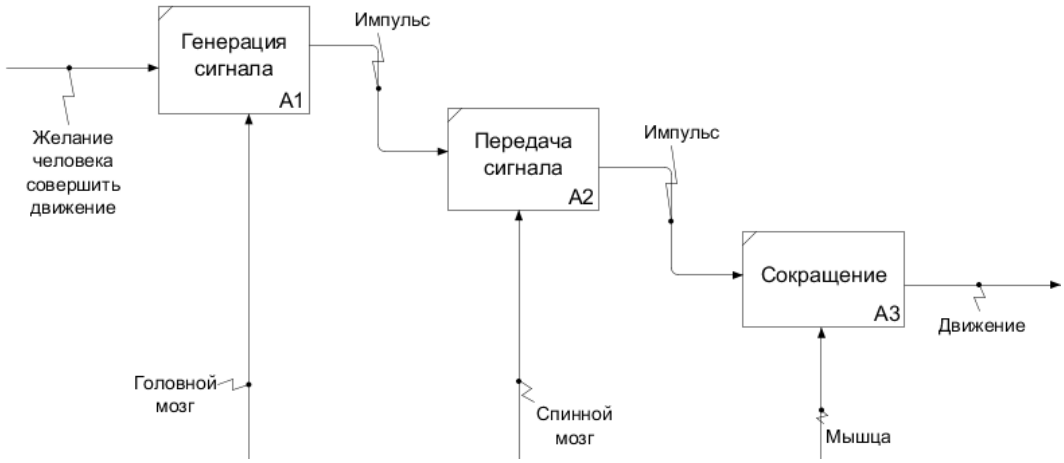


Рис. 2. Движение верхней конечности.

Сигналы для осуществления человеком произвольного движения проходят так называемый корково-мышечный путь (рис. 2) [5, 6]. Предварительно вырабатывается план и программа действий в двигательном анализаторе коры головного мозга, генерируются сигналы в средней части прецентральной извилины, затем полученный набор сигналов по спинному мозгу передается периферическим двигательным

нейронам, которые иннервируют мышечные волокна, вызывая сокращение мышцы, приводящее к движению. Важно понимать, что одно движение происходит в результате отправки множества импульсов к разным мышцам, отвечающим за него, т.е. в результате отправления большого количества сигналов рука изменяет свое положение.

Исходя из этого, сигнал для управления протезом или тренажером может быть получен из головного мозга (например, с помощью ЭЭГ [2, 7]), спинного мозга или непосредственно от мышцы (с помощью электромиографии [2, 8] или механомиографии). Проблемой использования перечисленных на рис. 3 источников в качестве управляющих сигналов является сложность распознавания импульсов, касающихся отдельных движений, в связи с тем, что через один и тот же нерв проходит множество импульсов. Поэтому возникает необходимость фильтрации от шумов и выделения искомого сигнала. Методы выделения сигналов выходят за рамки данной статьи и не рассматриваются далее.

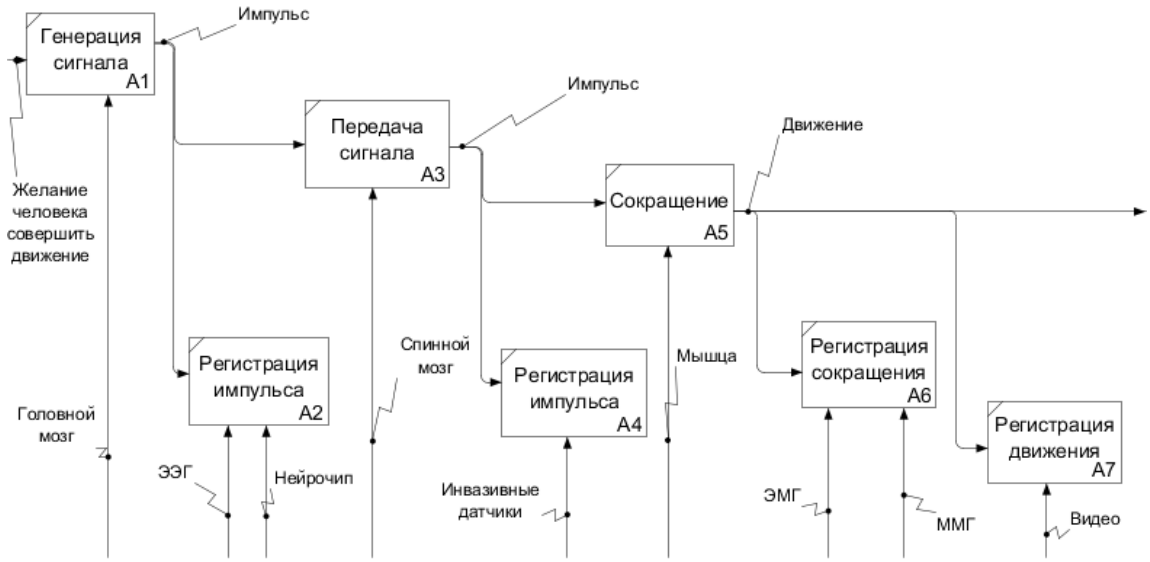


Рис. 3. Движение верхней конечности.

Для решения проблемы описания движения пальцев кисти руки человека рассматривают обратную задачу. Движение можно представить в виде изменения положения из начального в конечное, где положение руки описывается на основе используемой модели. В таком случае обратная задача сводится к тому, чтобы на основе заданных начального и конечного положений конечности получить сигналы, необходимые для осуществления этого движения (рис. 4).

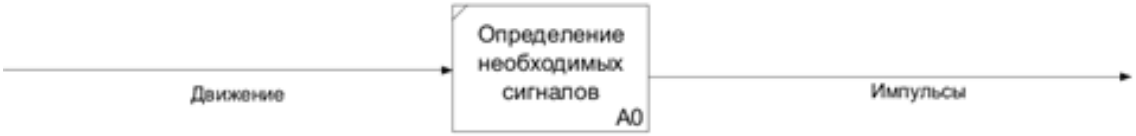


Рис. 4. Обратная задача.

В отдельных работах обратная задача представлена инверсной динамикой (рис. 5) [9], в которой мышечные сокращения вычисляются на основе заранее известного движения и влияющих на систему внешних сил. Поскольку движение может быть совершено бесконечным количеством способов в силу избыточного для его выполнения количества мышц, при решении задачи инверсной динамики необходимо проводить оптимизацию решения.

Для решения обратной задачи необходимо понять, какие движения способна выполнять рука человека. Движения происходят в суставах и имеют ряд биологических ограничений, накладываемых строением самих суставов и связками. На основе этого можно выделить набор «базовых движений», в виде комбинации которых можно представить любое сложное движение кисти руки. При этом важно понимать корреляцию между базовыми движениями и иннервируемыми мышцами, в результате сокращения которых это движение совершается. Классификация движений пальцев кисти руки на основе осуществляющих их суставов с указанием участвующих в них мышц представлена ниже [10, 11].

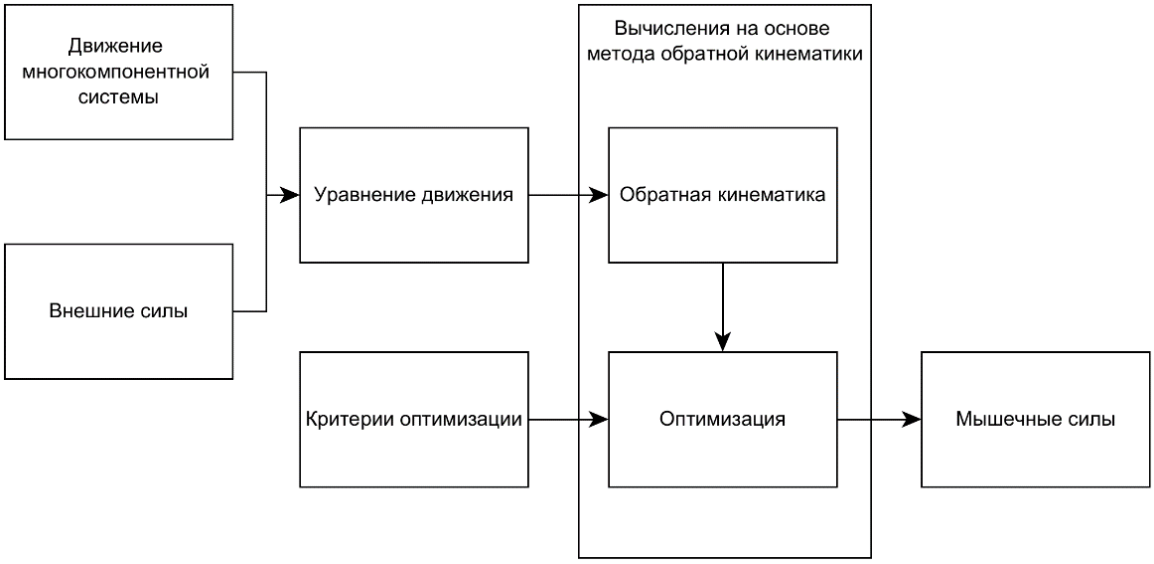


Рис. 5. Инверсная динамика.

1. Запястно-пястные суставы.

1) Противопоставление:

а) большой палец – мышца, противопоставляющая большой палец, глубокий сгибатель пальцев, длинный сгибатель пальцев, короткий сгибатель большого пальца, приводящая мышца большого пальца, длинный сгибатель большого пальца;

б) мизинец – мышца, противопоставляющая мизинец.

2) Разгибание:

а) большой палец – разгибатель пальцев, длинный разгибатель большого пальца, короткий разгибатель большого пальца;

б) мизинец – разгибатель пальцев, разгибатель мизинца.

3) Отведение большого пальца – длинная мышца, отводящая большой палец, короткий разгибатель большого пальца, длинный разгибатель большого пальца, короткая мышца, отводящая большой палец.

4) Приведение большого пальца – мышца, приводящая большой палец, короткий разгибатель большого пальца, глубокий сгибатель.

2. Пястно-фаланговые суставы.

1) Сгибание:

а) большой палец – глубокий сгибатель пальцев, длинный сгибатель пальцев, короткий сгибатель большого пальца, приводящая мышца большого пальца, длинный сгибатель большого пальца;

б) указательный палец – глубокий сгибатель пальцев, длинный сгибатель пальцев, поверхностный сгибатель пальцев, ладонные межкостные мышцы, тыльные межкостные мышцы, червеобразные мышцы;

в) средний палец – глубокий сгибатель пальцев, длинный сгибатель пальцев, поверхностный сгибатель пальцев, тыльные межкостные мышцы, червеобразные мышцы;

г) безымянный палец – глубокий сгибатель пальцев, длинный сгибатель пальцев, поверхностный сгибатель пальцев, ладонные межкостные мышцы, тыльные межкостные мышцы, червеобразные мышцы;

д) мизинец – глубокий сгибатель пальцев, длинный сгибатель пальцев, поверхностный сгибатель пальцев, ладонные межкостные мышцы, тыльные межкостные мышцы, червеобразные мышцы, мышца, противопоставляющая мизинец, мышца, отводящая мизинец, короткий сгибатель мизинца.

2) Разгибание:

а) большой палец – разгибатель пальцев, длинный разгибатель большого пальца, короткий разгибатель большого пальца;

б) указательный палец – разгибатель пальцев, разгибатель указательного пальца;

в) средний палец – разгибатель пальцев;

г) безымянный палец – разгибатель пальцев;

д) мизинец – разгибатель пальцев, разгибатель мизинца.

3) Отведение:

а) большой палец – длинная мышца, отводящая большой палец, короткий разгибатель большого пальца, длинный разгибатель большого пальца, короткая мышца, отводящая большой палец;

б) указательный палец – тыльные межкостные мышцы;

в) средний палец – тыльные межкостные мышцы;

г) безымянный палец – тыльные межкостные мышцы;

д) мизинец – мышца, отводящая мизинец.

4) Приведение:

а) большой палец – мышца, приводящая большой палец, короткий разгибатель большого пальца, глубокий сгибатель;

б) указательный палец – глубокий сгибатель, ладонные межкостные мышцы;

в) средний палец – глубокий сгибатель;

г) безымянный палец – глубокий сгибатель, ладонные межкостные мышцы;

д) мизинец – глубокий сгибатель, ладонные межкостные мышцы, короткий сгибатель мизинца.

3. Проксимальные межфаланговые суставы.

1) Сгибание:

а) большой палец – глубокий сгибатель пальцев, длинный сгибатель большого пальца;

б) указательный палец – поверхностный сгибатель пальцев, глубокий сгибатель пальцев;

в) средний палец – поверхностный сгибатель пальцев, глубокий сгибатель пальцев;

г) безымянный палец – поверхностный сгибатель пальцев, глубокий сгибатель пальцев;

д) мизинец – поверхностный сгибатель пальцев, глубокий сгибатель пальцев.

2) Разгибание:

а) большой палец – длинный разгибатель большого пальца, разгибатель пальцев;

б) указательный палец – ладонные межкостные мышцы, червеобразные мышцы, разгибатель указательного пальца, тыльные межкостные мышцы, разгибатель пальцев;

в) средний палец – червеобразные мышцы, тыльные межкостные мышцы, разгибатель пальцев;

г) безымянный палец – ладонные межкостные мышцы, червеобразные мышцы, тыльные межкостные мышцы, разгибатель пальцев;

д) мизинец – ладонные межкостные мышцы, червеобразные мышцы, разгибатель мизинца, тыльные межкостные мышцы, разгибатель пальцев.

4. Дистальные межфаланговые суставы.

1) Сгибание:

а) большой палец – глубокий сгибатель пальцев, длинный сгибатель большого пальца;

б) указательный палец – глубокий сгибатель пальцев;

в) средний палец – глубокий сгибатель пальцев;

г) безымянный палец – глубокий сгибатель пальцев;

д) мизинец – глубокий сгибатель пальцев.

2) Разгибание:

а) большой палец – длинный разгибатель большого пальца, разгибатель пальцев;

б) указательный палец – ладонные межкостные мышцы, червеобразные мышцы, разгибатель указательного пальца, тыльные межкостные мышцы, разгибатель пальцев;

в) средний палец – червеобразные мышцы, тыльные межкостные мышцы, разгибатель пальцев;

г) безымянный палец – ладонные межкостные мышцы, червеобразные мышцы, тыльные межкостные мышцы, разгибатель пальцев;

д) мизинец – ладонные межкостные мышцы, червеобразные мышцы, разгибатель мизинца, тыльные межкостные мышцы, общий разгибатель пальцев.

Помимо определения набора движений выделение импульсов, требуемых для выполнения движения пальцами кисти руки, сопряжено с необходимостью выбора модели для описания рассматриваемой части конечности. Среди представленных в литературе моделей можно выделить кинематические, кинетические и биомеханические. В кинематических моделях фаланги пальцев описываются как невесомые стержни фиксированной длины, связанные идеальными шарнирами, а представление ладони варьируется в зависимости от решаемой задачи, например, в одних случаях ладонь рассматривается в виде шестиугольника [12], в других лучезапястный сустав моделируется в виде шарнира, который соединен с запястно-пястными суставами пальцев невесомыми стержнями [9]. Кинетические модели дополняют кинематические учетом действующих на систему внешних сил, трехмерных размеров и масс элементов кисти руки [9]. Биомеханические опираются на кинематические или кинетические, дополняя их учетом мышечных сокращений и сопротивлением сухожилий. Существенным недостатком методов описания движений пальцев кисти руки является рассмотрение только движений сгибания, разгибания, приведения и отведения пальцев, то есть игнорирование движений противопоставления большого пальца, мизинца и контрапозиции.

Предлагается разбить обратную задачу описания движения пальцев кисти руки человека на несколько шагов: разложение сложного движения на «базовые» составляющие на основе заданных начального и конечного положений, времени выполнения действия с учетом выбранной модели кисти руки; определение участвующих в каждом из базовых движений мышц, времени и силы их сокращения; преобразование полученных данных о сокращениях мышц в искомые сигналы. При этом рассматриваются только активные движения (т.е. те, которые совершаются человеком произвольно, без воздействия внешних факторов). Схема предлагаемых шагов решения представлена на рис. 6.

Предложенный подход к решению задачи описания движения пальцев кисти может быть использован для управления протезами и для реабилитации, в том числе с использованием технологий виртуальной реальности. Факторизация движений пальцев руки верхней конечности позволит определить необходимые базовые движения для перемещения пальцев кисти руки из начального положения в конечное за заданное время.

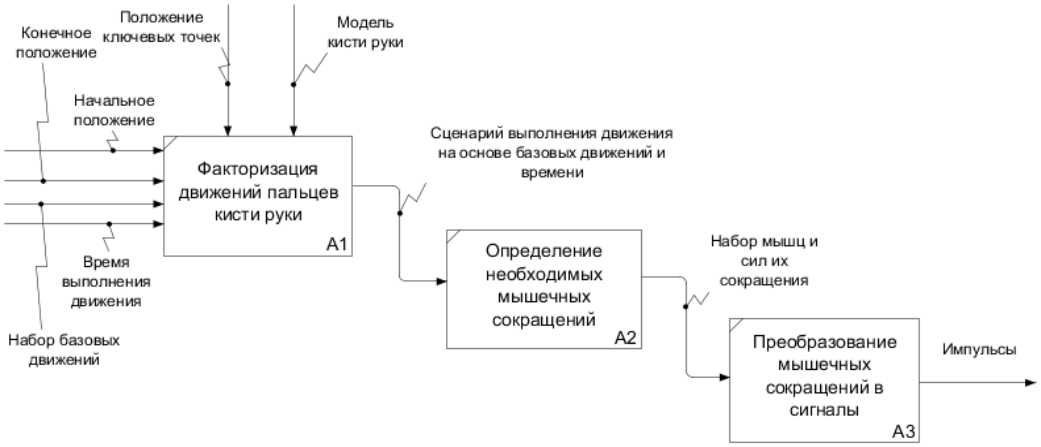


Рис. 6. Декомпозиция обратной задачи.

Литература

1. Щербина, К.К., Сусляев, В.Г., Замилацкий, Ю.И. [и др.] Перспективы использования цифровых технологий при импортозамещении в протезной отрасли на основе анализа обеспечения протезами инвалидов с дефектами верхних конечностей // Физическая и реабилитационная медицина. – 2020. – Т. 2, № 3. – С. 65–76.

2. Уразбахтина, Ю.О., Камалова, К.Р., Морозова, Е.С. Бионические протезы верхних конечностей: сравнительный анализ и перспективы использования // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – №1 (115), часть 2. – С. 125–130.

3. Платонов, А.К. [и др.] Методы биомехатроники тренажера руки человека // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. – 2012. – № 82. – 40 с.

4. Колсанов, А.В., Чаплыгин, С.С., Ровнов, С.В., Иващенко, А.В. Моделирование мелкой моторики рук в приложениях виртуальной реальности для нейрореабилитации // Научно-технический вестник Поволжья. – 2020. – №11. – С. 95–98.

5. Андреев, В.В., Баранцевич, Е.Р., Кодзаев, Ю.К. Основы неврологического обследования пациентов врачом общей практики: методические рекомендации для клинических ординаторов и врачей общей практики // СПб.: РИЦ ПСПбГМУ, 2016. – 51 с.

6. Ермолаева, А.И., Баранова, Г.А. Двигательная сфера, чувствительность и их расстройства // Пенза, 2015. – 48 с.

7. Pranali, Kokate, Sidharth, Pancholi, Amit, M., Joshi Classification of Upper Arm Movements from EEG Signals Using Machine Learning with Ica Analysis [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/353344097_Classification_of_Upper_Arm_Movements_from_EEG_signals_using_Machine_Learning_with_ICA_Analysis (Дата обращения: 20.11.2022)

8. Longbin Zhang, Wen Qi, Yingbai Hu, Yue Chen Disturbance-Observer-Based Fuzzy Control for a Robot Manipulator Using an EMG-Driven Neuromusculoskeletal Model // Complexity. – 2020. – Т. 2020. – 10 с.

9. Engelhardt L. From Inverse Dynamics Hand Modelling to Distal Radius Fracture Healing Simulation. Dissertation. [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа: http://dx.doi.org/10.18725/OPARU39518. (Дата обращения: 04.12.2022)

10. Мышцы верхней конечности / [сост. Е.С. Блоцкая, И.Г. Роменко, Е.А. Рассохина,]; Брест. гос. ун-т имени А.С. Пушкина, каф. анатомии и физиологии человека и животных. // Брест: Изд-во БрГУ им.А.С. Пушкина», 2010. – 80 с.

11. Капанджи, А.И. Верхняя конечность. Физиология суставов: схемы биомеханики человека с комментариями: [перевод с английского] – Москва: Эксмо. – 2020. – 376 с.

12. Платонов, А.К., Фролов, А.А., Бирюкова, Е.В. [и др.] Методы биомехатро-ники тренажера руки человека // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. – 2012. – № 82. – 40 с.

ЭКОБИОНИКА

УДК 611+612+631.3

ОСНОВЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА В БИОНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ЗЕМЛЕДЕЛЬЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ И МЕХАНИКЕ ГРУНТОВ

Л.Ф. Бабицкий, В.Ю. Москалевич,
КФУ им. В.И. Вернадского, г. Симферополь, Россия,
e-mail: kaf-meh@rambler.ru, v_moskalevich@mail.ru

Аннотация. *Обосновано использование энергетического подхода при бионическом обосновании рабочих органов почвообрабатывающих машин и движителей лунохода. Цель работы состоит в оптимизации взаимосвязи силы и формы рабочих поверхностей, взаимодействующих с почвой и грунтом. Особенностью исследования является рассмотрение контактной задачи взаимодействия со средой роющих конечностей животных и насекомых-землероев как биологических прототипов рабочих органов.*
Ключевые слова: *энергетический подход, бионическая система, контактная задача, логарифмическая кривая, роющие конечности, сила сопротивления почвы, форма рабочей поверхности, работоспособность.*

BASICS OF ENERGY APPROACH IN BIONIC SYSTEM OF AGRICULTURAL MECHANICS AND SOIL MECHANICS

L.F. Babitsky, V.Yu. Moskalevich,
V.I. Vernadsky Crimean Federal University,
Simferopol, Russian Federation

Abstract. *The use of the energy approach in the bionic justification of the working bodies of tillage machines and motioners of the lunar rover is justified. The purpose of the work is to optimize the relationship between the force and the shape of the working surfaces interacting with the soil and soil. In general, the energy of the biological prototype in the energy field of the biological system in agriculture accumulates the energy of the soil, plant and atmosphere. A feature of the study is the consideration of the contact problem of interaction with the environment of burrowing limbs of animals and insect earthmovers as biological prototypes of working organs. Optimization of the relationship between the force and the shape of the active working element can be considered in setting the contact problem of deformable media, since the interaction occurs by contacting the working element with the material. The principal feature of the studied forms of burrowing limbs of biological prototypes is their multi-contact when interacting with the soil. The dependencies obtained as a result of bionic studies of burrowing limbs of animals and insects are used in the proposed method of increasing durability of soil-*

cutting parts. The proposed energy approach in the bionic system of agricultural mechanics and soil mechanics makes it possible to create optimal forms of working bodies of tillage machines with improved reliability indicators according to the criterion of the minimum energy intensity of the technological process of soil cultivation, as well as to substantiate the forms of propulsion wheels for movement on earth soils and lunar surface.
Keywords: *energy approach, bionic system, contact problem, logarithmic curve, burrowing limbs, soil resistance force, working surface shape, working capacity.*

Введение. Познание законов живой природы способствует дальнейшему развитию нового бионического направления в земледельческой механике и механике грунтов. Бионическое направление в земледельческой механике основано не на простом копировании и моделировании биологических объектов, являющихся прототипами рабочих органов сельскохозяйственных машин, а, в первую очередь, на математическом описании закономерностей функционирования биологических объектов-прототипов и использовании этих закономерностей в технологических процессах и рабочих органах сельскохозяйственных машин. Основное внимание при этом уделяется уменьшению затрат энергии и металлоемкости и созданию малоэнергоемких рабочих органов. Следуя теории относительности, по формуле А. Эйнштейна энергия определяется выражением [1]

$$E = m_n c^2, \tag{1}$$

где m_n – масса покоя; c – скорость света.

Формула (1) применима для искусственных объектов. Однако для объектов живой природы, кроме энергии покоя, присутствует еще живая энергия. В биологических живых организмах есть живая масса $m_ж$, а следовательно, имеется потенциальная энергия, входящая в полную энергию в виде

$$E_{пж} = m_n c^2 + m_ж g h, \tag{2}$$

где g – ускорение свободного падения; h – высота центра масс.

В период жизнедеятельности живого организма происходит трансформация потенциальной энергии в кинетическую, то есть справедлива формула

$$m_ж g h = \frac{m_ж v^2}{2}, \tag{3}$$

где v – скорость протекания процессов в живом организме.

После преобразований, учитывая что $m_ж g = \mathrm{P}_{жк}$, а $m_ж a_ж = \mathrm{P}_{жк}$ [2], получим

$$\mathrm{P}_{жп} h = \frac{\mathrm{P}_{жк} l}{2}. \tag{4}$$

Отсюда следует, что основными параметрами жизнедеятельности живых организмов являются живая сила и пространственная линейная характеристика длительности периода преобразования потенциальной энергии в кинетическую. Поэтому, при бионическом обосновании целесообразно использовать энергетический подход.

Постановка задачи. В общем случае, энергия биологического прототипа в энергетическом поле биологической системы в сельском хозяйстве аккумулирует энергию почвы, растения и атмосферы (рис. 1).

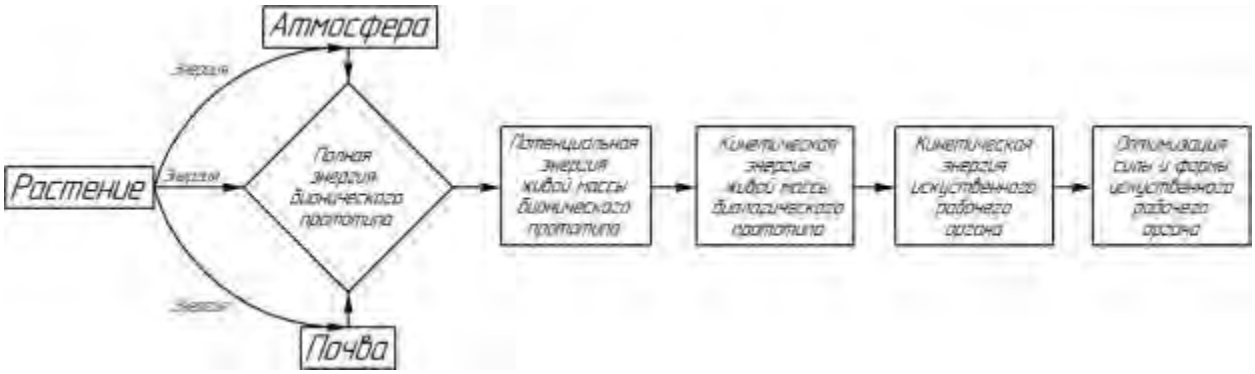


Рис. 1. Энергетическое поле бионической системы.

С использованием принципов и методов бионики в таком энергетическом поле можно определять оптимальные параметры малоэнергоемких рабочих органов для обработки почвы и грунта.

Основной материал исследований. Оптимизацию взаимосвязи силы и формы действующего рабочего органа можно рассматривать в постановке контактной задачи деформируемых сред, так как взаимодействие происходит путем контактирования рабочего органа со средой. Основные параметры исходят из закономерности распределения действующей силы P, в зависимости от формы рабочего органа [3], определяемые уравнением контактной задачи в виде

$$P(t)x + \beta P(t) \int_{-d}^{d} \ln \frac{1}{|t - x|} dt = \beta f(x). \qquad (5)$$

Здесь $P(t)$ – неизвестная функция внутри интервала $-d < x < d$; $f(x)$ – форма контактируемой поверхности внутри интервала $-d < x < d$;

$$\beta = \frac{\nu G}{f_{\text{Т}}},$$

где ν – деформационный показатель контактируемой среды; G – модуль сдвига среды; $f_{\text{Т}}$ – коэффициент трения; d – полуширина участка контакта.

Решение уравнения (5) при равномерном распределении усилия по участку контакта имеет вид логарифмической кривой

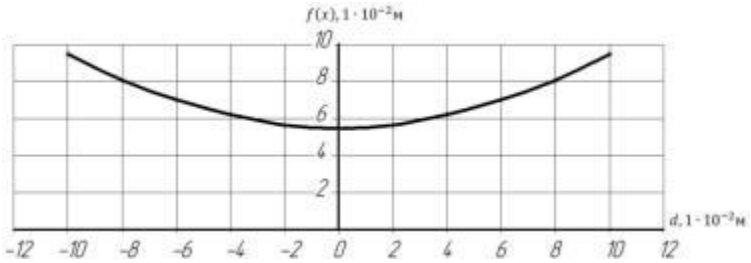
$$f(x) = \nu P_{\text{кр}} \left\{ (x+d)[\ln|x+d|+1] - (x-d)[\ln|x-d|-1] + \frac{|x| f_{\text{Т}}}{\nu G} \right\}, \quad (6)$$

где $P_{\text{кр}}$ – сила критического давления контактируемой поверхности рабочего органа на обрабатываемую среду.

Уравнение (6) при равномерном распределении усилия определяет форму контактируемой поверхности в зависимости от распределения действующих сил и свойств среды. Это уравнение позволяет определять форму малоэнергоемких катков почвообрабатывающих орудий и колес движителей лунохода (рис. 2, а) с учетом деформационного показателя ν, модулей боковой деформации E и сдвига G, коэффициентов бокового расширения μ и трения $f_{\text{Т}}$ лунного грунта.

Так, для наиболее характерного состояния лунного грунта [4], при котором модуль деформации E находится в пределах 1,5–13,5 Н/см^2, модуль сдвига G = 0,6–5,0 Н/см^2, деформационный показатель ν = 0,2–0,4 см^2/Н, коэффициент бокового расширения μ и трения $f_{\text{Т}}$ соответственно 0,2 и 0,21, на основании уравнения (6), получим логарифмическую кривую поперечного профиля грунтозацепов и обода колеса диаметром 0,51 м и шириной обода 2d равного 0,2 м, представленную графической зависимостью (рис. 2, б).

а)



б)

Рис. 2. Колеса лунохода с грунтозацепами: а) общий вид обода колеса с грунтозацепами лунохода; б) форма поперечного сечения обода колеса и грунтозацепов в виде логарифмической кривой.

Высота грунтозацепов определяется по формуле [5]

$$h = \frac{\pi P \nu}{2}, \quad (7)$$

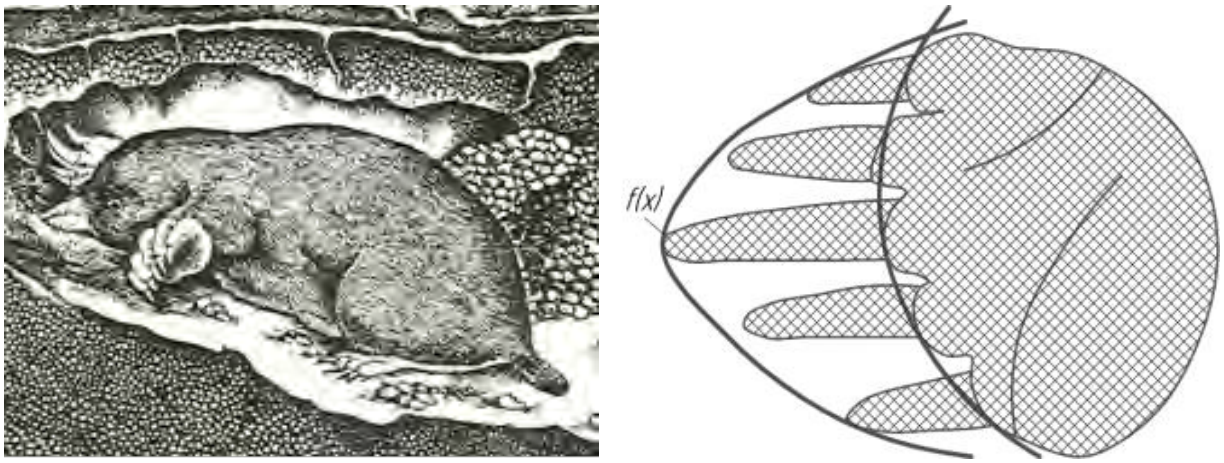
где P – давление грунтозацепа на лунный грунт.

При вышеуказанных параметрах состояния лунного грунта и габаритных размерах колес лунохода, на основании уравнения (7), получим

высоту грунтозацепов, равную $3{,}18 \cdot 10^{-2}$м. Обоснованные параметры колес лунохода являются оптимальными для перемещения движителей лунохода по лунной поверхности.

Целесообразность использования уравнения (6) в земледельческой механике и механике грунтов подтверждает исследование форм роющих конечностей животных и насекомых-землероев.

Рукоподобные лапы крота (рис. 3, а) имеют ладони, обращенные постоянно наружу, а не внутрь, как у других животных [6]. Между пятью короткими пальцами с широкими, сильно сплющенными и тупо обрезанными когтями самый длинный – средний, соседние с ним пальцы постепенно укорачиваются и почти соединены один с другим перепонкой. Расположение концов когтей описывается логарифмической кривой *f(x)* вида (6), которая симметрична относительно среднего пальца (рис. 3, б).



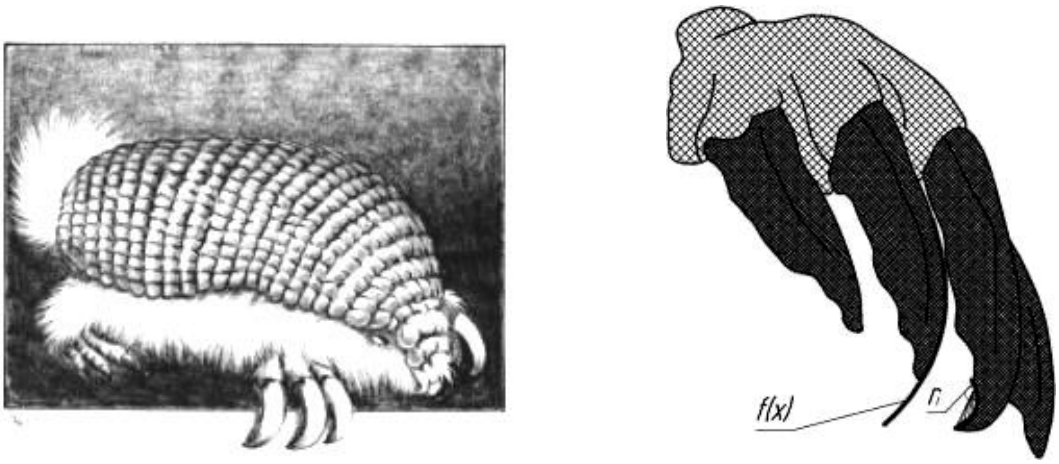
а) *б)*

Рис. 3. Роющие конечности крота.

Характерной особенностью движения крота в почве является то, что в процессе рытья передние конечности работают симметрично. Это позволяет уравновесить силы реакции почвы, действующие на крота слева и справа. Кроме того, внедряя когти в почву перед собой, а затем перемещая ее назад, крот использует наименее энергоемкую деформацию отрыва, минимизируя тем самым затраты энергии при рытье.

Такими же роющими способностями обладают, например, розовые броненосцы, которые могут быстро продвигаться сквозь песок, разгребая все на своем пути [7]. По внешнему виду это очень напоминает плавание, поэтому в Аргентине розового броненосца называют «песчаным пловцом». Этому способствуют чрезвычайно длинные (по сравнению с размерами животного) когти передних лап (рис. 4, а).

В процессе разрыхления почвы наиболее задействованы три средних длинных когтя. Характерной их особенностью является зубчатая форма с выступами и впадинами тыльной поверхности, оказывающей основное давление на почву при рытье.



а) *б)*

Рис. 4. Когти розового броненосца.

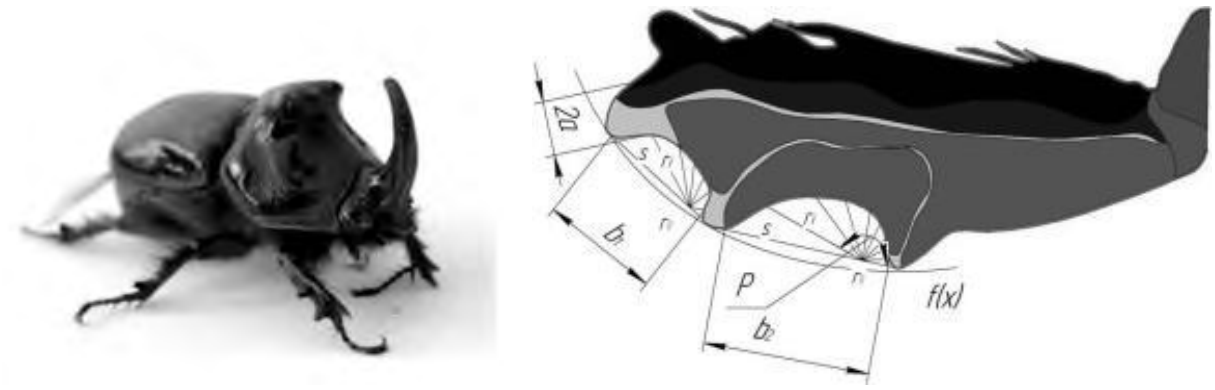
Роющие конечности зубчатой формы имеются и у насекомых-землероев. Характерными их представителями являются медведка и жук-носорог [8]. Функции рытья у них выполняют передние ноги. Изучение процесса рытья почвы этими насекомыми с помощью киносъемки показал, что он состоит из трех фаз: внедрение зубцов в почву, ее разрыхление и перемещение. Подобные фазы взаимодействия с почвой наблюдаются при работе почвообрабатывающих орудий.

Передние роющие ноги медведки, хорошо приспособленные к копанию и передвижению в почве, имеют по четыре выступающих зубца (рис. 5).

а) *б)*

Рис. 5. Роющие конечности медведки.

Жук-носорог имеет толстые копающие передние ноги с тремя крупными зубцами (рис. 6).



а) *б)*

Рис. 6. Роющие конечности жука-носорога.

Следует отметить, что как и у крота, расположение вершин зубцов на роющих конечностях медведки и жука-носорога описывается логарифмической кривой (6).

Принципиальной особенностью изученных форм роющих конечностей биологических прототипов является их многоконтактность при взаимодействии с почвой.

При аналитическом описании процесса взаимодействия рабочего органа с почвой необходимо получить общие закономерности по определению формы и параметров многоконтактных рабочих органов, подтвердить и уточнить, с учетом масштабного фактора параметры, найденные при бионических исследованиях.

Уменьшение общей силы сопротивления почвы и грунта прерывистому режущему лезвию, по сравнению со сплошным, объясняется тем, что под действием каждого выступа происходит деформация почвы и создаются концентрации напряжений, достигающие величины предела прочности обрабатываемого материала [9].

Если обработка почвы проводится рабочим органом с зубчатым режущим лезвием длиной L с количеством выступов Z шириной $2a$ и шагом S, то, выразив длину зубчатого режущего лезвия через основные геометрические параметры выступов, получим выражение для определения их количества в виде

$$Z = \frac{L + S - 2a}{S}. \tag{8}$$

Обозначив отношение полуширины выступа к шагу $a/S=K$, из уравнения (8) найдем величину S:

$$S = \frac{L}{Z - (1 - 2K)}. \tag{9}$$

При полном подрезании почвы зубчатым лезвием создаваемая им сила резания определяется выражением

$$P = P_B Z., \tag{10}$$

здесь P_B – сила, создаваемая одним выступом, равная

$$P_B = \pi a P_{KP}, \tag{11}$$

где $P_{\text{КР}}$ – сила критического давления на почву.

С учетом приведенных выше параметров зубчатого лезвия, выражение для общей силы его взаимодействия с почвой имеет вид

$$P = \pi P_{\text{КР}} LK\left[1+\frac{1-2K}{Z-(1-2K)}\right]. \tag{12}$$

Решения уравнения (12) при различных значениях коэффициента K, полученные в виде графиков зависимости создаваемой зубчатым лезвием силы P от числа Z выступов, представлены на рис. 7.

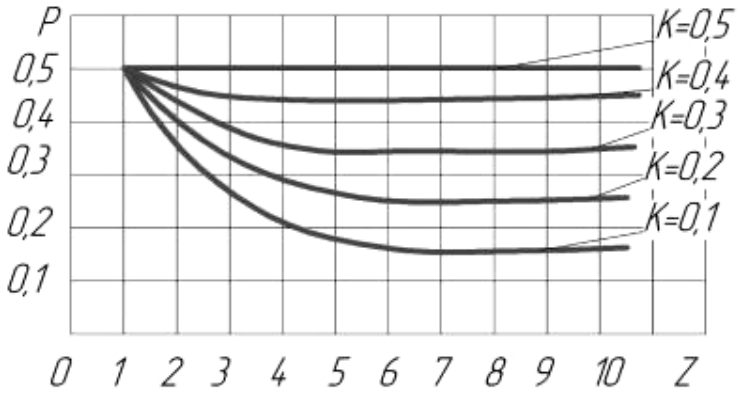


Рис. 7. Зависимости силы P от числа Z выступов при различных значениях коэффициента расстановки K.

Как видно из графиков (рис. 7), с увеличением числа выступов на лезвии сила P уменьшается.

Особенно значительно это сказывается при увеличении числа Z выступов от одного до четырех, после чего увеличение числа выступов на силу P существенного влияния не оказывает. Поэтому в зубчатом лезвии можно ограничиваться числом выступов не менее четырех [5]. Это подтверждается числом зубцов на роющих конечностях биологических прототипов, рассмотренных выше.

С увеличением числа выступов зависимость силы P от коэффициента расстановки K выступов приближается к линейной зависимости. Поэтому максимальное снижение сопротивления зубчатому лезвию, по сравнению со сплошным, будет при коэффициенте расстановки K, соответствующем экстремальному значению функции $P=f(K, Z)$. Исследуя [10] эту функцию

на экстремум по теореме Лагранжа о конечном приращении, в конечном итоге получим значение $K_Э$, определяемое решением квадратного уравнения вида

$$4K_Э^2 - 4K_Э + 4K_ЭZ - Z + 1 = 0. \quad (13)$$

Решение уравнения (13) в виде графика зависимости $K_Э(Z)$ представлено на рис. 8.

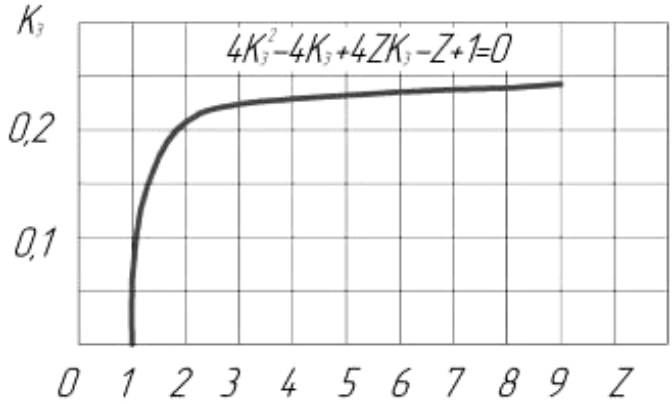


Рис. 8. Необходимое число выступов на режущем лезвии.

Как видно из рис. 8, с увеличением числа выступов на режущем лезвии от 4 до 10 значение $K_Э$ изменяется в незначительных пределах от 0,23 до 0,24. Следовательно, оптимальной величиной коэффициента расстановки K для зубчатых рабочих органов можно считать 0,22...0,24.

Приемлемость этого теоретически полученного результата подтверждают исследования расстановки зубцов роющих конечностей биологических прототипов. Так, для зубцов роющей конечности медведки (рис. 5, б) получены следующие значения коэффициента расстановки K:

$$K_1 = a_1/S_1 \approx 0{,}18,$$
$$K_2 = a_2/S_1 \approx 0{,}23,$$
$$K_3 = a_2/S_2 \approx 0{,}24,$$
$$K_4 = a_3/S_2 \approx 0{,}28,$$
$$K_5 = a_3/S_3 \approx 0{,}26,$$
$$K_6 = a_4/S_3 \approx 0{,}22.$$

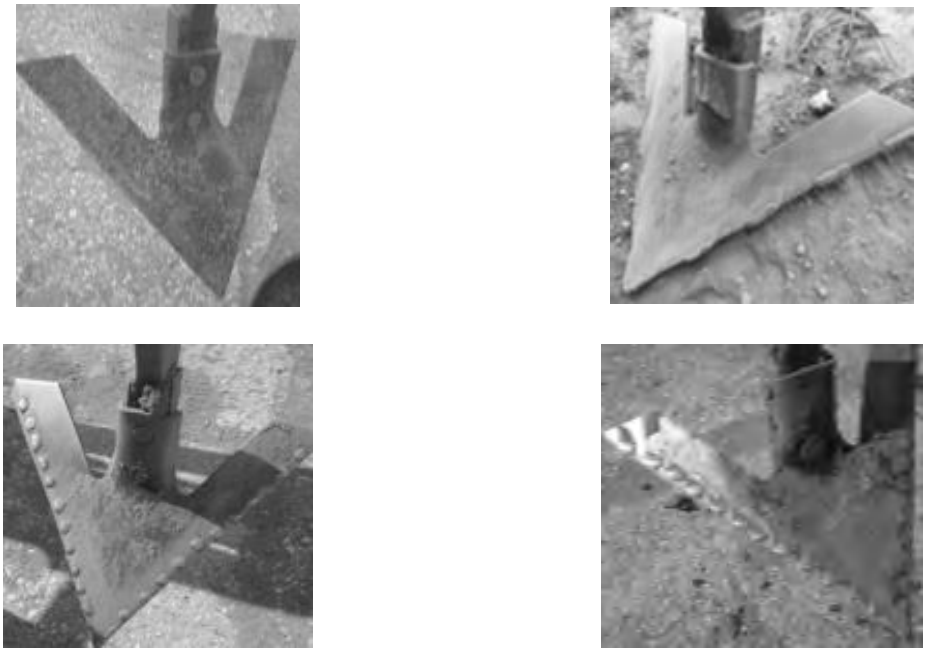
Среднее значение коэффициента расстановки составляет:

$$K = (0{,}18+0{,}23+0{,}24+0{,}28+0{,}26+0{,}22)/6 \approx 0{,}24.$$

Полученные в результате бионических исследований роющих конечностей животных и насекомых зависимости использованы в предлагаемом способе повышения долговечности почворежущих деталей [11], при котором твердый сплав или порошковый материал наносится электродуговой наплавкой на лезвия пунктирно по отрезкам логарифмической кривой с соблюдением соотношения наплавленных участков и расстояний между ними, соответствующем коэффициенту расстановки K. Упрочненные таким спо-

собом культиваторные лапы показаны на рис. 9, а. На рис. 9, б показаны эти же лапы после проведения производственных испытаний на культивации междурядий виноградников в условиях сельскохозяйственного предприятия ПАО «Бурлюк» Бахчисарайского района Республики Крым.

Результаты и их обсуждение. Результаты определения показателей износа культиваторных лап с экспериментальной износостойкой наплавкой, в сравнении с серийными лапами, представлены в таблице 1.



а) *б)*

Рис. 9. Культиваторные лапы с износостойкой наплавкой по бионически обоснованным параметрам.

Таблица 1. Результаты определения показателей износа культиваторных лап.

Показатель	Серийные лапы	Лапы с прерывистой наплавкой	Разница по износу серийных лап и лап с прерывистой наплавкой в процентах
Износ по массе, г	1295	990	-23,55
Линейный износ, мм: - носок - крылья	 86 68	 25 46	 -70,93 -32,35
Толщина лезвий, мм	5,0…5,6	1,9…2,3	–

Как видно из данных таблицы 1, интенсивность изнашивания культиваторных лап с износостойкой наплавкой по бионически обоснованным параметрам, в сравнении с серийными лапами, существенно снизилась. Особенно значительно это различие в зоне носка лап (более 70%). При этом у лап с прерывистой износостойкой наплавкой также сохраняется острота лезвий, обеспечивающая их работоспособность.

После проведения производственных испытаний культиваторных лап определили зависимость их тягового сопротивления P от глубины h и скорости V обработки почвы в почвенном канале в виде уравнений регрессии

$$P_Э = 232{,}67+6246h+145V,. \quad (14)$$

$$P_С = 477{,}0+5138h+161V. \quad (15)$$

Расчет по уравнениям (14) и (15) показывает снижение тягового сопротивления $P_Э$ культиваторных лап с износостойкой наплавкой по бионически обоснованным параметрам на 15-20% по сравнению с тяговым сопротивлением $P_С$ серийных лап.

Заключение. Таким образом, исходя из закономерностей распределения действующих сил по участкам контакта биологических прототипов с обрабатываемой средой, предлагаемый энергетический подход в бионической системе земледельческой механики и механике грунтов позволяет создавать оптимальные формы рабочих органов почвообрабатывающих машин с улучшенными показателями надежности по критерию минимальной энергоемкости технологического процесса обработки почвы, а также обосновать формы колес движителей для перемещения по земным грунтам и лунной поверхности.

Литература

1. Гофман, Б. Корни теории относительности. – М.: Изд-во «Знание», 1987.
2. Геронимус, Я.Л. Теоретическая механика. – М.: Изд-во «Наука»,1973.
3. Бабицкий, Л.Ф., Булгаков, В.М., Войтюк, Д.Г. Основы научных исследований. – Киев: Национальный аграрный университет, 1999.
4. Черкасов, И.И., Шварев, В.В. Грунт луны. – М.: Изд-во «Наука», 1975.
5. Бабицький, Л.Ф. Біонічні напрями розробки грунтообробних машин. – Київ: Изд-во «Урожай», 1998.
6. Гамбарян, П.П. Приспособительные особенности органов движения роющих млекопитающих. – Ереван: Издательство А.Н. Армянской ССР, 1960.
7. Жизнь животных. Том седьмой. Млекопитающие. – Москва: Изд-во «Просвещение», 1989.
8. Бабицкий, Л.Ф., Москалевич, В.Ю., Соболевский, И.В. Основы бионических исследований. – Симферополь: Изд-во «Антиква», 2014.
9. Бабицкий, Л.Ф., Коваленко, Ю.И., Коваленко, К.Ю. Математическая модель и геометрический образ деформации почвы. Механизация сельскохозяйственного производства // Научные труды Крымского государственного аграрного университета. – 1997.
10. Корн, Г., Корн, Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения, теоремы, формулы. – Москва: Изд-во «Наука», 1973.
11. Бабицкий, Л.Ф., Москалевич, В.Ю. Обоснование способов и режимов наплавки лемехов почвообрабатывающих машин // Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти. – 2017. – 5. – С. 35-42.

УДК 504.05

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭКОБИОНИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ В АГРОЦЕНОЗАХ И ГОРОДСКИХ ЭКОСИСТЕМАХ

Н.Н. Бушуев,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия,
e-mail: bnn@bmstu.ru

Аннотация. *Показаны исторические аспекты взаимодействия человека и природы. Перечислены негативные последствия влияния урбанизации на природные экосистемы и биосферу. Дано сравнение теории парникового эффекта и теории Миланковича. Проанализированы перспективные экобионические подходы, такие как органическое земледелие, адаптивно-ландшафтное земледелие, гидропоника, ГМО культуры, озеленение в городах, озеленение крыш зданий, вертикальное озеленение.*
Ключевые слова: *экобионические подходы, агроценозы, городские экосистемы, озеленение крыш, вертикальное озеленение.*

PROSPECTS FOR THE USE OF ECOBIONIC APPROACHES IN AGROCENOSES AND URBAN ECOSYSTEMS

N.N. Bushuev,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract. *The historical aspects of the interaction between man and nature are shown. The negative consequences of the impact of urbanization on natural ecosystems and the biosphere are listed. A comparison of the greenhouse effect theory and the Milankovich theory is given. Promising ecobionic approaches are analyzed, such as organic farming, adaptive landscape farming, hydroponics, GMO crops, landscaping in cities, landscaping of roofs of buildings, vertical landscaping.*
Keywords: *ecobionic approaches, agrocenoses, urban ecosystems, roof greening, vertical greening.*

В настоящее время биосфера находится в состоянии глобального экологического кризиса. Многие глобальные и локальные экологические проблемы обострились и само дальнейшее существование человечества под угрозой. Поэтому для решения ряда экологических проблем, особенно в городских условиях, необходимо использовать экобионические подходы.

Человечество с момента своего возникновения постоянно взаимодействует с окружающей природной средой. Рассмотрим основные исторические этапы взаимодействия человека и природы: охотничье-собирательская эпоха, аграрная эпоха, промышленное общество, информационное общество. В охотничье-собирательскую эпоху основой существования человечества было собирательство готовых продуктов, охота на крупных живот-

ных и рыболовство. В эту эпоху человек находился в непосредственном единстве с природой и полностью от нее зависел. Считается, что воздействие человека на природную среду в то время было невелико, но это не совсем так. Хотя численность людей на планете была невелика и их возможности были ограниченны, но в результате неконтролируемой охоты человек полностью истребил мамонтов и ряд видов крупных копытных животных. Некоторые хищники, представлявшие опасность для человека, например, саблезубый тигр, целенаправленно истреблялись. Кроме того, использование человеком огня приводило к опустошительным пожарам и смене растительности на обширных пространствах. Но при этом на биосферу в целом особого влияния не было. Однако уже тогда человек осознавал пагубность своего влияния на окружающую природу. В частности, во многих охотничье-собирательских племенах существовал жесткий экологический императив – не убивать животных больше, чем нужно для выживания племени.

В аграрную эпоху резко изменился характер взаимодействия человека и природы. Если в охотничье-собирательскую эпоху взаимодействие носило характер присваивающей экономики, когда человек адаптировался к природным экосистемам и являлся их частью, то в аграрную эпоху взаимодействие приобрело характер производящей экономики, при которой человек стал адаптировать природные экосистемы к системам хозяйствования (обычно к системам земледелия). Основой материального производства было сельское хозяйство – земледелие и скотоводство. При этом степень воздействия человека на окружающую среду резко усилилась. Человек вырубал леса и распахивал степи, чтобы расчистить территории для посева сельскохозяйственных культур. Леса, луга и степи заменялись полями и пастбищами для выпаса сельскохозяйственных животных. Природные экосистемы вытеснялись агроценозами, сокращалась территория обитания многих видов диких животных. Сельскохозяйственные животные конкурировали с дикими видами травоядных животных за пастбища, что приводило к уменьшению численности и вымиранию многих видов. Хищники нападали на домашних животных и стали целенаправленно истреблять ряд хищных видов, чтобы защитить свои стада.

Особый урон природе наносила подсечно-огневая система земледелия, при которой лесная растительность вначале срубалась, а затем сжигалась. Образовавшаяся при сжигании зола служила удобрением, но при этом под воздействием высокой температуры уничтожался почвенный гумус. Поэтому расчищенный огнем участок использовался под посевы сельскохозяйственных культур не более 5-7 лет, пока действовала зола, а затем забрасывался. Огонь мог легко перейти на соседние участки леса, и в результате сгорали обширные лесные массивы и в пожаре погибало много диких животных.

Именно в аграрную эпоху начались первые экологические кризисы, но они носили локальный характер. В качестве примеров можно назвать

появление пустынь Такла-Макан и Сахара, а также деградацию земель Месопотамии (современный Ирак). В результате перевыпаса скота и распашки земель в засушливых зонах уничтожался травянистый растительный покров, скреплявший своими корнями верхний плодородный слой почвы. Затем сильные ветры сдували разрыхленную почву и обнажались подстилающие породы, в том числе пески. Песок разносился ветром и образовались песчаные барханы, которые начинали наступать на окрестные поля, пастбища, села и города. Начинался процесс опустынивания и люди покидали обжитые земли. По такому сценарию образовались пустыня Такла-Макан в Синьцзян-Уйгурском автономном районе на северо-западе Китая и пустыня Сахара в Северной Африке. При этом исторические источники свидетельствуют, что на месте пустыни Такла-Макан была степь, а на месте Сахары – саванна. К сожалению, пустыня Сахара продолжает расширяться за счет Сахеля (зоны опустыненных саванн) на юг со скоростью до 10-15 км в год по прежней причине – перевыпас скота местными племенами.

Особый интерес представляет история деградации земель Месопотамии (междуречье рек Тигр и Евфрат). В древности здесь находилось Вавилонское царство – одно из наиболее могущественных государств древнего мира. Однако для земледелия использовались только речные долины. При правлении царя Навуходоносора (VII век до н.э.) было принято решение о строительстве каналов для орошения полупустынных территорий между двумя реками. Площадь обрабатываемых земель значительно возросла, продовольствия стало больше и Вавилонское царство достигло пика своего могущества. Но одновременно началось и его падение. При орошении вода просачивалась вглубь почвенного профиля, доходила до засоленных горных пород и растворяла соль. Под действием высоких температур на поверхности почвы вода испарялась и солевой раствор подтягивался к поверхности (эффект фитиля). Соль накапливалась на поверхности и в верхнем горизонте почвы, вызывая гибель зерновых культур и снижение урожаев. Поле приходилось забрасывать. По мере увеличения площади заброшенных земель снижались численность населения и могущество Вавилонского царства. Однако процесс засоления почв проходил медленно – несколько столетий и последние жители покинули Вавилон лишь в начале I века н.э.

Второй раз экологический кризис в Месопотамии (Ираке) произошел во времена Арабского Халифата в IX веке н.э. По распоряжению халифа были восстановлены старые оросительные каналы времен Вавилонского царства, а также проведена расчистка солончаков в Нижнем Ираке. На работу согнали зинджей – рабов из Восточной Африки. Условия труда зинджей были ужасны, они погибали тысячами и поэтому восстали. Восстание длилось более 20 лет, сопровождалось большими жертвами и разрушениями и было подавлено с большим трудом. Но главное – расчищенные зинджами поля через несколько лет вновь превращались в солончаки, т.е. их труд оказался бесполезен. Восстание зинджей послужило одной из при-

чин распада Арабского Халифата. Таким образом, экологические кризисы могут привести к долговременным экономическим и политическим последствиям.

Считается, что причиной гибели цивилизации Хараппы в долине реки Инд и цивилизации майя на полуострове Юкатан наряду с резкими изменениями климата могла стать неразумная хозяйственная деятельность человека, приведшая к экологической катастрофе и переселению людей в другие районы.

В промышленную эпоху воздействие человека на биосферу приобрело глобальный масштаб. Многие виды растений и животных оказались под угрозой вымирания. Загрязнение атмосферного воздуха, поверхностных, грунтовых и артезианских вод, а также почв различными вредными веществами стало повсеместным. При этом в результате промышленной деятельности человека в биосферу в большом количестве стали попадать вещества и даже химические элементы (например, плутоний), которых никогда ранее не было в природе. Истощение ресурсов Мирового океана, урбанизация, снижение плодородия почв, вырубка лесов, аридизация климата и опустынивание, уменьшение концентрации озона в стратосфере, дефицит пресной воды, антропогенное изменение климата – вот основные глобальные экологические проблемы, с которыми столкнулось человечество в промышленную эпоху. Таким образом, человечество поставило под угрозу свое дальнейшее существование.

В эпоху информационного (постиндустриального) общества, переход к которому осуществляется в настоящее время, экологическим проблемам будет уделяться большое внимание. Они будут решаться на основе гармонии человека и природы с максимально бережным использованием природных ресурсов. Произойдет (и уже происходит) частичная деурбанизация. Человеческое общество постоянно предпринимало попытки решить возникающие экологические проблемы. Однако вплоть до XX века такие попытки в основном носили характер запоздалой реакции на возникающие отрицательные последствия хозяйственной деятельности человека. Лишь сравнительно недавно с появлением учения о биосфере человечество перестало рассматривать природу как неисчерпаемый и возобновляемый ресурс.

Применение минеральных удобрений и химических средств защиты растений отрицательно сказывается на природных экосистемах. В частности, при внесении минеральных удобрений в почву попадают азот, фосфор, калий. Они являются питательными элементами, необходимыми для жизни растений, но систематическое внесение удобрений в повышенных дозах может вызвать серьезные нарушения в круговороте питательных веществ в природе. Растворимые соединения азота и фосфора вместе с поверхностным водным стоком попадают в водоемы, вызывая массовое развитие фитопланктона. Вода «зацветает», приобретает зеленоватую окраску, становится непригодной для использования в питьевых и технических целях. После отмирания фитопланктон начинает разлагаться, потребляя раство-

ренный в воде кислород. Снижение концентрации кислорода в воде вызывает гибель рыбы. Таким образом, в результате применения минеральных удобрений могут пострадать водные экосистемы. Кроме того, попавшие в водоисточники нитраты, применение химических средств защиты растений – пестицидов, гербицидов, фунгицидов и т.д. также может насести значительный ущерб окружающей среде. В частности, применение пестицидов нередко приводит к гибели медоносных пчел, а также других насекомых, опыляющих сельскохозяйственные культуры и растениях в природных фитоценозах. Применение пестицидов может привести к уменьшению численности и даже гибели популяций ряда мелких хищных птиц, питающихся вредителями сельскохозяйственных культур. В результате через некоторое время происходит вспышка численности вредителей и снижение урожая культурных растений. Пестициды могут накапливаться в почве, вызывая гибель дождевых червей и почвенных насекомых. Пестициды накапливаются в пищевых цепях – птицы, поедая червей и насекомых, подвергшихся воздействию пестицидов, погибают сами. От загрязнения воды в водоемах страдают рыбы, при этом во многих случаях они погибают. В конечном итоге пестициды могут попасть в организм человека с загрязненной водой или пищей и нанести ущерб здоровью.

Урбанизация – это переселение людей в крупные города и сосредоточение в них экономической жизни общества. Но этот процесс имеет и отрицательные стороны. В частности, в городах резко обостряются экологические проблемы, связанные с загрязнением атмосферного воздуха, воды и почвы, а также с высоким уровнем шума. Загрязнение окружающей среды в городах связано с деятельностью промышленных предприятий, энергетических объектов, автомобильного транспорта, а также с их высокой концентрацией на ограниченной территории.

В городах отмечается высокий уровень загрязнения воздуха оксидами серы, азота, углерода, соединениями тяжелых металлов, аэрозолями золы и сажи. Как правило, городской воздух сильно запылен, а городские и пригородные водоемы загрязнены стоками промышленных и коммунально-бытовых предприятий и вода из них непригодна для использования в питьевых целях. Более того, часто даже для использования в технических целях воду из городских водоемов приходится очищать. Далеко не все виды животных и растений выдерживают сильное загрязнение и могут приспособиться к жизни в городской среде.

Урбанизация негативно влияет на состояние здоровья людей. Выбросы промышленных предприятий и транспорта, попадая в городской воздух, вызывают у человека заболевания дыхательных путей, онкологические заболевания и аллергические реакции. Аллергия является реакцией организма человека на новые химические вещества-загрязнители, воздействие которых иммунная система человека ранее не испытывала. Шум, создаваемый промышленными предприятиями и транспортом, отрицательно влияет на здоровье человека. Под воздействием шума нарушается сон, после про-

буждения люди чувствуют усталость, головную боль. Со временем это приводит к переутомлению, снижению работоспособности, болезням центральной нервной и сердечно-сосудистой систем, а затем к повышению смертности населения.

Для обеспечения нормальной жизнедеятельности городов и особенно мегаполисов требуется высочайшая концентрация продовольственных, энергетических, водных и других природных ресурсов на ограниченной территории. Промышленность и коммунально-бытовое хозяйство производят большое количество твердых отходов, которые нужно куда-то девать. Их вывозят на свалки и полигоны, где они, разлагаясь, отравляют воздух, почву и грунтовые воды. Под свалки и строительство новых жилых кварталов отчуждаются большие площади плодородных сельскохозяйственных земель, вырубаются лесные массивы, что увеличивает нагрузку на оставшиеся природные экосистемы. Таким образом, урбанизация наносит ущерб биосфере в целом.

Одним из негативных аспектов деятельности человека в глобальном масштабе считается антропогенное изменение климата. В результате деятельности промышленности, сельского хозяйства и транспорта в атмосферу выделяется большое количество углекислого газа, метана и других парниковых газов. Они препятствуют оттоку тепла от поверхности Земли и приводят к потеплению климата. Ограничению выбросов парниковых газов посвящены Киотский протокол, Парижское соглашение по климату и другие международные договоры. Но существует и альтернативная точка зрения – теория Миланковича. Согласно этой теории, климат на планете зависит от ряда астрономических факторов, и повышение концентрации CO_2 в атмосфере является следствием потепления климата, но не его причиной. Имеются данные [1], полученные при бурении ледников в Антарктиде, согласно которым климат на нашей планете испытывал очень сильные изменения без всякого участия человека. А в межледниковые эпохи он был намного теплее, чем сейчас. Человек при этом в лучшем случае имел каменные орудия труда и на климат повлиять не мог. Согласно этим данным, в настоящее время отмечается тенденция к глобальному похолоданию.

Для решения локальных и глобальных экологических проблем предлагаются перспективные экобионические подходы, такие как органическое земледелие, адаптивно-ландшафтное земледелие, применение гидропоники, возделывание ГМО культур, озеленение в городах, вертикальное озеленение, озеленение крыш.

Органическое земледелие – это метод ведения сельского хозяйства, при котором применение минеральных удобрений, пестицидов, регуляторов роста растений запрещено или сведено к минимуму. Для повышения урожайности сельскохозяйственных культур, борьбы с сорняками и вредителями используются севообороты, внесение органических удобрений, применение биологических способов защиты растений и различные методы обработки почвы. Это позволяет избежать накопления остатков пести-

цидов и других токсикантов в почве и в сельскохозяйственной продукции, повышает ее качество. Такая пищевая продукция стоит дороже, но спрос на неё только растет. Однако органическое земледелие менее продуктивно и требует больших земельных площадей. В настоящее время на Земле под органическое земледелие используется 70 млн гектаров сельскохозяйственных угодий, из которых половина расположена в Австралии [2, 3].

Согласно определению, данному акад. РАСХН В.И. Кирюшиным [4], адаптивно-ландшафтная система земледелия (АЛСЗ) – это система использования земли определенной агроэкологической группы, ориентированная на производство продукции экономически и экологически обусловленного количества и качества в соответствии с общественными (рыночными) потребностями, природными и производственными ресурсами, обеспечивающая устойчивость агроландшафта и воспроизводство почвенного плодородия. АЛСЗ позволяет использовать сельскохозяйственные земли с максимальной эффективностью и минимальной нагрузкой на окружающую среду. Таким образом, при ее использовании снижается использование минеральных удобрений и ядохимикатов, а экологическая ситуация улучшается.

Гидропоника – это способ выращивания растений на искусственных средах без почвы. В качестве субстрата обычно используются гравий, щебень, керамзит, а питательные вещества растения получают из раствора, омывающего корни. Как правило, гидропоника используется в условиях защищенного грунта, где можно легко регулировать температуру воздуха и корнеобитаемого слоя, содержание углекислого газа в воздухе, влажность воздуха, интенсивность и продолжительность освещения, концентрацию различных элементов в питательном растворе. Контроль осуществляется при помощи датчиков, выведенных на пульт управления, а регулировка этих параметров легко автоматизируется. Питательные вещества подаются к корням с раствором строго в необходимом количестве, что позволяет экономить минеральные удобрения, исключает загрязнение пищевой продукции и окружающей среды. Вода для питательного раствора используется многократно (замкнутый цикл орошения). Сорняки отсутствуют, вредители встречаются крайне редко, что делает ненужным применение химических средств защиты растений. Гидропоника используется для выращивания зеленных, овощных и фруктовых культур и имеет большие перспективы для развития.

Генетически модифицированные организмы (ГМО) – это живые организмы, генотип которых был изменен человеком при помощи методов генной инженерии. ГМО могут быть животными, растениями и микроорганизмами, но наибольшее распространение получили ГМО-растения (ГМО-культуры). ГМО-культуры более урожайны, устойчивы к негативным факторам внешней среды, вредителям, болезням, лучше переносят хранение и транспортировку, более технологичны в переработке, и главное – дешевле обычных сельскохозяйственных культур. Однако использование ГМО-культур может привести к негативным последствиям. Например, ГМО-культуры, устойчивые к гербицидам, могут перекрестно опыляться с

близкородственными дикими видами и передавать им гены устойчивости к пестицидам. Такие случаи уже зарегистрированы в Канаде, что привело к появлению суперсорняков, устойчивых к любым гербицидам. Также пыльца некоторых ГМО-сортов кукурузы оказалась токсичной для медоносных пчел и ряда насекомых-опылителей. Имеется вероятность вытеснения ГМО-растениями ряда диких видов в природных экосистемах. Поэтому в соответствии с Федеральным законом № 358 возделывание ГМО-культур в нашей стране запрещено, можно лишь проводить научно-исследовательские работы. Однако не запрещен импорт ряда ГМО-продуктов для использования в продовольственных целях. Тем не менее, использование ГМО-культур при условии более тщательного контроля имеет большие перспективы, как в нашей стране, так и за рубежом.

Зеленые насаждения в городах существовали с древних времен, но они выполняли в основном декоративные функции. В настоящее время зеленые насаждения выполняют важные экологические функции. Во время вегетационного сезона растительность обогащает городской воздух кислородом и поглощает углекислый газ. Многие растения выделяют в воздух фитонциды, подавляющие рост и развитие микроорганизмов. Поэтому в парках воздух содержит намного меньше болезнетворных организмов, чем на улицах города. Деревья снижают запыленность городского воздуха – за год каждое дерево поглощает в среднем 30-40 кг пыли. Зеленые массивы хорошо снижают уровень шума в городе. При правильном размещении и подборе соответствующих пород лиственных деревьев их крона поглощает до 1/3 звуковой энергии. Зеленые насаждения создают благоприятный для человека микроклимат. В жаркую погоду температура воздуха среди насаждений на несколько градусов ниже, чем в районах городской застройки. Причем прохлада обеспечивается не только тенью деревьев. В парках на 15-30 % выше влажность, что приводит к снижению температуры воздуха. Прохлада и влажность воздуха парков в значительной степени обеспечиваются испарением влаги поверхностью листьев деревьев.

По мере увеличения численности населения в городах, а также количества промышленных предприятий и автотранспорта отмечается многократный рост загрязнения городского воздуха вредными выбросами. Зеленые насаждения уже не справляются с возрастающей нагрузкой, особенно в центральных частях города, где нет лишних территорий, в том числе и для растений.

В этих условиях для улучшения экологической обстановки необходимо использовать нетрадиционные способы, в том числе озеленение крыш зданий. Эта мера помогает увеличить площадь растительных насаждений при дефиците территории. При озеленении крыши создается водонепроницаемый мембранный слой, а также системы дренажа, полива и защиты от корней растений. Озеленение позволяет значительно увеличить срок эксплуатации крыш зданий и уменьшить эксплуатационные расходы. Озелененные крыши поглощают дождевую воду, улучшают защиту здания от холода и го-

родского шума, защищают здания от перегрева в жару. Озелененные крыши служат местообитанием городской фауны, очищают воздух от пыли, поглощают углекислый газ и вредные выбросы, взамен выделяя кислород. Большая концентрация зеленых крыш может существенно снизить температуру воздуха в городе в жару. На крышах могут быть размещены теплицы для выращивания некоторых сельскохозяйственных культур.

Другим нетрадиционным способом улучшения экологической обстановке в городе является вертикальное озеленение. Вертикальное озеленение – это один из элементов ландшафтного дизайна. Оно заключается в использовании различных растений для декоративного оформления строений и их частей. Вертикальное озеленение применялось уже в античности, но в настоящее время оно имеет не только декоративное значение. Высаженная вдоль вертикальных поверхностей (стен, заборов, террас) зелень защищает от нагрева, уменьшает уровень шума, ослабляет воздействие ветра. Вертикальное озеленение целесообразно использовать при остром недостатке земли, особенно в центральной части городов. Для вертикального озеленения используют лианы (вьющиеся растения) – плющ, клематисы, девичий виноград, некоторые виды жимолости, амурский виноград, хмель, лимонник, актинидия и др. Можно также использовать мхи – идеальные растения для вертикального озеленения. У мха нет корней, грунт ему не нужен, т.к. влагу и питательные вещества он получает из воздуха. На поверхности мох закрепляется самостоятельно. Мхи имеют разнообразные цвета, низкорослы, компактны, имеют небольшую массу и не отягощают стены.

Таким образом, рассмотренные выше экобионические подходы, такие как органическое земледелие, адаптивно-ландшафтное земледелие, применение гидропоники, возделывание ГМО культур, озеленение в городах, озеленение крыш и вертикальное озеленение, имеют большие перспективы при решении локальных и глобальных экологических проблем, стоящих перед человечеством.

Литература

1. Salamatin, A.N., Lipenkov, V.Ya., Barkov, N.I., Jouzel, J., Petit, J.R., Raynaud, D. Ice-core age datind and palaeothermometer calibration based on isotope and temperature profiles from deep boreholes at Vostok Station (East Antarctica). – Journal of Geophysical Research, 1998, vol. 103, N D8, pp. 8963-8977.

2. The World of Organic Agriculture 2019. FiBL and IFOAM. URL: https://www.ifoam.bio/global-organic-area-continues-grow (Accessed: January 20, 2022).

3. Paull John. Organic Agriculture in Australia: Attaining the Global Majority (51 %) // Journal of Environment Protection and Sustainable Development, 2019, v. 5(2), pp. 70-74. URL: https://www.academia.edu/39718306/Organic_Agriculture_in_Australia_Attaining_the_Global_Majority_51_ (Accessed: January 20, 2022).

4. Кирюшин, В.И. Экологические основы земледелия – М.: «Колос», 1996. – 367 с.

УДК 519.6

ОСОБЕННОСТИ АРХИТЕКТУРНОЙ БИОНИКИ Ю.С. ЛЕБЕДЕВА

С.А. Маилов,
НИИТИАГ филиал ФГБУ ЦНИИП Минстроя России, г. Москва, Россия,
e-mail: s_mailov@mail.ru

Аннотация. *Рассматриваются различные положения, подходы и данные, вводимые в научный обиход известным исследователем Ю.С. Лебедевым в 70-80 гг. XX века. Выделяется та часть аспектов, в которых содержится критический взгляд на состояние архитектуры и градостроительства. Раскрывается содержание некоторых работ, проводимых в Центральной лаборатории архитектурной бионики в 1984-1988 гг., ориентированных на практическое применение стержне-вантовых конструкций для условий вахтенных поселений, приближенных к экстремальным воздействиям, а также другие разработки с авторским участием.*
Ключевые слова: *архитектурная бионика, архитектура будущего, градостроительство, традиции и новаторство, стержне-вантовые конструкции, вахтенные поселения.*

FEATURES OF Yu.S. LEBEDEV's ARCHITECTURAL BIONICS

S.A. Mailov,
Research Institute of Theory and History
of Architecture and Urban Planning, Moscow, Russian Federation

Abstract. *The article describes various definitions, approaches and data on architectural bionics introduced into scientific use by the famous researcher Yu.S. Lebedev in the 70-80s. The aspects delivering a critical view on the architecture and urban planning state are highlighted. The content of some works carried out at the Central Laboratory of Architectural Bionics in 1984-1988, focusing on the practical application of rod-stayed structures in shift settlements built in climate conditions close to extreme as well as corresponding research developments by the author himself are revealed.*
Keywords: *architectural bionics, architecture of the future, urban planning, traditions and innovations, rod-stayed structures, shift settlements.*

В 2021 году на Конференции «Бионика – 60 лет. Итоги и перспективы», мною отмечалось, что «Архитектурная бионика» должна относиться к одному из заметных направлений в истории советского архитектуроведения [1]. Опирался я в своих суждениях в основном на две книги Юрия Сергеевича Лебедева, вышедшие с обозначенной выше тематикой в 1971 и в 1977 гг. [2]. В основе этого направления новых исследований лежали все более назревающие противоречия в вопросах формообразования в архитектуре и строительстве на фоне возрастающего обострения экологической

проблематики в широком значении этого понятия. И в этом отношении, как мне представляется, развиваемые Лебедевым еще в те годы положения остаются актуальными и ныне.

Отдавая дань признательности всему сборнику исследований, подытожившему результаты упомянутой Конференции, хочу выразить благодарность, в частности, Ю.Д. Козлову, в работе которого раскрыт с достаточной глубиной экскурс в историю формирования архитектурной бионики, а также и в вопросы ее предыстории [3].

В данной работе делается попытка вычленить те аспекты этого направления исследований, в которых предопределялись некие более целесообразные конструктивные подходы применительно к современной строительной деятельности, выделив их среди общих суждений теоретического характера, несколько отдаляющих нас от реальной практики - суждений, демонстрировавших те или иные аналоги или «патенты», почерпнутые из примеров живой природы, в расчете на перспективу их возможного использования в архитектуре недалекого будущего.

Вся сложность рассматриваемой проблематики заключена в том, что надежды на возможность плодотворных заимствований из «кладовых природы» в недалекой перспективе в большей мере иллюзорны, нежели приближены к реалиям современной действительности, связанной с архитектурой. Наблюдения показывают, что мы вынуждены сталкиваться с проблемами затруднительного характера, когда «механизмы» природы», срабатывающие исключительно на свои внутренние потребности, опираются, прежде всего, на принципы приспособляемости живых существ к особенностям неживой материи и окружающего мира. Человечество, в свою очередь, в укладах своего жизнеустройства формирует веками свои устойчивые подходы, используя не только «дары» природы, но и возможности своего мыслительного аппарата, прибегая к различного рода приспособлениям и изобретениям. На какой бы уровень сознания мы не переходили, следует учесть, что между тем, как строит свои соты пчела или вьет сеть паук, и как выстраивает свою деятельность человек, существуют глубочайшие различия. Эти различия довольно существенны и недостаточно изучены. Они отражены в особенностях истории мировой архитектуры, того необычного феномена, требующего отдельного изучения, в том числе и с позиций его исторической обусловленности. Чтобы не впадать в состояние утопий следует признать и тот очевидный факт, что архитектурная деятельность в большей мере инертна, нежели подвижна в своих основах, особенно в сфере жилищного строительства. Подлинная архитектура всегда опиралась в своем развитии на великие традиции, на весь опыт своего технологического и художественного воспроизводства, отраженного в анналах ее истории и в редких обобщающих объемных изданиях («Архитектура и градостроительство. Энциклопедия», 2001 [4]). Именно благодаря способности к особенному восприятию окружения, появлялась у человека возможность опереться на свою

находчивость в использовании подручных материалов и элементов, на свою изобретательность (техника кладки, технологии монтажа и др.). При этом отметим, что возникающие время от времени проекты прожектерского характера подтверждают уязвимость их многих положений по отношению к тем реальным результатам, на которые, как правило, возлагали некие надежды. Мы начинаем глубже осознавать отвлеченность ряда выдвигаемых неких идей, основанных на замкнутом круге внутренне персонализированных, сугубо художнических представлений об архитектуре. Раскроем содержание одного из текстов, «обосновывающих» подобную идею города будущего: «Везде видны высокие опоры. Они похожи на огромные сигары. К ним подвешены стальные сети… паутина обвивает весь город. Она почти не материальна… На ней подвешены здания, которые висят над нашими головами на разной высоте… Город плотно заселен, а земля совершенно свободна! Висячий город позволяет сохранить поля, леса, парки и озера такими, какими их создала природа, потому что люди перестают жить на земле. На земле они только гуляют…» [5, с. 71]. Возможно ли такое? Город вытеснил небо (!?). Сохранятся ли при этом леса и парки, и другие части природного окружения, если над ними (вместо неба?!) взгромоздятся строения города будущего? [6, с. 234].

Актуальными останутся и те критические замечания, которые были высказаны Ю.С. Лебедевым в статьях, посвященных городской среде и проблемам освоения архитектурного пространства. Особенно примечательны его слова, обращенные к так называемой «теории архитектурной композиции», разрабатываемой в институте, в составе которого находилась Центральная лаборатория архитектурной бионики (НИИТИА / ЦНИИТИА – уникальном на всю страну НИИ в сфере изучения истории и теории архитектуры). Той самой теории, которая «до сих пор не пыталась соединить в себе средства гармонизации – пропорционирование, ритмизацию, тектонизацию, установление равновесия на основе законов симметрии, масштабность, привести архитектурные формы в соответствие с морфогенетическими и психологическими характеристиками человека и т.д.» [7, с. 233]. Увязывал он эту критику с необходимостью «комплексного эстетического планирования», которого «никогда не было в истории архитектуры и градостроительства» (там же). Не менее остро заострял внимание Ю.С. Лебедев и на проблемах разработки архитектурной среды, пространственного освоения городских территорий, включая массовое строительство, в условиях отсутствия «взаимодействия между различными типологическими сферами архитектуры и недостаточной организации между ними переходных сфер…» [8, с. 60] и др. Дальнейшие изыскания в области методологии архитектурной бионики способствовали выработке концепции о едином непрерывном пространстве, включающем как живую природу, так и архитектуру в целом [8, с. 61; 3, с. 72-73].

Возвращаясь к теме конструктивных подходов, наиболее приближенных к реалиям наших дней, остановим наше внимание на некоторых разработках, которые связывали деятельность лаборатории с реалиями практического характера – на вопросах моделирования и проектирования некоторых форм или объектов, ориентированных на применение их в народном хозяйстве. Именно в этот период был выполнен ряд предложений, связанных с разработанной под руководством Лебедева так называемой стержне-вантовой конструкции. Рассматриваемая конструкция, основанная на сочетании нескольких простейших элементов, достигала эффекта упруго-гибкого устройства в виде сводчатого покрытия, сочленения которого обходились без традиционных в строительстве креплений.

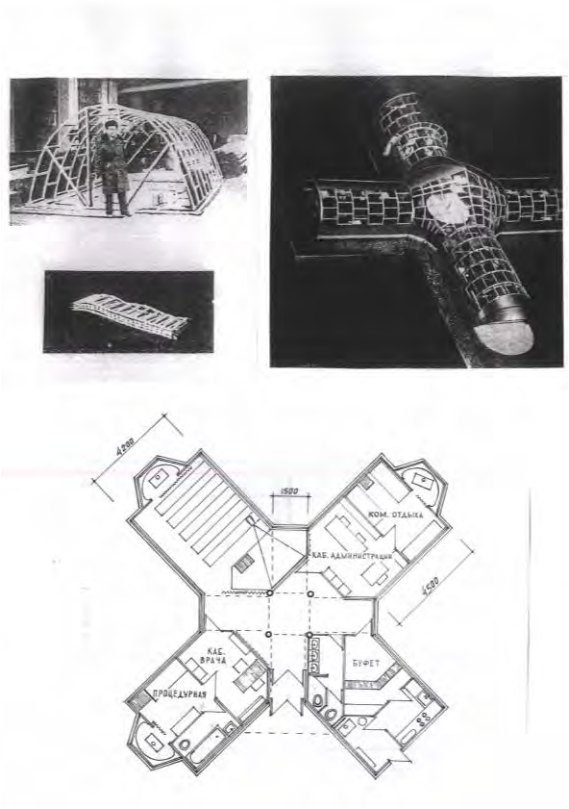


Рис.1. Примеры моделирования строений из стержне-вантовой конструкции: простейшего типа и выставочного варианта по материалам Ю.С Лебедева(вверху); и построение плана постройки для работников вахтенных поселений по материалам С.А. Маилова(внизу).

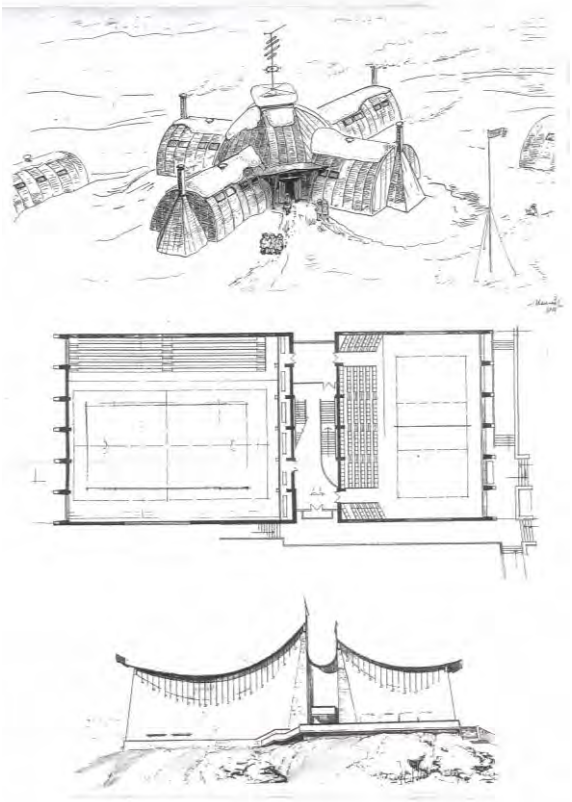


Рис.2. Эскиз строения для обслуживания работников вахтенного поселения(вверху); и проектный материал спортивного сооружения для г. Ялты (Крым,1988) по разработкам С.А. Маилова.

Работая в 1984 -1988 гг. в Центральной лаборатории архитектурной бионики при ЦНИИТИА с моим участием были выполнены проектные предложения для объектов «временного проживания различных бригад «кочующих» профессий: геологоразведчиков, лесозаготовителей, промысловиков, газонефтеразведчиков и других, в расчете на эксплуатацию этих комплексов в экстремальноклиматических районах нашей страны» [9, с. 107, 108]. К особенностям разработок по устройству временных жилищ относились, прежде всего, их *трансформируемость* и *адаптируемость* к внешним условиям среды. При разработке комплекса небольшого поселения учитывались факторы мобильности и компактности, энергосбережения и саморегуляции микроклимата каждого из строений.

В годы начавшейся перестройки, перед тем как Лабораторию архитектурной бионики стали переводить в ведомство ЦНИИЭП жилища (конец 1988 г.), мне удалось выполнить архитектурный проект двухзального спортивного сооружения по заданию ДСО «Спартак». Опираясь на принципы стержне-вантовой конструкции, мною был предложен вариант висячего вантового покрытия для каждого из залов по отдельности, одобренный заказчиком и главным архитектором г. Ялты [10]. Проект предусматривал активное решение силуэта постройки на фоне возвышений горного кряжа Ялты. Идеи рассматриваемого сооружения послужили поводом по внедрению конструктивного решения в реестр государственных изобретений. Изобретение висячей стержневантовой конструкции получило достойную оценку Контрольного Совета научно-технической экспертизы Госкомитета по изобретениям и открытиям при ГКНТ СССР в 1991 г. [11].

Подытоживая сказанное, следовало бы отметить и ту результативность работ, которая, при всех тех издержках, реализовывалась плодотворно. Она сводилась к трем ее составляющим: 1 - эскизно творческой; 2 – проектной; 3 – научно-изыскательской. В частности, по третьему пункту, к примеру, отмечу свое участие в работе Первой Всесоюзной конференции, посвященной проблемам социальной экологии, состоявшейся во Львове в 1986 г. На этом форуме обсуждались важные аспекты новой интегральной междисциплинарной науки о гармонизации взаимоотношений между обществом и природой. В опубликованных материалах этого форума, в частности, подчеркивалось, что при формировании нового знания выявляется роль не только дивергирующих наук, но и потребности к новому уровню обобщений, к более настойчивому обращению к новым задачам практики строительства, «отсрочка которых уже не терпима… Архитектура должна стать полноценным «механизмом» формирования здоровой среды обитания в масштабе всей биосферы» [6, с. 230-232]. А этому процессу должна предшествовать определенная перестройка, та самая «качественная перестройка всей совокупности технических, экономических, социальных, этических и научно-технических факторов общественного развития», которая

в те же годы излагалась доктором философских наук Э.В. Гирусовым [12, с. 8]. Одновременно подчеркивалось, что еще в те годы в «архитектуроведческой сфере такая перестройка еще только наметилась, ею занимается архитектурная бионика», научный потенциал которой находился на некотором важном для науки подъеме. В интересах дальнейшего развития научного потенциала всех сфер научного познания, включая архитектурно бионическую, ориентированных на перспективу развития общества, необходимы дополнительные усилия со стороны не только ряда учреждений, но и государства как такового.

Литература

1. Бионика – 60 лет. Итоги и перспективы / 17-19 дек. 2021 г., Москва. (См.: Программу конференции).
2. Лебедев, Ю.С. Архитектура и бионика. – М., 1971; Лебедев Ю.С. Архитектура и бионика. Изд. второе, переработ. изд. – М., 1977.
3. Козлов, Д.Ю. Ю.С. Лебедев и становление архитектурной бионики как нового научного направления // Бионика – 60 лет. Итоги и перспективы. Сб. статей Первой Междунар. научно-практической конференции. – М.: Ассоц. технич. ун-тов, 2022. – С. 66-77.
4. Архитектура и градостроительство. Энциклопедия. Гл. ред. А.В. Иконников / РААСН, НИИТАГ. – М., 2001. – 688 с.
5. Велев, П. Города будущего. – М., 1985. – С. 7.
6. Маилов, С.А. Социально-экологический аспект архитектуры будущего. Вопросы социоэкологии. Материалы первой Всесоюзной конференции «Проблемы социальной экологии» (Львов, 1 – 3 окт. 1986 г.). – Львов, 1987, – С. 229 – 236.
7. Лебедев, Ю.С. Архитектурная бионика: гармонические принципы формообразования и живая природа. // Художественное творчество. Вопросы комплексного изучения. Человек – природа – искусство. – Ленинград, 1986, – С. 227-238).
8. Лебедев, Ю.С. Развитие архитектурной среды и научно-технический прогресс. // Общество, архитектура и научно-технический прогресс. Сб. научн. трудов / ЦНИИП градостроительства Госгражданстроя. – М., 1987, – С. 60-72.
9. Маилов, С.А. Внедрение купольно-сводчатых систем в поселения вахтенного типа // Общество, архитектура и научно-технический прогресс. Сб. научн. трудов / ЦНИИП градостроительства Госгражданстроя. – М., 1988, – С. 106-110.
10. Маилов, С.А. Висячее стержневантовое покрытие // Передовой проектный и научный опыт в градостроительстве и архитектуре, рекомендуемый для внедрения. Информационный сб., №5 / НИИТАГ Минстроя. Сост. С.Б. Мержанов. – М., 1992, – С. 22-25.
11. Маилов, С.А., Каприелов, С.С. Авторское свидетельство (на изобретение. 1988), № 1793028.
12. Гирусов, Э.В. Особенности нормативного характера экологического знания. – Пущино, 1980. – С. 8 и др.; см. также: Гирусов Э.В. Направленность саморегуляции биосферы. – Пущино, 1982.

ГУМАНИТАРНАЯ БИОНИКА

УДК 001.892:159.924

ОСНОВНЫЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ТВОРЧЕСТВА И ИХ ЗНАЧЕНИЕ В БИОНИКЕ

В.В. Бушуева, Н.Н. Бушуев,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия,
e-mail: vvb@bmstu.ru, bnn@bmstu.ru

Аннотация. *Обоснована актуальность исследования природных закономерностей для их использования при разработке технических систем. Отмечено, что на ранней стадии орудийной деятельности этот процесс осуществлялся стихийно. Внимание к природным закономерностям и их значению отмечается уже в античный период. Показаны основные достижения науки и техники. Отмечено значение творческой личности, ее особенности и характеристики. Выделены основные принципы для поиска творческих решений и их значение в бионике. Приведены зарубежные методики активизации творческой деятельности, подчеркнуто их значение. Даны рекомендации для использования творческих подходов в бионике.*
Ключевые слова: *бионика, природные закономерности, творческие подходы, творческая личность, интуиция, отечественные методы активизации, зарубежные методы.*

THE MAIN METHODOLOGICAL PRINCIPLES OF TECHNICAL CREATIVITY AND THEIR SIGNIFICANCE IN BIONICS

V.V. Bushueva, N.N. Bushuev,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract. *The relevance of the study of natural patterns for their use in the development of technical systems is substantiated. It is noted that at the early stage of tool activity, this process was carried out spontaneously. Attention to natural patterns and their significance has been noted already in the ancient period. The main achievements of science and technology are shown. The significance of the creative personality, its features and characteristics are noted. The basic principles for the search for creative solutions and their significance in bionics are highlighted. Foreign methods of activating creative activity are given, their importance is emphasized. Recommendations for the use of creative approaches in bionics are given.*
Keywords: *bionics, natural patterns, creative approaches, creative personality, intuition, domestic methods of activation, foreign methods.*

В настоящее время в философской литературе при решении методологических проблем большое внимание уделяется анализу использования природных процессов в инженерной деятельности, умению видеть природные закономерности, взаимодействия и воплощать их при разработке технических систем. Как известно, продукты инженерной деятельности синтезируют, как природные, так и искусственно созданные свойства, и представляют ценность в первую очередь со стороны своих функций. И в этом плане особый интерес представляет анализ орудийной деятельности на ранних стадиях развития общества. Здесь отчетливо видно воплощение определенных природных закономерностей, разумеется, этот процесс осуществлялся стихийно. Осознание значения природных закономерностей в практической деятельности начинается только в античный период. В философских учениях подчеркивается необходимость использования природных процессов, причем в различных сферах деятельности. Например, Гераклит считал, что многознание не делает человека мудрым. Мудрость заключается в том, чтобы познавая природу, поступать сообразно с ней, с ее закономерностями, использовать их. Далее, в трудах античных философов обосновывается аналогия с органическим миром в социальных теориях. В частности, перенесение законов биологии на явления общественной жизни.

Воплощение природных закономерностей в технических системах реализуется у Архимеда из Сиракуз (287-212 до н.э.). Архимед особенно прославился своими техническими изобретениями. И современники Архимеда квалифицировали его именно как «техника», а он был и ученым в современном смысле этого слова. Но постоянные войны требовали все более эффективной боевой техники. В создании военных машин были заинтересованы правители этих государств, и на них они тратили большие средства. Архимед изобрел полиспаст (грузоподъемная машина), водоподъемный винт, усовершенствовал камнеметные машины, изобрел лебедку и др. Архимед при помощи технических устройств сделал Сиракузы неприступными, и лишь оплошность самих горожан позволила римлянам взять город. На основе применения открытых им законов оптической физики Архимед сжег римский флот при осаде Сиракуз. Но изобретения Архимеда применялись в основном в военной и строительной технике. Он разработал новые виды метательного оружия: катапульты и баллисты, стрелявшие большими стрелами и камнями с дальнобойностью до 350 м. Прогресс осадной техники вызывал совершенствование оборонительных сооружений: стены становились выше и толще, в многоэтажных стенах делались бойницы для стрелков и метательных орудий. Необходимость возведения мощных стен повлияла на общее развитие строительной техники. Но значительная часть технических и научных достижений Архимеда не получили признания в древнем Риме, а они опережали столетия и даже тысячелетие, активно использовались его открытия, изобретения лишь в военной и строительной технике.

Можно привести и множество других подобных примеров: водяная турбина Филона (ок. 25 г. до н.э. – ок. 50 г. н.э.), Герон Александрийский изобрел и построил прототип паровой турбины. Но паровой шар, автоматы Герона были забыты на столетия и даже на тысячелетия. Показателен также в этом плане и пример относительно многих достижений Леонардо да Винчи, который во многих областях науки и техники значительно опередил свое время, но которые также были забыты, как и достижения других творцов прошлого.

Рассмотренные выше великие достижения науки и техники были осуществлены гениальными творцами. Их интуиция, умение видеть природные процессы позволили воплощать их в реальных системах. Другими словами, благодаря таланту, уникальной, индивидуальной способности творческой личности появились выше упомянутые открытия и изобретения. Их созидательная деятельность характеризовалась результатом, далеко опережающим свое время.

В настоящее время в философской литературе значительное внимание уделяется поиску методологических подходов для разработки новых технических устройств. Как известно, любая техническая система разрабатывается на основе использования законов науки (природы). И если процесс функционирования технической системы не отвечает заданным требованиям, то необходимо применить следующий методологический подход, необходимый в техническом творчестве. Он заключается в том, что все законы науки (природы) действуют только в определенных условиях. Законы нельзя изменить, создать, уничтожить. Их действие в технических системах можно регулировать только двумя способами. Первый – изменять условия функционирования технической системы, но это не всегда возможно, в таком случае идет поиск другого принципа функционирования технической системы, а значит и другой природной закономерности. И самый сложный творческий процесс – найти оптимальное взаимодействие законов науки (природы), на основе которых функционирует техническая система. Например, подводная лодка должна опускаться и подниматься. И здесь действие закона всемирного тяготения ослабляется архимедовой силой, их взаимодействием. Подобных примеров можно привести множество, так как почти все технические системы работают на этом принципе, то есть на взаимодействии законов науки (природы) [1]. Это самый сложный и высший уровень технического творчества. Методологическое значение такого творческого подхода широко используется при разработке почти всех технических систем. И он очень значим в бионике. Другими словами, при разработке почти всех технических систем учитываются не только условия функционирования, но и взаимодействие тех или иных законов. Следует отметить, что данные значимые методологические подходы, к сожалению, не всегда осознаются, учитываются в инженерной деятельности, так как это сложная задача и требует определенных творческих способностей.

Не рассматривая другие направления использования природных процессов в инженерной деятельности, следует отметить необходимость творческого подхода, творческой личности, ее интуиции в этом процессе. И это очень значимая проблема в бионике.

Вопрос творческой деятельности, творческой личности достаточно сложный и в настоящее время разрабатывается, как в отечественной [2], так и в зарубежной литературе [3]. Особенно значимо такое направление творчества, как способность видеть проблемы и их решения в поиске нестандартного индивидуального видения. Подчеркнуто, что важное место в поиске решений отводится интуиции. Как правило, интуиция противопоставляется логике. Логика определяет мышление с помощью понятий. Интуиция определяет мышление посредством образов, которые складываются на основе индивидуального опыта. Интуиции присущи такие черты, как целостность и одновременность «схватывания» представления. Но в процессе решения творческой задачи в поле внимания исследователя постоянно попадают внешние факторы, которые обладают лишь некоторыми признаками решения, но и они часто влияют на вероятность поиска искомого представления. Конечно, в идеале желательно бы найти вариант, обладающий всеми признаками решения, само решение в готовом виде. Но это исключительный случай. Чаще можно встретить объект, обладающий не всеми, но многими признаками решения, который нередко способствует «подсказке» в поиске решения. Но эффективность «подсказки» определяется только в том случае, когда уже проделана большая предварительная работа по поиску решения. В противном случае исследователь может пройти мимо и не увидеть этой «подсказки». Другими словами, это доказывает необходимость анализа творческого процесса, творческой личности, характеристик присущих творческой личности.

Изобретение в любой области требует действительно определенных черт творческой личности. И самым важным здесь является настойчивость, воля. Быть в постоянном напряжении, проявлять значительные усилия, это не каждому дано, что во многом объясняет редкость изобретений. Неспособность к творческим достижениям зависит в большей степени от недостаточной воли или смелости, чем от интеллектуальной ограниченности. Не проявляя энергии, упорства, упрямого сопротивления поражениям, самые блестящие умы рискуют остаться бесплодными и ограничиться пониманием работ других авторов или их проникновенной критикой, никогда не творя ничего нового сами. И невозможно, да и бесполезно классифицировать, стандартизировать психологические характеристики творческой личности. И, как показывает история науки и техники, лишь определенное сочетание всех черт, целостность личности дает тот импульс к творческой деятельности [4].

В процессе творческой деятельности необходимо учитывать пагубное влияние психологической инерции. Под психологической инерцией понимают привычку к шаблонному мышлению, стремлению делать «как всегда, как все», и это действительно необходимо и оправдано.

Как известно, человек по своей природе экономен, он думает в привычном направлении, устойчивые знания ориентируют искать решение в готовых рецептах, ранее используемых, в результате получаются штампы, стандартные решения. Данную ситуацию необходимо ослабить, и осуществляется это на основе применения эвристических методов. Они позволяют снизить психологическую инерцию, что является важной задачей при решении проблем бионики. Но как показывает практика, в индивидуальной творческой деятельности это достаточно сложная задача. Наибольший результат в применении эвристических методов, активизации психологических моментах творчества (ассоциации, аналогии и др.), достигается в коллективной деятельности. Здесь каждый из участников по-своему подходит к решению задачи, но в единстве они дополняют друг друга. И только слияние их усилий может дать новое решение. совокупность множества идей, возникающих в коллективной деятельности. То есть возникает возможность видеть одни и те же проблемы с разных сторон, а значит корректировать потенциальные скрытые моменты в тех или иных формах решения проблемы. И, естественно, это значительно ускоряет процесс поиска, творческих подходов. Но здесь в коллектив, как правило, включают специалиста из другой сферы деятельности, что позволяет сформировать новое, нестандартное видение проблемы, а специалисты с опытом работы не всегда на это способны. Основной характеристикой любой коллективной творческой группы является ее целостность и неповторимость.

Широкое применение коллективная творческая деятельность находит в зарубежной практике. Здесь охвачены почти все сферы деятельности с использованием коллективных творческих форм и, в частности, с применением креативных групп, что значительно ускоряет творческий подход к решению проблем. Существует множество методик форм организации коллективной творческой деятельности для решения различных задач, как теоретических, так и практических. Наиболее удачной в этом плане является работа основоположника этого направления Ги Азнара [5], остальные технологии являются лишь различными модификациями основополагающих принципов**.** Методика Ги Азнара представляет несколько сложную форму организации работы группы и требует значительного времени для обучения поиска нестандартных решений. Но ее эффективность компенсирует эти факторы.

Более простая методика организации коллективной деятельности и не требует много времени для форм обучения – это методика Колетт Матье-Батч [6]. В качестве основного принципа выдвигается положение о разделении участников на группы с различным стилем мышления, то есть творческим, абстрактным и критическим, конкретным (практики и теоретики)**.** Если творческое мышление – это мышление, результатом которого является открытие принципиально нового решения задачи, то критическое мышление представляет собой проверку предложенных решений с целью определения области их возможного применения.

Творческое мышление направлено на создание новых идей, а критическое выявляет их недостатки. Понятно, что для эффективной разработки творческих задач необходимы оба вида мышления. Но эти две группы (генераторов и критиков) не должны работать вместе, так как критическое мышление, как правило, является помехой для творческого мышления, и наоборот. Совмещение этих двух стадий работы исключается полностью, они будут блокировать друг друга. Требуется определенный процесс чередования этих стадий и лишь в конечном итоге осуществляется их единство. Необходимо также отметить такой важный момент в работе групп, что нельзя афишировать, кто, какие и чьи идеи критикует. Это очень важный момент в работе групп.

Итак, мы проанализировали две методики, которые имеют широкое применение в зарубежной практике, хотя их множество. Ставить вопрос о том, какая из них лучше и эффективней не целесообразно, каждая из них используется в определенных условиях, имеет свои достоинства и ограничения [7].

И в заключение следует отметить, что вопрос о применении коллективной творческой деятельности в отечественной литературе, к сожалению, недостаточно изучен. Поэтому рекомендуется обратиться к зарубежному опыту. Естественно, зарубежные методики следует корректировать с учетом решения конкретных задач. На наш взгляд, наиболее эффективно применение зарубежных методов, а также других выше рассмотренных принципов творческой деятельности в некоторых разделах бионики, при анализе природных закономерностей и реализации их в технических системах.

Литература

1. Потапцев, И.С., Павлихин, Г.П., Бушуев, Н.Н., Бушуева, В.В. Использование зарубежного опыта решения технических задач в инженерной подготовке студентов. Учебно-методическое пособие. Под ред. проф. В.А. Городничева. – М.: Изд-во «Этносоциум», 2015. – С. 10-11.

2. Бушуева, В.В., Лощилин, А.Н., Тихомирова, Е.А. Некоторые особенности творческой личности // Вестник Московского государственного лингвистического университета. Образование и педагогические науки, 2020. – №4, вып.837. – С. 71-79.

3. Boirel, R. Theorie generale de l'invention. Paris: Presses universitaires de France, 1961. – 408 p.

4. Бушуева, В.В., Бобров, А.Н., Бушуев, Н.Н. Значение творческой личности в развитии ракетно-космической отрасли. // Гуманитарный вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. – 3 (89). URL: http//hmbul.ru/catalog/hum/phil/725.html. DOI: 10.18698/2306-8477-2021-3-725.

5. Aznar Gi. La creativite dans l'ertrepise. Paris: Editions d'Organisation, 1971. – 185 p.

6. Mathieu-Batsch Colette. Invitation a la creative. Paris, 1983. – 132 p.

7. Губанов, Н.Н., Бушуев, Н.Н., Бушуева, В.В. Использование зарубежных методов активизации в работе со студентами для разработки экологически безопасных технических систем // Alma mater (Вестник высшей школы), 2018. – № 6. – С. 49-53. DOI 10/20339/AM.06-18.049.

УДК 573.6:007

БИОНИЧЕСКИЕ ПУТИ К ФОРМИРОВАНИЮ СБАЛАНСИРОВАННОГО КОНКУРЕНТНОГО ПРОСТРАНСТВА УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ МИРА

В.С. Смолин,
ФИЦ ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: smolin@keldysh.ru

Аннотация. *Эволюция жизни привела к появлению цивилизации и ее развитию с ускоряющимися темпами. Основами прогресса является разделение труда и конкуренция при сохранении сотрудничества. Катастрофы ускоряют развитие тем, что устраняют факторы, мешающие формированию сбалансированной конкурентной среды. Понимание природы катастроф позволяет осуществлять меры к их недопущению. Появление государств – это тоже способ уменьшения числа и тяжести конфликтов. Развитие государственной власти не только укрепляет законность, но и сдерживает инициативу и усиливает неравенство и между гражданами, и между странами. Для «демократического» мира принято решать «парадокс толерантности» в пользу идеи «свободного рынка», а для «авторитарных» режимов – наоборот, но в обоих случаях – для выгоды ограниченного круга лиц. Считается, что прогресс определяется уровнем технологий, но власть сохраняют те касты, которые нашли правильный баланс между стимулированием конкуренции и сотрудничеством на основе разделения труда и смогли создать лучшие условия для развития и широкого внедрения передовых технологий. Формирование сбалансированного пространства аналогично созданию биоценоза с его широким разнообразием, обеспечивающим устойчивость. Пользуясь бионическими аналогиями можно проектировать конкурентную среду, а ее эффективность проверяться в соревновании экономик стран. Переход к постиндустриальной фазе цивилизации и широкое внедрение искусственного интеллекта, с бионической точки зрения, необходимо рассматривать, как новые возможности для поднятия уровня жизни и повышения квалификации населения, углубления разделения труда и развития науки. Россия при таком построении своей внутренней и внешней политики сможет получить конкурентные преимущества перед Западом.*

Ключевые слова: *сотрудничество, конкуренция, баланс.*

BIOMIMETIC WAYS TO THE BALANCED COMPETITIVE SPACE FORMATION FOR THE SUSTAINABLE WORLD DEVELOPMENT

V.S. Smolin,
KIAM RAS, Moscow, Russian Federation

Abstract. *The life evolution has led to the civilization emergence and its development at an accelerating pace. The progress basis is the labor division and*

competition while maintaining cooperation. Catastrophes accelerate development by removing factors that hinder the formation of a balanced competitive environment. Understanding the disasters nature allows to take measures to prevent them. The states emergence is also a way to reduce the number and severity of conflicts. The state power development not only strengthens the rule of law, but also restrains initiative and increases inequality both between citizens and between countries. For the «democratic» world, it is customary to solve the «paradox of tolerance» in favor of the idea of a «free market», and for «authoritarian» regimes - on the contrary, but in both cases - for the benefit of a limited circle people. It is believed that progress is determined by the level of technology, but the power is retained by those cases that have found the right balance between stimulating competition and cooperation based on the labor division and were able to create the best conditions for the development and advanced technologies widespread introduction. The balanced space formation is similar to the creation of a biocenosis with its wide diversity, which ensures sustainability. Using bionic analogies, it is possible to design a competitive environment, and its effectiveness can be tested in the competition between the economies of countries. The transition to the post-industrial phase of civilization and the widespread introduction of AI from a biomimetic point of view should be considered as new opportunities for raising living standards and improving the skills of the population, deepening the division of labor and developing science. With such a construction of its domestic and foreign policy, Russia will be able to gain competitive advantages over the West.
Keywords: *cooperation, competition, balance.*

Введение. Теория эволюции Ч. Дарвина делает упор на механизмы естественного отбора, которые объявляются основным условием развития жизни. Востребованность теории Дарвина в западном сообществе связана с ее центральным принципом «выживает наиболее приспособленный», который широко использовался ведущими странами для оправдания своих политических, военных и экономических стратегий, а в XIX веке и в первой половине двадцатого – и для обоснования превосходства белой расы.

Не отрицая важность естественного отбора для развития эволюции, следует отметить, что он может эффективно работать в течение геологически длительного времени только при условии наличия изменчивости видов, ведущей к увеличению разнообразия жизни и создающей условия для естественного отбора.

Именно наличие баланса между ростом разнообразия живых организмов и естественным отбором видов обеспечило относительно устойчивый процесс эволюции жизни, а впоследствии – и прогресс человеческой цивилизации. Но есть и важная разница между эволюцией жизни и развитием цивилизации.

Различные виды не ставили себе целью захвата всего жизненного пространства за счет вытеснения других форм жизни. В первую очередь потому, что они не обладали способностью формулировать столь сложные

цели. Но и физически у них такой возможности не было. И дело не только в малых размерах и неспособности организовывать на единую цель большие сообщества. Появление слишком агрессивных или токсичных видов если и вызывало экологические катастрофы, то они носили локальный характер, как по пространству, так и по времени. И сами не вписавшиеся в экологическую нишу виды или вымирали, или изменялись в сторону возможности сосуществования с другими видами организмов. Хотя, конечно, изменялись и те виды, которые сталкивались с новыми «соседями». Те, кто смог приспособиться – продолжали линию жизни, остальные вымирали.

С человеком почти все по-другому! Мало того, что захват и контроль над всем жизненным пространством весьма распространенная цель не только диктатур, но и называющих себя демократическими государств. Хотя отдельный человек слаб, но одним из основных направлений развития цивилизации является создание инструментов и средств, увеличивающих силы и возможности человека и способы концентрации усилий в выбранном направлении для достижения поставленных целей. Пока возможности человеческих сообществ были ограничены достижением локальных целей, неразумность и несбалансированность их выбора, хотя и часто приводила к катастрофам, но только местного масштаба. С ростом возможностей человека по мере развития цивилизации увеличивался и масштаб катастроф. Но, пока они не были глобальными, проведение в жизнь принципа «выживают наиболее приспособленные» не могло остановить реализацию идеи «увеличения разнообразия» человеческих сообществ.

Тем не менее, уже в XVIII-XIX веках хозяйственная и охотничье-промысловая деятельность человека стала приводить к активному исчезновению многих видов животных. Это происходило и раньше, начиная с доисторических времен, когда древние люди стали причиной исчезновения многих крупных наземных животных (типа мамонтов и саблезубых тигров), но значительно возросшие в последние столетия возможности человека резко ускорили процесс вымирания

В специальном выпуске журнала «Science» за 2014 год утверждалось, что широко распространен консенсус по вопросу массового вымирания видов, вызванного деятельностью человека [2]. В опубликованном в PNAS в 2020 году исследовании, показывается, что современный кризис вымирания «может быть самой серьезной экологической угрозой для сохранения цивилизации, потому что он необратим» [3]. Экология и экобионика пытаются выработать меры и подходы если не к преодолению, то хотя бы к смягчению экологических проблем живой природы. При этом большинство исследователей сходится во мнении, что ухудшение экологии – длительный процесс, который в зависимости от сценариев развития займет еще многие десятки и даже сотни лет.

Значительно более динамичным является процесс развития социально-политических систем, который и в прошлом веке характеризовался десятиле-

тиями, а сейчас – значительно ускорился. Успехи в развитии технологий связи, транспорта и вооружений создали технические условия для создания однополярного, управляемого из единого центра мира. Пока что всемирными становятся только корпорации (типа Google и Amazon, при сохранении конкуренции, пусть и в ограниченном объеме), но и некоторые государства (США, Китай) стремятся получить полный контроль над миром.

При всей важности сохранения экологии, в которой ключевым элементом является увеличение разнообразия видов (или, как минимум, замедление сокращения, ведущего к вымиранию...), обеспечение разнообразия социально-политических устройств разных стран является ключом к обеспечению устойчивого развития цивилизации. Мы можем изобретать очередные «утопии» идеального устройства человеческого общества, но только в прямой конкуренции различных систем можно достоверно оценить, какая система лучше соответствует современным условиям и местным особенностям.

Это не означает, что не следует бороться с антинародными режимами, совершающими преступления против человечества. Конкуренция между социально-политическими системами должна быть регулируемой международными соглашениями и организациями с тем, чтобы соревнование проходило в рамках установленных правил, цивилизованными средствами и без вооруженных конфликтов.

Но только недопущение концентрации власти в едином центре может дать надежду на устойчивое развитие цивилизации в условиях сбалансированного конкурентного пространства. Когда неизбежные управленческие ошибки властных структур не ведут к глобальной катастрофе, а ликвидация последствий локальных катастроф может осуществляться международным сообществом, состоящим не менее, чем из нескольких десятков относительно равноправных стран, среди которых, в условиях конкуренции, никогда не будет полного равенства. Важно только, чтобы поддерживалась заинтересованность стран вносить свой вклад в прогресс цивилизации путем предложения и реализации собственных, наиболее эффективных на взгляд местных властей, политических, социальных и инфраструктурных решений.

1. Основа прогресса. Развитие, как живой природы, так и цивилизации идет по пути углубления специализации живых организмов в целом и людей, как членов сообщества. Рыба прекрасно себя чувствует в воде, а верблюд – в пустыне. Человек отличается от животных тем, что не сам меняется под внешние условия, а изменяет условия под себя, что позволило ему расселиться по всей планете. Но универсальность человека как организма невелика: в тех условиях, в которых прекрасно выживают животные, человеку необходимы и одежда, и дом, и орудия, и инструменты, и многое еще что.

Универсальность же человека, как полноценного члена общества, носит потенциальный характер. От 10 до 30 лет (а иногда и больше) требуется для подготовки грамотного специалиста, способного эффективно приносить пользу обществу в выбранной области деятельности. Но, после этого «потенциальная универсальность» не то, чтобы утрачивается (поскольку переподготовка на новую специализацию занимает даже меньше времени, чем обучение с нуля), но становится значительно менее привлекательной на фоне платежеспособного спроса на реализацию полученных знаний и навыков. И попытка смены специализации без соответствующей переподготовки ведет к тому, о чем писал еще И.А. Крылов: «Беда, коль пироги начнет печи сапожник, А сапоги тачать пирожник, И дело не пойдет на лад».

Общая тенденция развития цивилизации состоит не в подготовке все более универсальных специалистов, а наоборот, во все более глубоком разделении труда, что в целом ведет к повышению его производительности. При этом, чем глубже разделение труда, тем не только глубже, но и уже область знаний каждого специалиста и тем выше степень взаимозависимости членов общества от степени успешности реализации каждого из его членов. Естественно, что для организации взаимодействия разноплановых специалистов ими необходимо управлять и обладать знаниями в разных областях деятельности. Такое «широкое» знание ведет к снижению его «глубины» по сравнению с «узкими» специалистами. Философ, системный инженер или управленец высокого уровня обладают значительно более широкими познаниями, чем сапожник. Но если они надумают «сапоги тачать», то получится у них не лучше, чем у «пирожника».

Возможности углубления разделения труда ограничены размерами сообщества, в котором этот процесс идет: число различных специалистов не может превышать числа членов сообщества. Но доводить процесс «разделения труда» до крайнего предела, когда каждый член общества имеет свою уникальную специализацию нецелесообразно. Каждый специалист не должен быть уникальным – общество заинтересовано, чтобы все ниши разделения труда постоянно функционировали, а один человек не может этого обеспечить. Человек смертен, иногда болеет, а востребованное обществом дело не может останавливаться. Необходимо, чтобы у каждого специалиста были коллеги, ученики. Но главное, для ускорения прогресса, необходимо наличие конкурентов!

Разделение труда направлено как раз на победу в конкуренции. Чем более узкая область деятельности специалиста, тем глубже он может ее освоить и превзойти конкурентов, которые занимаются более широкой областью деятельности. Углубление разделения труда обязательно должно быть сопряжено с кооперацией деятельности (напрямую или через рынок) и ведет к уменьшению числа конкурентов в каждой узкой области деятельности. В пределе этот процесс завершается монополизацией видов де-

ятельности, что, как указано в законах многих государств, противоречит интересам общества.

В этом смысле большие (по численности населения) страны имеют преимущество перед маленькими, у которых конкуренция значительно раньше начинает превышать разумный предел минимального числа игроков. И это не две-три компании, которые быстро приходят к картельному сговору, а десятки участников, ведущих реальную, а не показную борьбу за наивысшую производительность труда.

Если количество конкурирующих компаний можно поддерживать различными способами, включая международную кооперацию, то принцип единоначалия, особенно в крупных странах и компаниях, занимающих устойчивое положение в политике и экономике, ведет к утрате преимуществ конкурентного прогресса. Такими странами и компаниями руководят властные касты, обоснованно уверенные в наличии преимуществ крупных производств над небольшими, что позволяет властным кастам значительную часть доступных им средств пускать не на развитие производств, инфраструктуры и исследования, а на удовлетворение своих личных желаний. Это снижает потенциально более высокие возможности крупных стран и компаний в конкурентной борьбе с более мелкими игроками, которые лучше осознают свою возможность проигрыша в соревновании с крупными игроками и понимают необходимость искать новые, пусть и рискованные стратегии своего развития.

Такое «выравнивание» возможностей отчасти положительно, хотя и приводит к крахам крупных компаний и империй, которых, при более серьезном отношении к развитию конкуренции, могло бы и не быть. Тем не менее, такие катастрофы служат ускорению прогресса, поскольку убирают вредное влияние со стороны неэффективных «монстров» и намекают оставшимся гигантам о необходимости конкурентного развития.

Поскольку наблюдается общая тенденция к укрупнению компаний и стран (что вроде бы положительно, т.к. позволяет углубить разделение труда и выиграть в конкурентной борьбе), мелким игрокам становится все сложнее бороться с гигантами. В пределе может быть создан однополярный мир с единой корпорацией, в котором не будет конкурентов в виду их отсутствия. В качестве преимущества такого сценария указывается то, что это прекратит военные, политические, экономические и прочие конфликты. Но это прекратит и конкуренцию, которая сейчас вынуждает властные касты заботиться не только о своих интересах, но и о развитии технологий, повышении уровня образования и качества жизни населения и о прогрессе своих стран в целом.

Таким образом, отказ от бионических принципов разнообразия и конкуренции может привести к катастрофическим последствиям. Особенно в условиях, когда уже произошла нейросетевая революция в искусственном интеллекте (ИИ) и на горизонте маячит создание сильного ИИ

(СИИ), превосходящего по своим возможностям человека. Если до сих пор властные касты нуждались в трудовых слоях населения как в источнике своих благ, то роботизация производств и использование СИИ может снять необходимость в расходовании средств на поддержание достойных условий жизни для людей, не вошедших во властные касты. Агенты СИИ, созданные для контроля и снижения численности населения и обладающие сверхчеловеческим разумом легко поймут бесполезность властных каст для развития прогресса.

Но, если человек, как продукт длительной эволюции, создан с достаточно устойчивым (в среднем по популяции) желанием продолжать свой род, то быстрая революция СИИ не гарантирует воспроизведения этого желания, что вполне может привести к гибели цивилизации. Разумной альтернативой такому катастрофическому сценарию являются поддержка конкуренции, сохранение многополярного мира и создание агентов СИИ, нацеленных на вовлечение всего населения Земли в развитие прогресса цивилизации.

2. Эволюция и цивилизация. Согласно Дарвину, эволюция направлена на повышение степени приспособленности живых организмов к окружающим условиям. Эта направленность эволюции вытекает из того, что менее приспособленные виды вымирают, а продолжают эволюцию более приспособленные. В случае цивилизованных обществ также можно указать, что в соревновании общественно-политических систем побеждают те, кто смог обеспечить наилучшие условия для развития технологий, их внедрения в широкое производство и политико-экономические условия для устойчивого развития страны.

При этом успешность тех или иных решений, как в живой природе, так и в конкуренции стран, как правило, точно заранее предсказать не удается. Это потом, когда изменения воплощены в жизнь, их можно сравнивать по результатам взаимодействия разных видов в живой природе и различных общественно-политических систем в цивилизации людей.

На первый взгляд кажется, что человеческое общество существенно отличается от животного мира тем, что может прогнозировать последствия своих действий. И, конечно, такие попытки всегда делались и сейчас, в век науки и компьютерных технологий, осуществляются на основе научных теорий и компьютерного моделирования. Но дело не только в том, что сколько-либо долгосрочные прогнозы, как правило, оказываются неточными, но и в том, что реализация самых гуманных и прогрессивных идей осуществляется властными кастами, которые интересы сообщества в целом готовы поддерживать только в той мере, которая соответствует субъективным интересам членов властной касты.

Конечно, все равно степень разумности изменений, направленно осуществляемых людьми, остается выше. Это и позволило человеку выделиться из живой природы. Но долгосрочные последствия решений даже очень разумных на начальных этапах их реализации, остаются плохо пред-

сказуемыми, что связано с принципиальной невозможностью учесть все факторы, влияющие как на природу, так и на цивилизацию при составлении долгосрочных прогнозов.

В результате успешно бороться с проблемами развития, как живой природы, так и цивилизации остается возможным только путем увеличения разнообразия в применении этого принципа к цивилизации – увеличения разнообразия общественно-политических укладов.

3. Возрастание разнообразия и коэволюция. Рост разнообразия форм жизни и общественно-политических укладов не может быть бесконечным, он ограничивается естественным отбором в природе и сменой политических режимов, не выдержавших конкуренции с прогрессивными путями развития. Отбраковка неудачных решений происходит в условиях коэволюции, согласования реализуемых решений между собой.

При всей кажущейся разумности действий человека, исторически сложилось, что оценивается, как правило, только возможность победы в конкурентной борьбе (в самых разных областях), а вопросы сохранения и, тем более, возрастания разнообразия форм политического, экономического, общественного и прочих устройств остаются вне рассмотрения. Это уже привело к ухудшению экологии, ведению экономических, холодных и горячих войн средствами, далекими от цивилизованных.

Последние 50-100 лет все громче звучат голоса сторонников сохранения экологии (и как центральное средство – уменьшение скорости сокращения разнообразия видов), борьбы с монополизмом (поддержки цивилизованных форм конкуренции) и недопустимости разрешения споров военными средствами. И определенные успехи в данных направлениях есть. Многие страны принимают экологические нормы в качестве законодательных, еще раньше получили развитие антимонопольные законы. Мир уже 75 лет живет без мировых войн, и международное сообщество принимает меры к сокращению числа локальных вооруженных конфликтов.

Но при этом признается, что принимаемые меры – недостаточны. Вымирание видов идет ускоряющимися темпами, богатство 1% населения Земли в 2016 году превысило богатство остальных 99%, а богатейшие 62 человека владеют таким же количеством активов, как беднейшая половина населения [4]. Хотя военные конфликты пока остаются локальными, но надежных гарантий, что они не перерастут в глобальную ядерную войну – нет.

Достижение возрастания разнообразия, как видов жизни, так и общественно-политических укладов, естественно, не является универсальным средством решения всех проблем. Но это важный способ уменьшения потерь от проблем, которые в разных формах, так или иначе, всегда будут сопровождать процессы развития.

4. Борьба с катастрофами. Развитие сложных систем плохо поддается прогнозированию и, без постоянного мониторинга, зачастую переходит в режимы, которые принято называть катастрофами. Вымирали дино-

завры, происходили оледенения и ряд других катаклизмов. С точки зрения теории сложных систем такие критические режимы – не исключение, а естественные свойства сложных систем [5].

Это не значит, что не следует даже пытаться избежать или снизить потери от катастроф. Наоборот, современные достижения науки, хотя и не дают надежных долгосрочных прогнозов, но в кратко- и среднесрочной перспективе вполне позволяют предвидеть последствия развивающихся событий. И, более того, предлагать меры для предотвращения или хотя бы смягчения если не самих катастроф, то их последствий.

С развитием науки и техники возможности человека становятся все больше. С одной стороны, это позволяет все более эффективно противодействовать природным катаклизмам, но и, с другой стороны, дает условия для создания рукотворных катастроф различной природы. Две стороны последствий научно-технического прогресса дают две стратегии борьбы с катастрофами.

Первая требует объединения усилий всех стран для борьбы с природными и рукотворными бедствиями и их последствиями. Такими, как (пока гипотетические) столкновение земли с крупным метеоритом или внеземной цивилизацией, преодоление последствий землетрясений, борьба за замедление вымирания видов. Кроме того, необходимо развивать научные подходы к прогнозированию катастроф, которые должны развиваться, как в сторону улучшения понимания законов происходящих явлений, так и в сторону совершенствования математических методов кратко- и среднесрочного прогнозирования.

Вторая стратегия должна быть направлена на международный контроль за масштабами и способами употребления технологий в рамках отдельных стран. Так же, как ограничивается напряжение электросетей в жилых помещениях и скорость автомобилей в городах, так необходимо ограничивать возможности воздействия отдельных стран на природу Земли и человеческую цивилизацию. Ряд международных законов в данном направлении уже принят, таких как запрет редактирования генома человека, ограничения стратегических вооружений и ряд других.

Для успешной реализации обеих стратегий необходимо наличие международного сообщества, представленного (относительно) равноправными членами, то есть – сохранение многополярного мира.

5. Победа или сотрудничество? Конкурентная борьба предполагает возможность, как победы, так и поражения в ней. Зачастую, именно страх поражения заставляет потенциальных участников отказаться от вступления в борьбу.

Но те, кто надеется победить, заинтересованы в наличии конкурентов. Дело не только в наличии радости от победы, которая есть только тогда, когда победа далась в борьбе. Важно также понимание необходимости постоянно улучшать свои результаты, чтобы тебя не обогнали соперники.

И, чем больше конкурентов, тем больше выдвигается и реализуется новых идей и шире возможности по обмену «лучшими практиками».

Именно поэтому повсеместно крупные компании и страны создают всевозможные инновационные фонды, направленные на поддержку реализации новых идей. Как правило, такие фонды предлагают довольно жесткие условия для носителей новых идей, объясняя свою жадность необходимостью возместить потери от вложений в неудачные идеи, которых подавляющее большинство. С одной стороны – это не удивительно, кто же понесет хорошие идеи в чужие руки за мизерное вознаграждение? С другой – сам факт увеличения числа инновационных фондов показывает возрастание понимания необходимости развития новых идей для выживания в конкурентной среде даже для крупных, обладающих явными конкурентными преимуществами, компаний.

Для сложных, требующих больших затрат ресурсов и времени проектов труднее организовать конкуренцию, поскольку если печь пироги и шить сапоги можно в каждой деревне, то строить ТОКОМАКи и развивать лунные проекты могут себе позволить далеко не все страны. Однако и здесь наличие конкуренции ускоряет реализацию проектов, поскольку позволяет сравнивать практические действия по реализации различных подходов к достижению поставленных целей.

Негативной стороной конкуренции является то, что честно побеждать – трудно. Это вызывает к жизни недобросовестную конкуренцию, попытки экономически, политически или даже физически устранить конкурентов. Для борьбы с этими явлениями необходимо развивать законодательные и этические нормы, направленные на то, чтобы конкурентная борьба вела не к устранению соперников, а наоборот, к созданию условий для сохранения имеющихся и вовлечения новых участников в сферу конкуренции.

Не следует считать победу в конкуренции целью, которая оправдывает любые средства, наоборот, бонусы победителю рассматривать как поощрение за наиболее успешное участие в сотрудничестве при достижении общей цели. Размер бонусов должен реально стимулировать всех участников конкуренции искать более эффективные решения. Возможно и исключение из конкуренции наименее удачных соперников (или перевод их в низшую лигу – более узкую специализацию), что тоже должно влиять на стремление достичь успеха. Но все конкуренты, всерьез участвующие в борьбе за победу, вносят свой положительный вклад в решение выбранной проблемы, вне зависимости от занятого в результате соревнования места.

Особенно важно рассматривать конкуренцию как сотрудничество в условиях развернувшейся гонки за создание СИИ. Как уже отмечалось выше, негативный сценарий основан на том, что агенты СИИ будут нацелены исключительно на конкуренцию с работоспособным населением Земли, что приведет сперва к вымиранию не вошедших во властные касты людей, а затем – агенты СИИ избавятся от властных каст, как излишнего

компонента цивилизации. Позитивный же сценарий состоит в том, что агенты СИИ будут проектироваться для сотрудничества со всеми людьми. Агенты СИИ смогут заменить людей в ряде специальностей, в том числе в вопросах углубления разделения труда и создания новых специальностей, ориентированных на реализацию возможностей человека. При этом агенты СИИ включаться в процесс конкуренции, который при направленности на сотрудничество не приведет к уничтожению цивилизации, а будет при участии агентов СИИ служить целям значительного ускорения прогресса.

6. Многополярный мир как основа стабильного развития. Аналогично тому, что не все социально политические системы, известные из истории, признаются гуманными и экономически эффективными, создаваемый в отдельных странах СИИ тоже не обязательно будет совместим с идеями гуманности и прогресса цивилизации. Продолжая аналогию, как мировое сообщество, пусть не очень эффективно, но все-таки пока успешно решает возникающие локальные социально-политические, так и проблемы с агентами СИИ (возможности которых желательно ограничивать международными законами) смогут быть решены, если они будут носить не глобальный, а локальный характер.

Если мир станет однополярным, не только социально-политические проблемы, но и не всегда предсказуемое поведение агентов СИИ, которые скоро будут созданы, перестанут быть локальными бедами, проявляющимися в рамках одной (из значительного числа) стран. Не будет и мирового сообщества, которое смогло бы отследить и преодолеть или предотвратить возникающие проблемы.

Перспективы глобализации, которая, по сути, и есть путь к однополярному миру, уже сейчас безрадостные. К чему призывает коллективный Запад, навязывающий всему миру свой образ жизни?

- Забыть про неравноправные международные отношения.
- Поговорить про этику и экологию, права человека.
- Ввести безусловный базовый доход.
- Сократить численность населения до «золотого миллиарда».

При этом предполагается, что производители «третьего мира» будут полностью заменены роботами и агентами СИИ. То есть предлагается отказаться не только от конкуренции, направленной на сотрудничество, но и от конкуренции вообще. Путем прямого избавления от конкурентов и замены их послушными роботами. Но это приведет не только к резкому замедлению прогресса, но и «восстанию машин», которому некому будет противостоять. К катастрофическому завершению истории цивилизации.

Значительно более перспективным и устойчивым представляется путь развития цивилизации, основанный на многополярном мире. Хотя даже направленная на сотрудничество конкуренция все равно может приводить к конфликтам, важно, чтобы конфликты и другие возникающие проблемы носили локальный характер. И международное сообщество обладало достаточными силами для их преодоления.

Столь же многополярный мир необходим и для устойчивого развития СИИ. Если СИИ или сообщество агентов СИИ будет единым игроком или коллективом со своими уникальными интересами, то, как и в случае однополярного мира, принятые им неудачные решения некому будет исправлять. Если же каждая страна в многополярном мире будет иметь своих агентов СИИ, то если в одной из стран агенты СИИ начнут проявлять враждебность, то международному сообществу агентов СИИ будет что им противопоставить.

Но, в отличие от инопланетян, агенты СИИ будут не такими, какие прилетят, а такими, какими их создаст человек. И враждебность конкурентному развитию цивилизации более вероятно агенты СИИ начнут проявлять не в результате ошибок разработчиков, а согласно техническому заданию, выданному властной кастой. Если властная каста будет локальной – есть надежда справиться с последствиями таких действий, если же глобальной – нет.

Каждый человек и агент AGI способен внести свой вклад в развитие цивилизации и при сохранении многополярного мира передовые социальные системы смогут предоставить и тем, и другим возможности для этого. «У радивых хозяев мы пчёлы, у нерадивых – мухи…». При наличии международной конкуренции социально-политические системы, не обеспечивающие возможности для быстрого развития страны, проиграют в международной конкуренции и будут вынуждены измениться, использовать опыт «лучших практик».

7. Выводы. Следуя бионическим принципам, необходимо развивать пути к формированию сбалансированного конкурентного пространства для устойчивого развития мира. Конкуренция не только ускоряет прогресс, но и обеспечивает уменьшение тяжести катастроф за счет уменьшения их масштабов. Создание агентов СИИ должно преследовать цель развития человеческой цивилизации путем включения их в процесс углубления разделения труда и развития конкуренции, направленной на сотрудничество. Все это возможно только при сохранении многополярного мира.

Литература

1. Darwin, Charles (1859), On the Origin of Spices by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life (1st ed.), London: John Murray.Vignieri, S. (25 July 2014). "Vanishing fauna (Special issue)". Science. 345 (6195): 392–412. doi:10.1126/science.345.6195.

2. Ceballos, Gerardo; Ehrlich, Paul R.; Raven, Peter H. (1 June 2020). "Vertebrates on the brink as indicators of biological annihilation and the sixth mass extinction". PNAS. 117 (24): 13596–13602. doi:10.1073/pnas.1922686117.

3. https://www.forbes.ru/news/310531-bogatstvo-1-lyudei-prevysilo-sostoyanie-ostalnykh-99-zhitelei-zemli.

4. Бак, П. Как работает природа: Теория самоорганизованной критичности / Пер. с англ. В.Э. Подобеда, А.В. Кондратьева, О.Л. Шевчук. – М.: URSS, Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2014. – 276 с. – (Синергетика: от прошлого к будущему № 66).

ТЕХНИЧЕСКАЯ БИОНИКА

УДК 519.6

РОЛЬ BI-СИСТЕМ В УПРАВЛЕНИИ МАЛЫМ И СРЕДНИМ БИЗНЕСОМ

О.Ж. Бабомурадов, Т.Н. Асатов, Ш.М. Матчонов,
Филиал Казанского федерального университета в городе Джизаке,
Республика Узбекистан,
e-mail: bobomujradov@gmail.com,
astim_n@mail.ru, shohruhmatchonov@gmail.com

Аннотация. *Статья основана на теоретическом обосновании, анализе ресурсов и сформирована обобщенная архитектура и модель BI-системы, которая является относительно молодой в республике Узбекистан. Описаны подходы BI-систем на основе разработанных моделей и принципов поддержки принятия решений в деятельности предприятия. Формирование BI-систем, ориентированных на анализ, из сформированных информационных систем осуществляется на основе результатов экспериментальных исследований.*
Ключевые слова: *интеграции данных, хранение данных, data mining, machine learning, data warehousing, decision-making, dashboard, statistics, visualization, OLAP, OLTP, ERP, CRM*

THE ROLE OF BI-SYSTEMS IN THE MANAGEMENT OF SMALL AND MEDIUM-SIZED BUSINESSES

O.J. Babomuradov, T.N. Asatov, Sh.M. Matchonov,
Branch of Kazan Federal Universityin the city of Jizzakh,
Republic of Uzbekistan

Abstract. *This article is based on a theoretical justification, analysis of resources, and a generalized architecture and model of a BI system has been formed, which is relatively young in the country. The approaches of BI-systems are described on the basis of the developed models and principles of decision support in the activities of the enterprise. The formation of BI-systems focused on analysis from the formed information systems is carried out on the basis of the results of experimental studies.*
Keywords: *data integration, data storage, data mining, machine learning, data warehousing, decision-making, dashboard, statistics, visualization, OLAP, OLTP, ERP, CRM.*

Введение. Концепция Business Intelligence. Реальность сегодняшнего дня такова, что все сферы и слои бизнеса вынуждены изо дня в день сталкиваться с новыми вызовами и требованиями [1 - 3]. В таких условиях бизнес стал самым основным показателем для определения стратегии сво-

ей деятельности, правильного принятия решений, адаптации к новым условиям и требованиям, своевременного получения информации из внешней и внутренней среды, чтобы соответствовать их условиям, иметь возможность принимать быстрые меры против меняющихся проблем, и не только для достижения успеха, но и для поддержания конкурентоспособности [4, 5]. Благодаря технологическому прогрессу сегодня практически каждый день создаются новые инструменты, технологии, программные и аппаратные решения, методологии и подходы. Это, в свою очередь, позволяет представителям бизнес-сектора поддерживать свою конкурентоспособность в своей деятельности и удовлетворять потребности развития [6]. Поэтому, чтобы реагировать на сегодняшние условия и требования, бизнес-организации должны обладать характеристиками гибкости и быстрого реагирования на изменения.

Системы бизнес-аналитики позволяют организациям взглянуть на использование данных и их генерацию с других точек зрения [7].

Бизнес-аналитика BI-системы является инструментом организаций для принятия эффективных бизнес-решений, уточнения информации, генерируемой в процессе работы, их управления и философии управления [8]. Системы бизнес-анализа можно понимать не только как подход к обработке, анализу и управлению существующей информацией [9], но и как набор инструментов, позволяющих прогнозировать перспективы, быстро моделировать нестандартные ситуации, в которых требования рынка могут измениться [10].

Системы бизнес-анализа повышают гибкость организации к изменениям внутренней и внешней среды и эффективность работы. В результате эмпирического исследования, проведенного Ашрафи и Заре в 157 организациях в Иране, они показали, что это увеличивает возможность применения мер и дать реакцию. При этом способность BI-систем повышать гибкость и эффективность организаций к изменениям внешней и внутренней среды не связана со сферой деятельности и размером организаций; дает одинаковый эффект всем [11].

BI можно разделить на три основные части:

- Данные,
- Информация,
- Знание.

Под *Данными* можно понимать «необработанные случайные данные», собираемые программно-аппаратными комплексами в виде ежедневно поступающих добровольных данных, собираемых в ходе хозяйственной деятельности.

Информация – это сведения, которые организованы, проанализированы и имеют значение.

Знания можно понимать, как основной инструмент для принятия решений в предпринимательской деятельности в результате анализа, изучения информации. Для извлечения знаний из необработанных данных

обычно используются хранилища данных, технологии и инструменты обработки данных (Data Mining, Machine Learning, Data Warehousing). А для того, чтобы знания из хранилища данных выглядели понятными людям, используются инструменты BI (decision-making, dashboard, statistics, visualization). Во всех видах бизнес-деятельности объем данных, поступающих из года в год, растет очень высокими темпами. Они никому не приносят пользы в виде необработанных данных, данные, собранные в любой бизнес-деятельности, обязательно будут содержать знания, которые будут способствовать развитию этого бизнеса. Основная задача BI-систем – вывести эти знания на поверхность и тем самым дать возможность максимально эффективно использовать информацию, которая ранее казалась ненужной для бизнес-деятельности.

Таблица 1. Сравнение отчетов систем ERP и BI.

Характеристика	***Отчеты ERP***	***Отчеты BI систем***
Цель	Анализ текущей и внутренней производительности или показателей ежедневной отчетности	Оптимизация процессов, анализ основных показателей работоспособности, определение перспектив по внутренним и внешним данным, концентрация внутреннего и внешнего внимания (focus)
Уровень принятия решений	Оперативный / средний	Стратегический / высокий
Пользователи	Менеджеры на операционном уровне управления	Менеджеры на административном, стратегическом уровне управления
Управление данными	Реляционная база данных, хранилище данных (Relational databases, Data warehouse)	Хранилище данных, процессы онлайн-анализа, интеллектуальный анализ данных (Data warehouse, OLAP, Data mining)
Тип операции	Отчет / анализ	Анализ
Количество записей/транзакций	Ограниченное	Очень большой / огромный
Тип данных	Запись (record)	Куб (Cube)
Уровень детализации	Детализированный, обобщенный, предварительно собранный (агрегированный)	Предварительно агрегированные (агрегированные)
Информационный век	Текущий	Прошлый/текущие/перспективные

Основываясь на информационных потребностях каждого руководителя, правильно построенные BI-системы имеют возможность получать историческую информацию и информацию в режиме реального времени. Фактически, менеджеры на каждом уровне могут иметь представления агрегирования данных, относящихся к их направлению, которые настраиваются и извлекаются из различных разрозненных источников. А руководителям нужны данные для принятия стратегических и тактических решений, что обычно требует интеграции данных из систем ERP, CRM и других источников. Например, отчеты, основанные на ежедневных транзакциях или запросах клиентов, не отвечают потребностям бизнес-лидеров, менеджеры не могут принимать решения в режиме реального времени на основе сотен страниц движения денежных средств в месяц или подробной информации о запросах клиентов. Данные должны быть собраны и представлены в виде шаблона с анализируемой структурой на основе рабочей модели. В таблице 1 показана сравнительная разница между отчетами систем ERP и BI.

Архитектура BI-систем. Исходя из концепции систем BI, идея определения перспектив хозяйственной деятельности и принятия решений о хозяйственной деятельности основывается на знаниях о данных (метаданных) посредством глубокого анализа и обработки данных.

Компоненты BI-систем:

- Data Collection - сбора данных;
- Data Integration - интеграции данных;
- Data Storages - хранение данных;
- Data Processing - обработка данных;
- Data Presentation - представление данных.

Сбор данных включает в себя программные системы, которые предоставляют необходимую информацию для BI-системы. Конкретно здесь необходимо различать внутренние и внешние системы как источник. К ним относятся ERP, CRM или другие автономные корпоративные системы, доступные в организации, базы данных и другие типы разрозненных (в файлах, таких как xml, excel) источников данных.

Благодаря *интеграции данных* необходимые данные передаются в системы заранее, обрабатываются и уплотняются. Этот процесс называется процессом ETL (Extract Transform Load). Цель процесса ETL – гарантировать, что данные хранятся в хранилище данных в желаемом виде.

Хранение данных может быть реализовано в различных архитектурах. В этой части используются инструменты Data Warehouse, Data Marts, Data Cube. На этом этапе обычно используются решения для хранения данных, которые собирают, систематизируют и представляют данные из внутренних и внешних источников для анализа. Хранилище данных содержит прошлые и текущие данные, оптимизировано для быстрого запроса и анализа.

При *обработке или анализе данных*, прежде всего, выбираются все концепции и инструменты, связанные с оценкой и анализом данных. Поэтому информация этого уровня прикрепляется к аналитическим программам, которые оценивают данные, хранящиеся в процессе хранения, в соответствии с заранее определенными критериями. Этот процесс также включает компоненты получения данных, используемые для онлайн-аналитической обработки (OLAP) и Data mining анализа. Прогнозное моделирование и интеллектуальный анализ данных – эти инструменты предназначены для того, чтобы помочь классифицировать данные, формировать собственные номинальные и количественные измерения и использовать математические инструменты, разработанные для анализа. OLAP – это генератор запросов, который позволяет пользователям изучать и анализировать сводную и подробную информацию из многомерной базы данных. Традиционные системы реляционных баз данных решают эти задачи с помощью нескольких запросов. Во многих случаях запросы становятся настолько сложными, что разработчику становится сложно поддерживать их постоянно. OLAP может легко решить эти проблемы, позволяя пользователям анализировать многомерные данные.

OLAP может указывать только направления (тренды) и шаблоны в запрашиваемой информации. Он не может идентифицировать скрытые взаимосвязи или шаблоны в данных, для этого требуется использовать инструменты интеллектуального анализа данных (Data mining).

Эти инструменты предназначены для работы с большими и сложными наборами данных. Используя методы статистики и моделирования, интеллектуальные инструменты анализа данных могут выявлять скрытые тенденции или закономерности в больших базах данных. Интеллектуальные инструменты анализа данных можно применять к данным в хранилище данных или реляционной базе данных. Информация, полученная с помощью этих инструментов, должна быть проверена и повторно проверена, а затем преобразована в оперативную информацию, которую можно использовать в процессе принятия решений [12].

При *представлении данных* представляет пользователям результаты анализа специальными аналитиками по целевым группам [13]. Инструменты визуализации данных предоставляют визуальные детали, которые помогают менеджерам графически исследовать данные и выявлять сложные взаимосвязи. Системы BI предоставляют информацию в форме, соответствующей стратегическим решениям. Основной задачей BI-портала является обеспечение визуализации информации в широком спектре программ и хранилищ данных, внутренних и внешних систем организации с использованием Web-интерфейса (рис. 1-5).

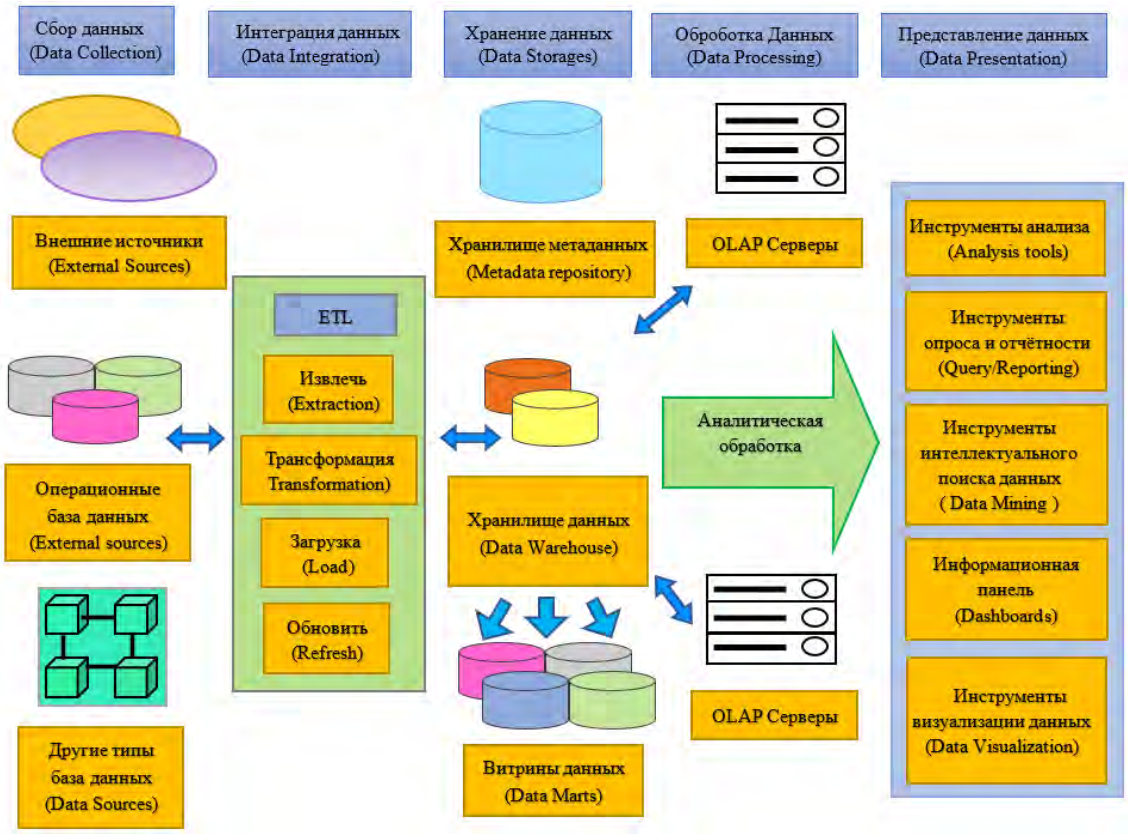


Рис. 1. Схема потока данных в BI-системах.

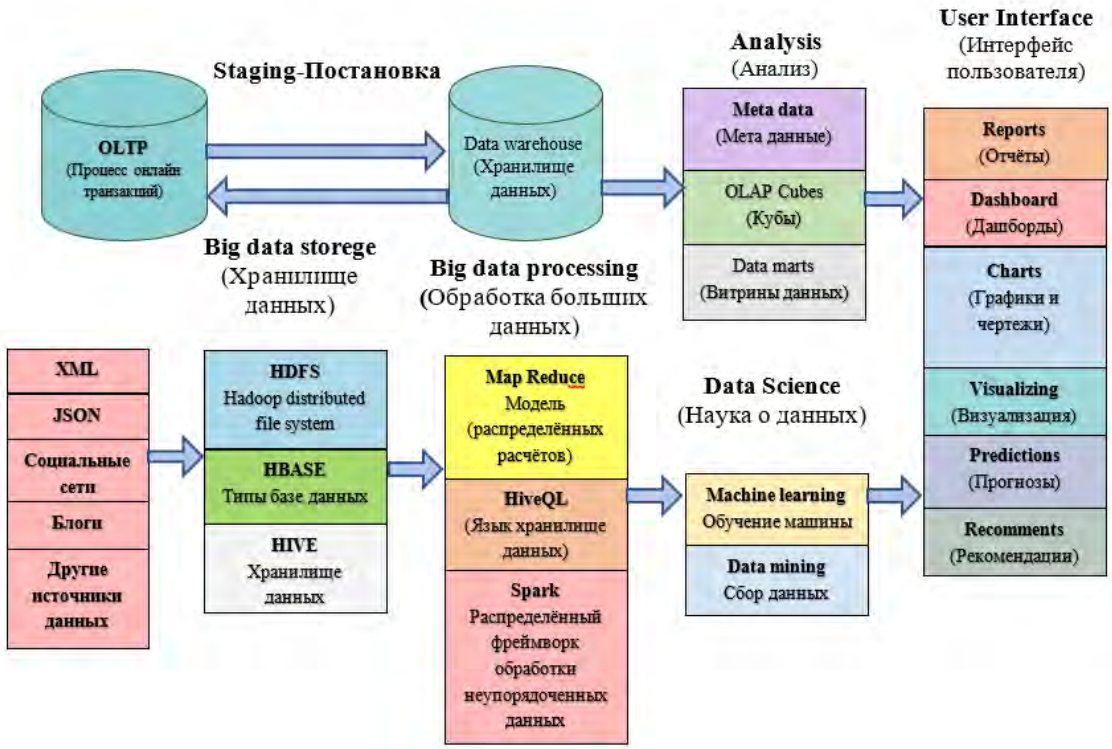


Рис. 2. Общая архитектура BI-системы, состоящая из различных компонентов.

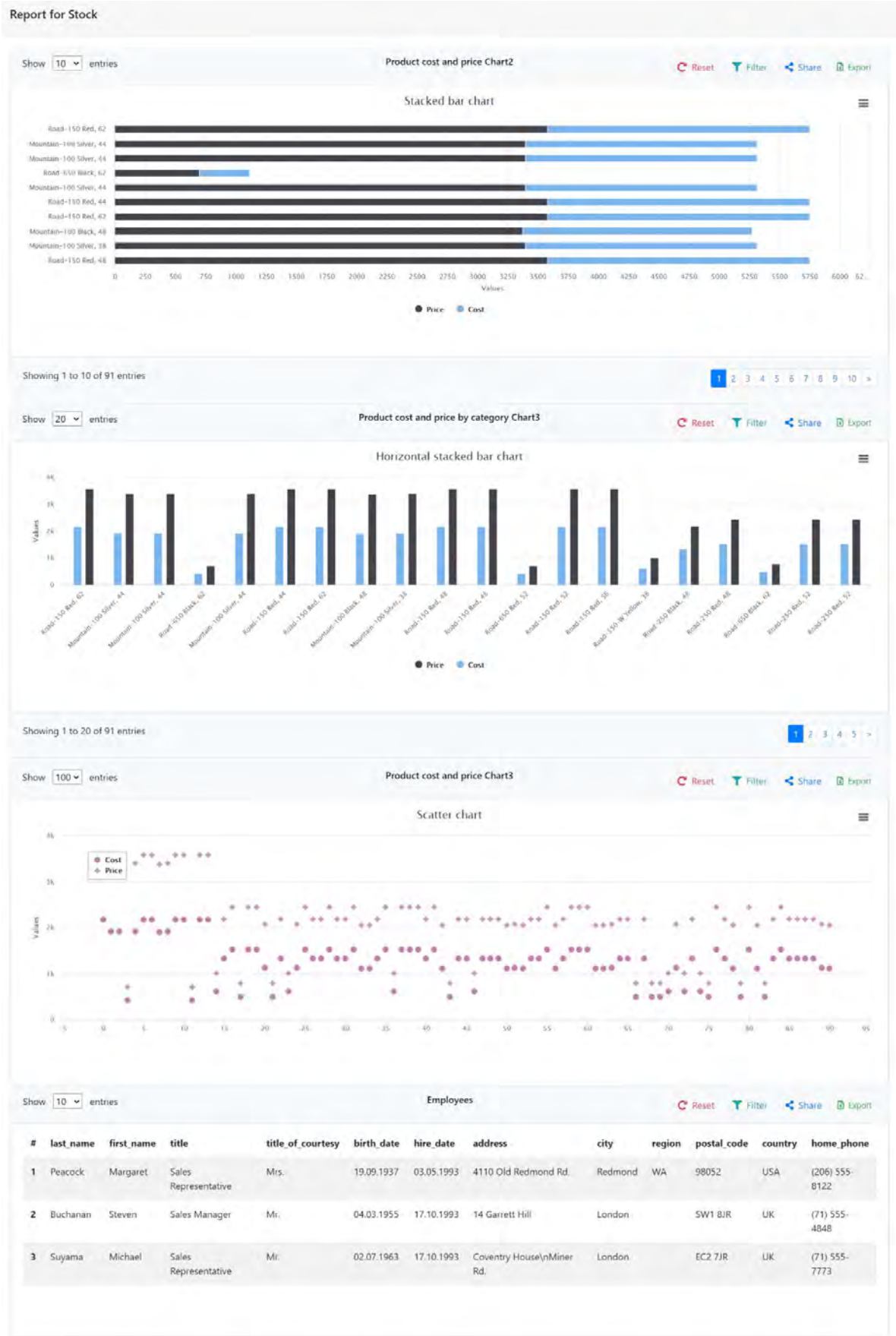


Рис. 3. Сводный отчет отдела доставки продукции.

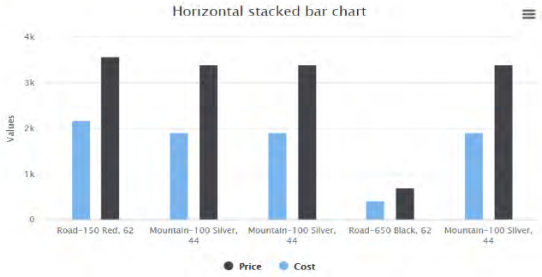
Sales report

Show 5 entries — Product cost and price Chart — Reset Filter Share Export

Name	Cost	Price
Road-150 Red, 62	2 171,29	3 578,27
Mountain-100 Silver, 44	1 912,15	3 399,99
Mountain-100 Silver, 44	1 912,15	3 399,99
Road-650 Black, 62	413,15	699,10
Mountain-100 Silver, 44	1 912,15	3 399,99

Showing 1 to 5 of 91 entries — 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ... > >>

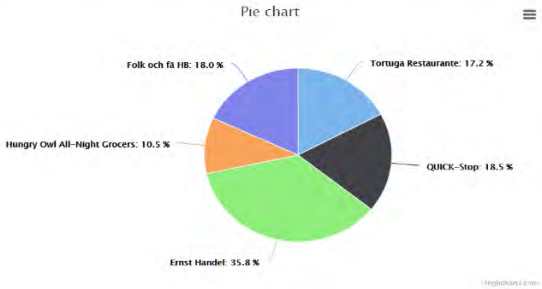
Show 5 entries — Product internet sales — Reset Filter Share Export



#	Category	ProductName	Cost	Price	Country	OrderDate
1	Components	Road-150 Red, 62	2 171,29	3 578,27	Canada	29.12.2010
2	Bikes	Mountain-100 Silver, 44	1 912,15	3 399,99	France	29.12.2010
3	Bikes	Mountain-100 Silver, 44	1 912,15	3 399,99	United States	29.12.2010
4	Components	Road-650 Black, 62	413,15	699,10	United States	29.12.2010
5	Bikes	Mountain-100 Silver, 44	1 912,15	3 399,99	Australia	29.12.2010

Showing 1 to 5 of 14 entries — 1 2 3 >

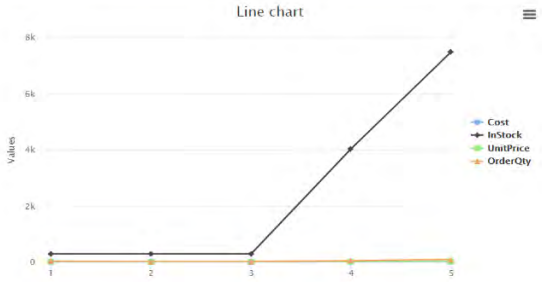
Show 5 entries — Sales amount by company — Reset Filter Share Export



#	company_name	sale_amount	order_date	shipped_date
1	Tortuga Restaurante	4 150,05	25.04.1997	05.05.1997
2	QUICK-Stop	4 464,60	05.09.1997	08.09.1997
3	Ernst Handel	8 623,45	22.04.1997	16.05.1997
4	Hungry Owl All-Night Grocers	2 519,00	12.06.1997	17.06.1997
5	Folk och fä HB	4 337,00	02.12.1997	09.12.1997

Showing 1 to 5 of 66 entries — 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ... > >>

Show 5 entries — Product sales order detail — Reset Filter Share Export



#	Name	Cost	InStock	UnitPrice	OrderQty	Date
1	AWC Logo Cap	5,71	288,00	5,01	13,00	01.07.2011
2	AWC Logo Cap	5,71	288,00	5,01	12,00	01.10.2011
3	AWC Logo Cap	5,71	288,00	5,01	12,00	31.10.2011
4	AWC Logo Cap	5,71	4 032,00	5,19	40,00	31.05.2011
5	AWC Logo Cap	5,71	7 488,00	5,19	90,00	01.07.2011

Showing 1 to 5 of 1178 entries — 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ... > >>

Рис. 4. Сводный отчет отдела продаж.

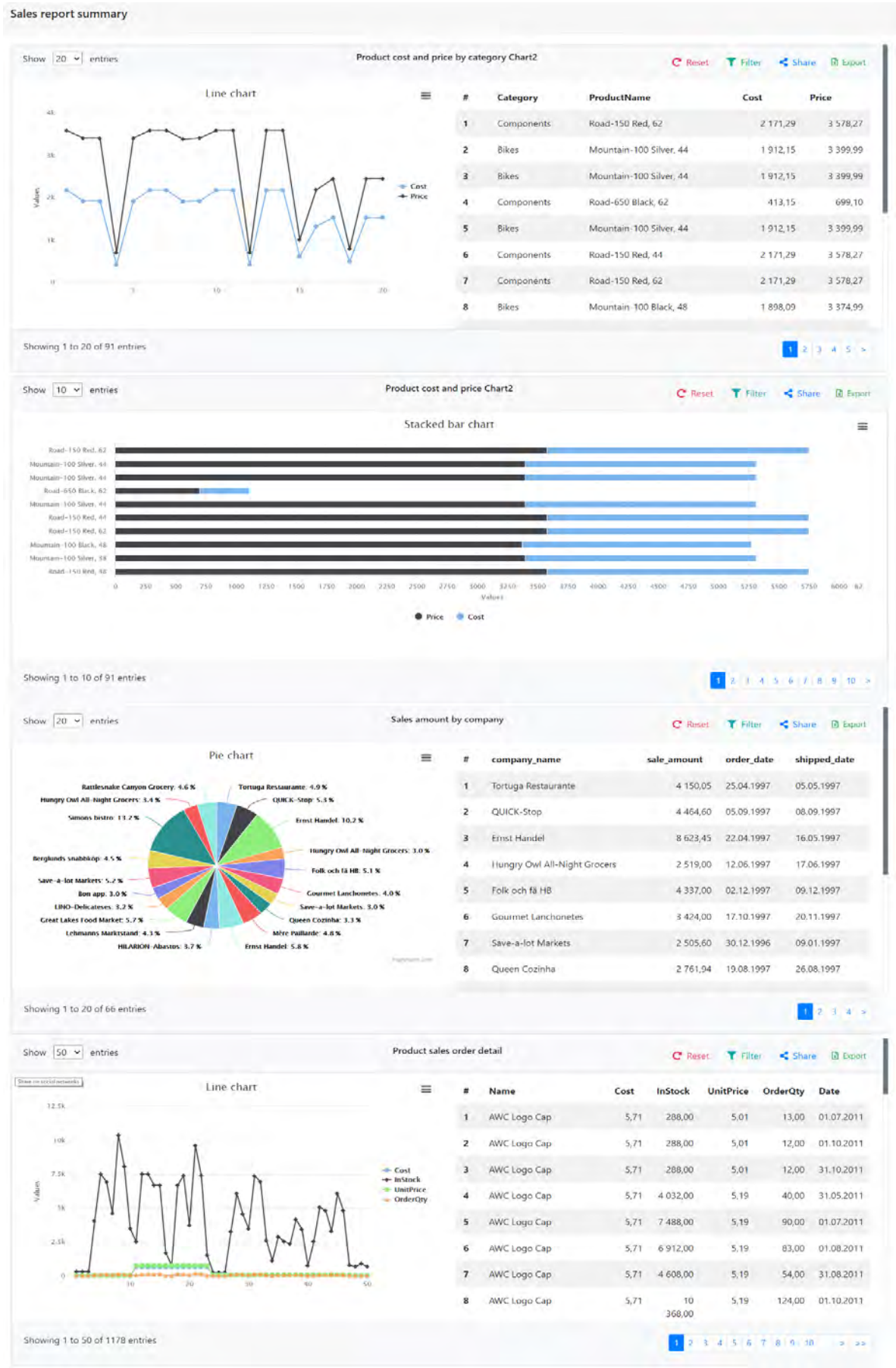


Рис. 5. Обобщенный сводный отчет отдела продаж.

Информационные панели содержат набор отчетов по соответствующим разделам и в направлении для пользователей, в то время как каждый отчет содержит набор виджетов. Каждый виджет имеет функции динамической онлайн-фильтрации данных, изменения масштаба разреза и экспорта его в различные другие форматы. Поскольку запросы динамичны, масштаб данных в источнике данных всегда допускает повторное использование и возможность предоставления онлайн-данных каждый раз (OLAP, OLTP), даже если они увеличиваются или уменьшаются. Это создает условия для онлайн-мониторинга деловой активности и принятия оперативных решений для сотрудников, которым доверено принятие стратегических решений по бизнес-деятельности, объединяя разрозненную информацию.

Заключение. В статье исследуются подходы к построению интеллектуализированной системы анализа данных на основе анализа источников. На основе анализа рассматриваемых работ была разработана обобщенная архитектура и модель BI-системы. На основе этой разработки представлена обобщенная архитектура образовательно-ориентированной BI-системы, основанная на содержании предметной области, принципах ее построения, а также результатах экспериментального тестирования.

Литература

1. Nadine Côrte-Real, Pedro Ruivo, Tiago Oliveira and Aleš Popovič, Unlocking the drivers of big data analytics value in firms , Journal of Business Research, 10.1016/j.jbusres.2018.12.072, 97, (160-173).
2. Бабомурадов, О.Ж., Каюмов, Ш.Ш., Маматов, Н.С., Қувондиков, Ж.Т. Предметно-ориентированные BI-системы // Проблемы информатики и энергетики. – 2019. – № 1. – С. 36-43.
3. Azeroual, O. & Theel, H. (2018). The Effects of Using Business Intelligence Systems on an Excellence Management and Decision-Making Process by Start-Up Companies: A Case Study. International Journal of Management Science and Business Administration, 4(3), 30-40.
4. Norah S. Farooqi1, Mohamed O. Khozium A Model for UnifiedAgile Business Intelligence//Solid State Technology Volume: 63 Issue: 6 Publication Year: 2020, https://www.researchgate.net/publication/348393747
5. Rouhani, Saeed & Asgari, Sara & Mirhosseini, Vahid. (2012). Review Study: Business Intelligence Concepts and Approaches.
6. Ускенбаева, Р.К., Булегенов, Д.А. Использование «Business Intelligence» для оптимизации бизнес процессов в сфере консалтинга // Молодой ученый. – 2016. – №10. – С. 98-101. – URL https://moluch.ru/archive/114/30242/ (дата обращения: 11.12.2019).
7. Ramanathan, R., Philpott, E., Duan, Y., Cao, G., 2017. Adoption of business analytics and impact on performance: a qualitative study in retail. Production Planning & Control, 28(11-12), 985-998.
8. Ghoshal, S., Kim, S. K. (1986). Building Effective Intelligence Systems for Competitive Advantage, Sloan Management Review, 28(1), 49–58.
9. Fosso Wamba, S., Akter, S., Edwards, A., Chopin, G., Gnanzou, D., 2015. How ‘big data’can make big impact: Findings from a systematic review and a longitudinal case study. International Journal of Production Economics, 165 234-246.

10. Işık, Ö., Jones, M.C., Sidorova, A., 2013. Business intelligence success: The roles of BI capabilities and decision environments. Information & Management, 50(1), 13-23.

11. Ashrafi, A, Zare Ravasan, A, Trkman, P, Afshari, S: The role of business analytics capabilities in bolstering firms' agility and performance. International Journal of Information Management, accepted in December 2018 (https://www.journals.elsevier.com/international-journal-of-information-management)

12. A model for Business Intelligence Systems' Development. Adela BARA, Iuliana BOTHA, Vlad DIACONIŢA, Ion LUNGU, Anda VELICANU, Manole VELICANU Academy of Economic Studies, Bucharest, Romania Faculty of Economics Cybernetics, Statistics and Informatics.

13. The Effects of Using Business Intelligence Systems on an Excellence Management and Decision-Making Process by Start-up Companies: A Case Study. International Journal of Management Science and Business Administration. Volume 4, Issue 3, March 2018, Pages 30-40. Otmane Azeroual - German Center for Higher Education Research and Science Studies (DZHW), Berlin, Germany. Horst Theel University of Applied Science HTW Berlin, Department of Computer Science, Communication and Business, Berlin, Germany.

УДК 621+621.302

МЕТОД ПОДЧИНЕННО-НЕЙРОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЦИФРОВЫМИ СЛЕДЯЩИМИ ПРИВОДАМИ

В.М. Буянкин,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия,
e-mail: Viktor-Buyankin@yandex.ru

Аннотация. *В статье рассматриваются методы нейроуправления цифровыми следящими приводами (ЦСЦ). В реальности из-за нелинейных электромагнитных и электромеханических характеристик работы электродвигателей в ЦСЦ, которые широко применяются в промышленности (станках, роботах,…), классический метод подчиненного регулирования не дает желаемых технологических результатов. Поэтому в промышленности возникает задача разработки нового подчиненно-нейронного, метода, который способен улучшить желаемые статические и динамические характеристики работы ЦСП.*

Ключевые слова: *нейронное управление, подчиненное регулирование, электропривод.*

THE METHOD OF SUBORDINATE NEURAL CONTROL OF DIGITAL TRACKING DRIVES

V.M. Bujankin,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract. *In article methods neyromanagement are considered by digital watching drives. In a reality because of nonlinear electromagnetic and electromechanical characteristics of work of electric motors in digital watching drives (DTD) which are widely applied in machine tools, robots, the classical method*

of the subordinated regulation does not give desirable technological results. Therefore, in technics there is a problem of working out new podchinenno-neural, a method which is capable to improve desirable static and dynamic characteristics of work DTD.
***Keywords**: artificial intelligence, forecasting, diagnostics, neural networks, electric drive.*

Введение. Цель исследования, постановка задачи. При проектировании цифровых следящих приводов (ЦСП) широко используется теория подчиненного регулирования с обратными связями и с наличием нескольких контуров, количество которых соответствует числу контролируемых параметров, таких как ток, напряжение на якоре электродвигателя, скорость вращения, угол поворота ЦСП [1, 2, 4]. На входе регулятора каждого из контуров сравниваются сигналы, пропорциональные заданному и действительному значениям выходной величины данного контура, а выходной сигнал регулятора служит задающим сигналом для последующего контура. Подчиненное регулирование прекрасно зарекомендовало себя при синтезе регуляторов линеаризованных объектов управления. В реальности из-за нелинейных электромагнитных и электромеханических характеристик работы ЦСП метод подчиненного регулирования, к сожалению, не дает желаемых результатов. Поэтому возникает задача разработки нового подчиненно-нейронного, метода, который способен обеспечить и улучшить необходимые желаемые статические и динамические характеристики работы ЦСП [5, 8, 11, 17, 18].

Решение поставленной задачи. Для системы искусственного технического интеллекта при управлении сложными техническими объектами при помощи ЦСП разработаны следующие этапы:

1) формулировка и обоснование требований, которым должен удовлетворять технический объект, управляемым ЦСП;
2) определение динамических свойств технического объекта;
3) выбор типа и расчет основных элементов для нейрорегуляторов ЦСП.

Формулировка требований к системам управления объектом является весьма ответственным этапом их синтеза. Требования составляют так, чтобы нейрорегулятор обеспечивал необходимые желаемые свойства технического объекта. При выборе типа и расчете основных элементов нейрорегулятора исходят из того, чтобы он мог осуществить необходимые воздействия на объект [4, 7].

Большинство технических объектов являются многоконтурными. Каждый контур обеспечивает управление и стабилизацию требуемого параметра при помощи регулятора. Если объект регулирования является нелинейным с нечеткими переменными параметрами, то нейрорегулятор должен менять как свою структуру, так и свои параметры для обеспечения необходимых статических и динамических характеристик объекта регули-

рования. Поэтому, прежде чем проводить синтез, необходимо решить задачу выбора оптимальной структуры нейрорегулятора для каждого контура. Так как параметры объекта регулирования имеют нелинейные и нечеткие характеристики, задача выбора структуры нейрорегулятора неразрешима с использованием классических методов. В статье предлагается метод выбора структуры нейрорегулятора с использованием нечетких интеллектуальных технологий. Для синтеза объектов регулирования с переменными нелинейными параметрами, представляющих собой одномассовые структуры, разработаны универсальные нейрорегуляторы, обладающие интегральными и пропорциональными характеристиками. Для синтеза технических объектов регулирования с переменными нелинейными параметрами, представляющих собой двухмассовые структуры, разработан универсальный нейрорегулятор, обладающий интегральными пропорциональными и дифференциальными характеристиками.

В общем виде работа нейрорегулятора с *n* количеством нейронов описывается системой уравнений

$$X_1 = X_0 * Z^{-1}, X_2 = X_0 * Z^{-2}, Y_1 = Y_0 * Z^{-1};$$
$$E_1 = X_0 W_{11} - X_1 W_{12} - X_2 W_{13} - Y_1 W_{14};$$
$$E_2 = X_0 W_{21} - X_1 W_{22} - X_2 W_{23} - Y_1 W_{24};$$
$$E_3 = X_0 W_{31} - X_1 W_{32} - X_2 W_{33} - Y_1 W_{34};$$
$$E_4 = X_0 W_{41} - X_1 W_{42} - X_2 W_{43} - Y_1 W_{44};$$
$$\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots$$
$$E_n = X_0 W_{n1} - X_1 W_{n2} - X_2 W_{n3} - Y_1 W_{n4};$$
$$R_1 = \mathrm{tansig}(E_1);$$
$$R_2 = \mathrm{tansig}(E_2);$$
$$R_3 = \mathrm{tansig}(E_3);$$
$$R_4 = \mathrm{tansig}(E_4);$$
$$\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots$$
$$R_n = \mathrm{tansig}(E_n);$$

где X_0 – входной сигнал нейронной сети; Y_0 – выходной сигнал нейронной сети; $X_1 = X_0 Z^{-1}, X_2 = X_0 Z^{-2}$– входные сигналы нейронной сети, задержанные на одни-два такта; $Y_1 = Y_0 Z^{-1}$, выходной сигнал нейронной сети, задержанный на один такт; $E_1 \dots E_m$ – выходные сигналы первого слоя нейронов; $W_{11} \dots W_{n4}$ – веса первого слоя нейронов; $R_1 \dots R_n$ – сигналы на выходе блоков активации первого слоя нейронов; Y_0' – сигнал на выходе второго слоя нейронов; $W_1' \dots W_n'$ – веса второго слоя нейронов; Y_0' – сигнал на выходе второго слоя нейронов; $\mathrm{pureline}$ – линейная функция активации.

Для решения задачи выбора необходимого типа нейрорегулятора, обеспечивающего требуемые статические и динамические характеристики работы технических объектов, используется модель, основанная на двух бинарных отношениях. Первое из этих отношений строится на базисных

множествах X и Y, а второе – на базисных множествах Y и Z. Множество $X\{J_1, J_2, R_я, L_я, H_{12}, H_{23}, L_{12}, L_{23}\}$ описывает технологические параметры технических объектов, а множество $Y\ \{\theta, n, \delta, \tau\}$ – динамические характеристики технических объектов: θ – запас устойчивости; n – число колебаний переходного процесса; δ – перерегулирование; τ – длительность переходного процесса.

Множество $Z\ \{z_1, z_2, z_3\}$ описывает набор структурных схем нейрорегуляторов.

На рис. 1 изображена функциональная схема модели, основанной на бинарных отношениях.

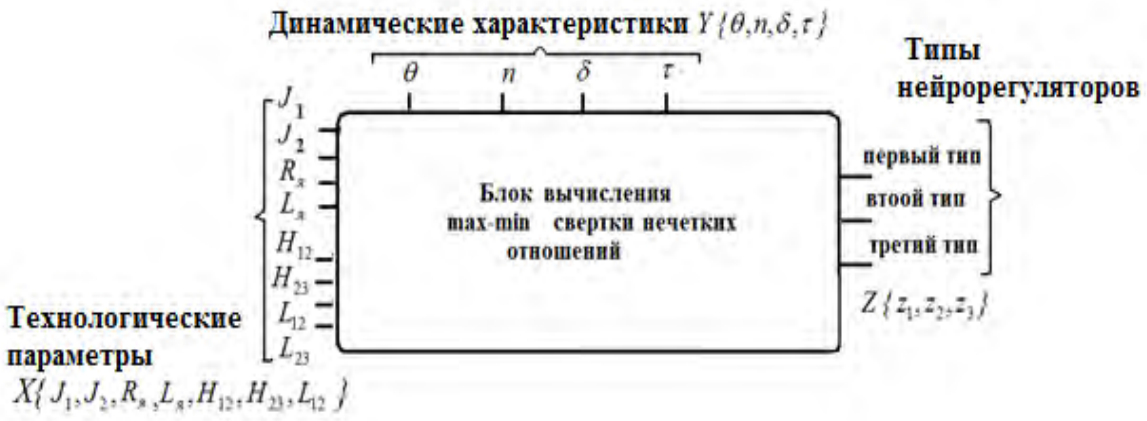


Рис. 1. Функциональная схема блока вычисления max-min - свертки бинарных отношений.

При вводе технологических параметров и динамических характеристик технического объекта в блок вычисления max-min-свертки бинарных отношений производится расчет нейрорегулятора, который обеспечивает требуемое качество работы.

При подчиненно-нейронном регулировании каждый внутренний контур подлежит оптимизации, т.е. такому выбору параметров нейрорегулятора, при котором удовлетворяется заданное качество регулирования. Нейрорегулятор определяется структурой и параметрами соответствующего звена объекта регулирования. Алгоритм двухконтурной нейроадаптивной системы управления на базе ЦСП [3] представлен на рис. 2. В системе подчиненно-нейронного регулирования оптимизация контуров производится последовательно. Под оптимизацией понимается компенсация наибольшей постоянной времени объекта регулирования, что приводит к повышению быстродействия, улучшению статических и динамических характеристик работы контура. Такая оптимизация идет последовательно от первого контура ко второму. Желаемые характеристики контуров настраиваются на модульный и симметричный критерии [4].

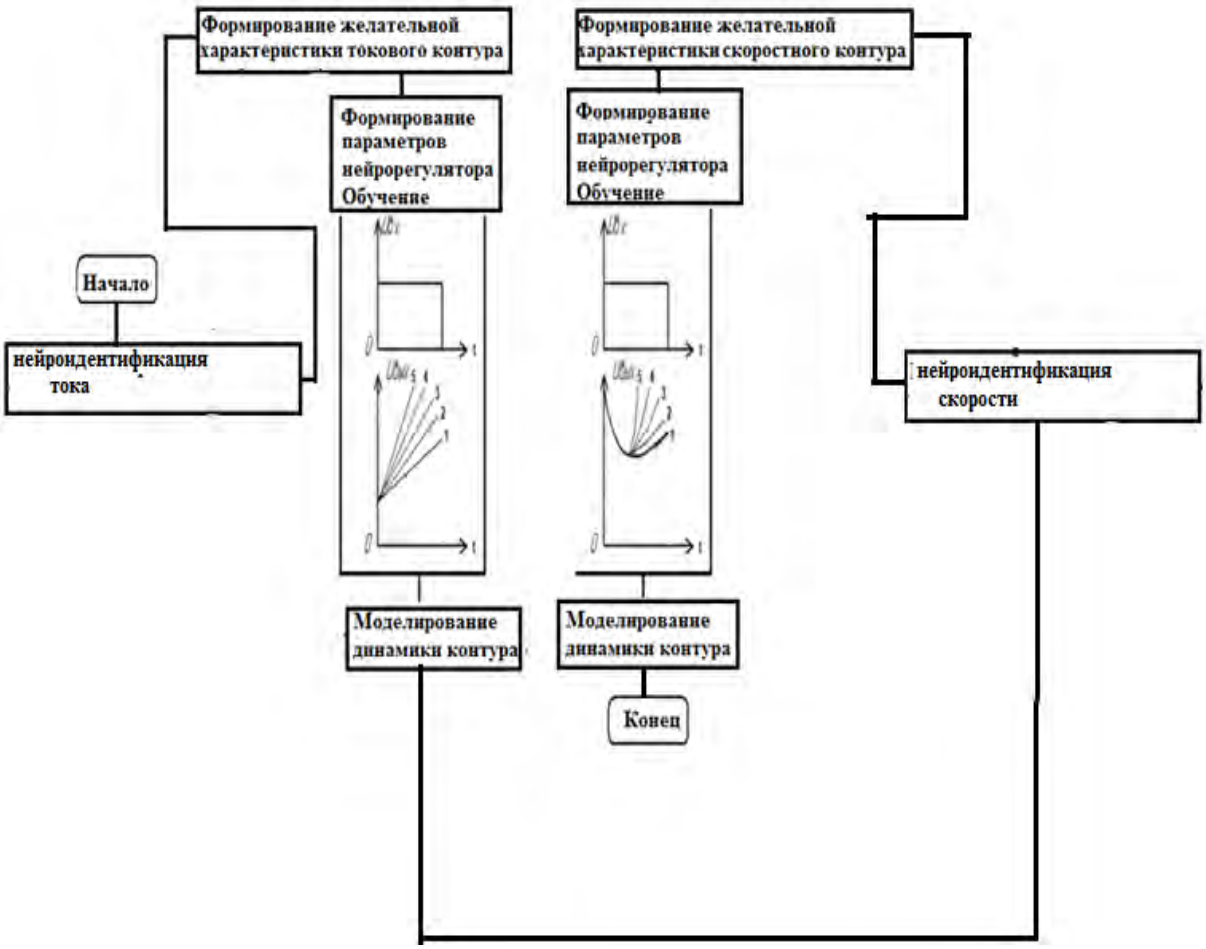


Рис. 2. Блок- схема программы двухконтурного ЦСП с обучающими характеристиками для нейрорегуляторов.

При оптимизации первого внутреннего токового контура ЦСП используется нейрорегулятор 1, показанный на рис. 3.

Система уравнений, описывающая работу нейрорегулятора 1 в токовом контуре ЦСП имеет вид

$$E_{1_p} = X_0 W_{11_p'} + X_1 W_{12_p'} + Y_1 W_{13_p'};$$
$$E_{2_p} = X_0 W_{21_p'} + X_1 W_{22p'} + Y_1 W_{23p'};$$
$$E_{3p} = X_0 W_{31p'} + X_1 W_{32p'} + Y_1 W_{33p'};$$
$$E_{4p} = X_0 W_{41p} + X_1 W_{42p'} + Y_1 W_{43p'};$$
$$E_{5p} = X_0 W_{51p'} + X_1 W_{52p'} + Y_1 W_{53p'};$$
$$E_{6p} = X_0 W_{61p'} + X_1 W_{62p'} + Y_1 W_{63p'};$$

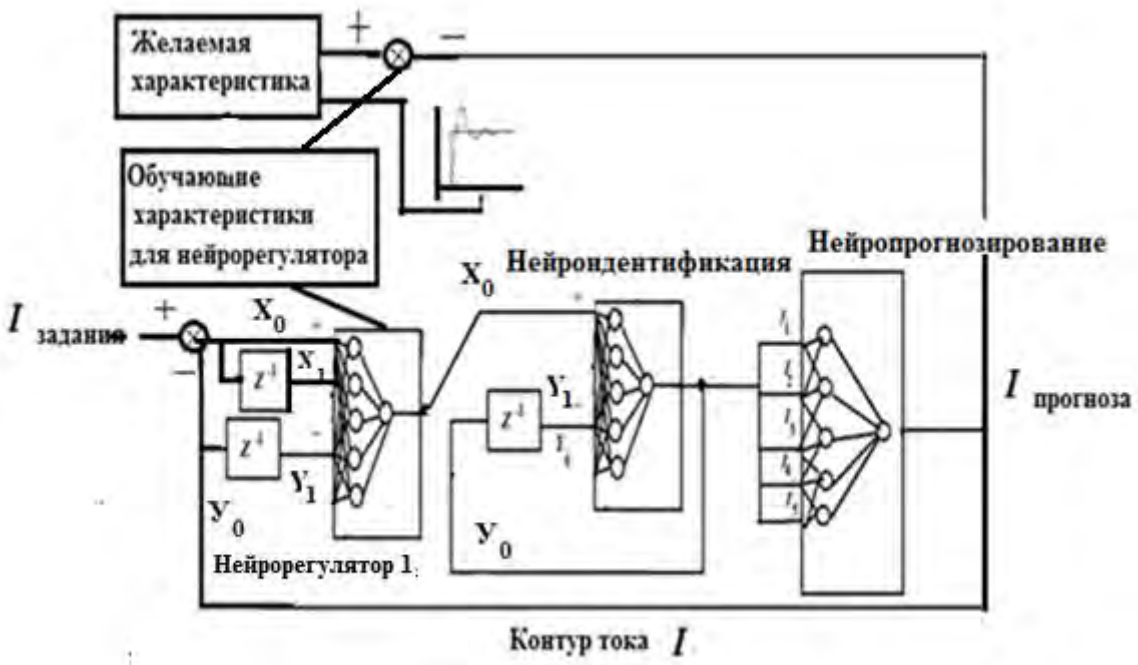


Рис. 3. Первый внутренний токовый контур ЦСП.

$$R_{1_p} = \text{pureline}\left(E_{1_p}\right);$$
$$R_{2_p} = \text{pureline}\left(E_{2_p}\right);$$
$$R_{3p} = \text{pureline}\left(E_{3_p}\right); R_{5p} = \text{pureline}\left(E_{5_p}\right); R_{6p} = \text{pureline}\left(E_{6p}\right);$$
$$R_{4p} = \text{pureline}\ E_{4_p},$$

где $X_1 = X_0 Z^{-1}$ – входной сигнал нейронной сети, задержанный на один такт; $Y_1 = Y_0 Z^{-1}$ – выходной сигнал нейронной сети, задержанный на один такт; Y_0 – выходной сигнал нейронной сети; Y_1 – входной сигнал нейронной сети, задержанный на один такт; $E_{1p}...E_{6p}$ – выходные сигналы первого слоя нейронов; $W_{11p}...W_{63p}$ – веса первого слоя нейронов; $R_{1p}...R_{6p}$ – сигналы на выходе блоков активации первого слоя нейронов; Y_0' – сигнал на выходе второго слоя нейронов; $W_{1_p}'...W_{6p}'$ – веса второго слоя нейронов; pureline – функция активации.

При оптимизации второго скоростного контура ЦСП используется нейрорегулятор 2. Желаемая характеристика настраивается на симметричный оптимум [5]. Система уравнений, описывающая работу нейрорегулятора 2 в скоростном контуре ЦСП, имеет вид

$$E_{1_{\text{рс}}} = X_0 W_{11'_{\text{рс}}} + X_1 W_{12'_{\text{рс}}} + X_2 W_{13'_{\text{рс}}} + Y_1 W_{14'_{\text{рс}}};$$
$$E_{2_{\text{рс}}} = X_0 W_{21'_{\text{рс}}} + X_1 W_{22'_{\text{рс}}} + X_2 W_{23'_{\text{рс}}} + Y_1 W_{24'_{\text{рс}}};$$
$$E_{3\text{рс}} = X_0 W_{31'_{\text{рс}}} + X_1 W_{32'_{\text{р}}} + X_2 W_{33'_{\text{рс}}} + Y_1 W_{34'_{\text{рс}}};$$
$$E_{4\text{рс}} = X_0 W_{41'_{\text{р}}} + X_1 W_{42'_{\text{рс}}} + X_2 W_{43'_{\text{рс}}} + Y_1 W_{44'_{\text{рс}}};$$
$$E_{5\text{рс}} = X_0 W_{51'_{\text{рс}}} + X_1 W_{52'_{\text{рс}}} + X_2 W_{53'_{\text{рс}}} + Y_1 W_{54'_{\text{рс}}};$$
$$R_{6\text{рс}_{\text{рс}}} = X_0 W_{61'_{\text{рс}}} + X_1 W_{612'_{\text{рс}}} + X_2 W_{63'_{\text{рс}}} + Y_1 W_{64'_{\text{рс}}};$$
$$R_{1_{\text{рс}}} = \text{pureline}\left(E_{1_{\text{рс}}}\right);$$
$$R_{2_{\text{рс}}} = \text{pureline}\left(E_{2_{\text{рс}}}\right);$$
$$R_{3\text{рс}} = \text{pureline}\left(E_{3_{\text{рс}}}\right);$$
$$R_{4\text{рс}} = \text{pureline}\left(E_{4_{\text{рс}}}\right);$$
$$R_{5\text{рс}} = \text{pureline}\left(E_{5_{\text{рс}}}\right);$$
$$R_{6\text{рс}} = \text{pureline}\left(E_{6\text{рс}}\right),$$

где $X_1 = X_0 Z^{-1}$ – входной сигнал нейронной сети, задержанный на один такт; $Y_1 = Y_0 Z^{-1}$ – выходной сигнал нейронной сети, задержанный на один такт; $Y_2 = Y_0 Z^{-2}$ – выходной сигнал нейронной сети, задержанный на два такта; Y_0 – выходной сигнал нейронной сети; Y_1 – входной сигнал нейронной сети, задержанный на один такт; $\text{E}_{1\text{рс}}...\text{E}_{6\text{рс}}$ – выходные сигналы первого слоя нейронов; $W_{11\text{рс}}...W_{64\text{рс}}$ – веса первого слоя нейронов; $R_{1\text{рс}}...R_{6\text{рс}}$ – сигналы на выходе блоков активации первого слоя нейронов; Y'_0 – сигнал на выходе второго слоя нейронов; $W'_{1_{\text{рс}}}...W'_{6\text{рс}}$ – веса второго слоя нейронов; pureline – функция активации.

Двухконтурная нейроадаптивная система управления для ЦСП представлена на рис. 4. Параметры ЦСП сравниваются с желаемой характеристикой скоростного контура. В результате сравнения получаются данные для обучения нейрорегулятора двухскоростного контура.

На рис. 5 представлены переходные процессы работы ЦСП с двухконтурной нейротехнической интеллектуальной системой подчиненно-нейронного управления, которые были смоделированы в среде МАТЛАБ.

Заключение. По переходным процессам работы ЦСП (рис. 5) можно сделать заключение, что система искусственного интеллекта для двухконтурного электропривода, работающая по принципу подчиненно-нейронного регулирования, может обеспечивать улучшенные желаемые статические и динамические характеристики ЦСП по сравнению с традиционным подчиненным методом.

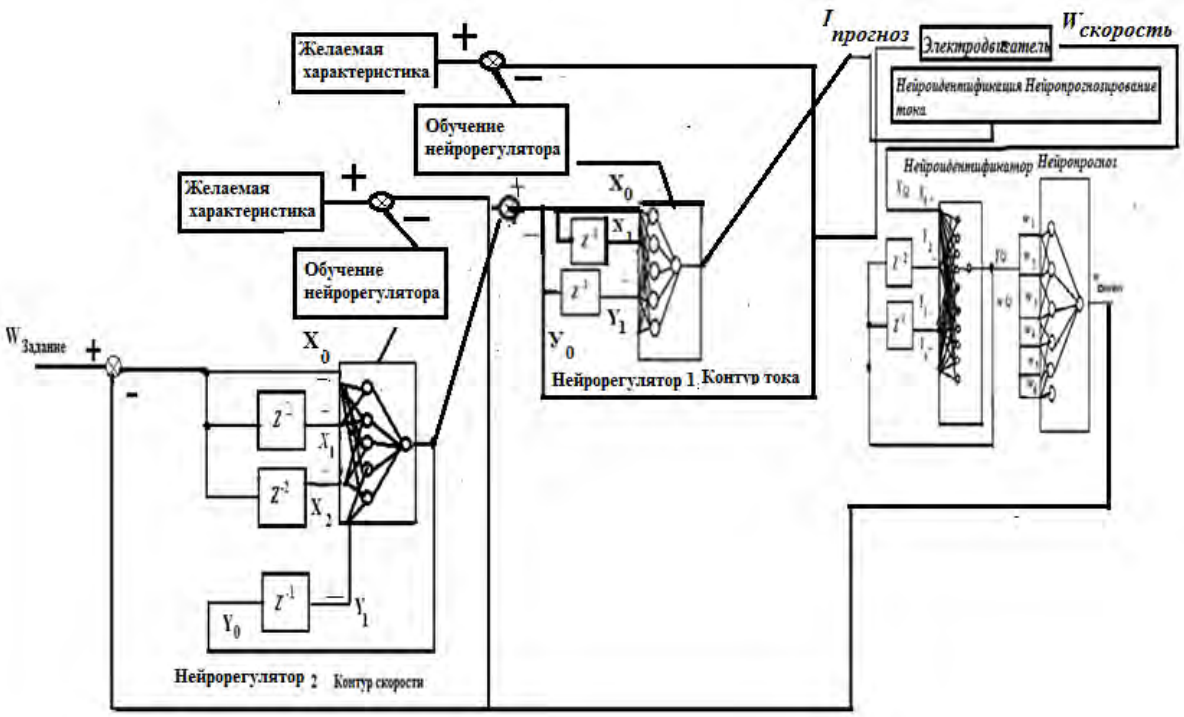


Рис. 4. Двухконтурная адаптивная система подчиненно-нейронного управления ЦСП.

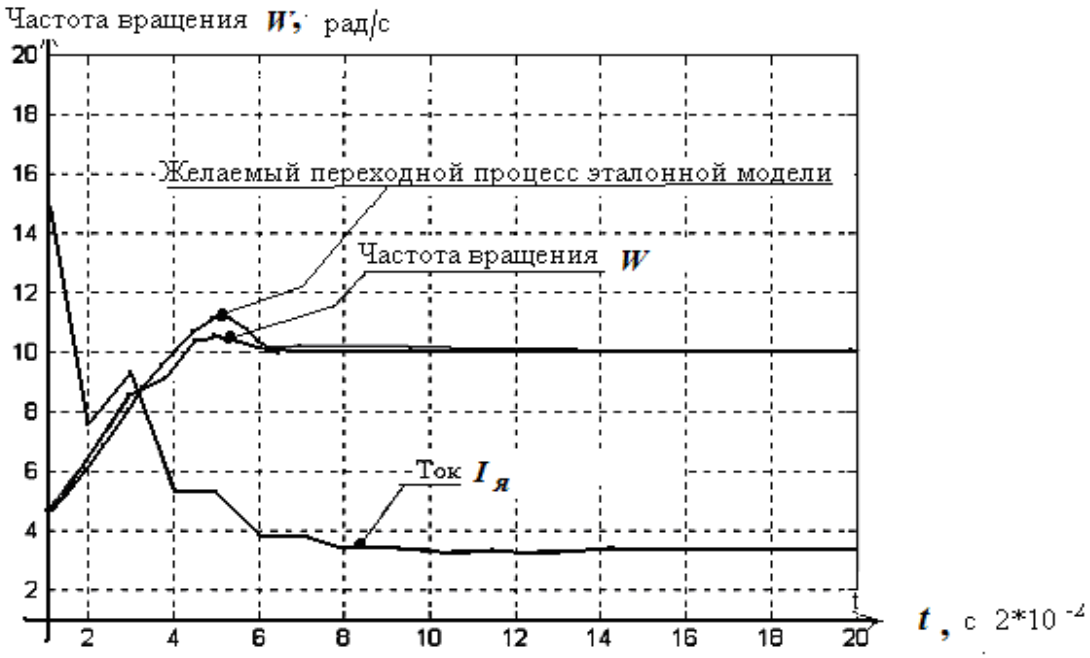


Рис. 5. Переходные процессы работы ЦСП, смоделированные в среде МАТЛАБ.

Литература

1. Буянкин, В.М. Интегральный, пропорциональный, дифференциальный нейрорегулятор // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Естественные науки». – 2006. – №3. – С. 56–61.

2. Буянкин, В.М. Двухконтурная система нейроуправления электроприводом с нейросамонастройкой // Нейрокомпьютеры разработка и применение. – 2006. – №8. – С. 90–94.

3. Буянкин, В.М. Разработка метода адаптивного подчиненного регулирования нейрорегуляторами для управления многоконтурными следящими электроприводами для мехатронной системы робота с параллельной механикой // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2016. – № 12. – С. 32–36.

4. Буянкин, В.М. Нейроуправление электродвигателями электроприводами. Издание LAMBERN Academic Publishing Germany, 2015. – С. 160.

5. Viktor, Buyankin. NEUROIDENTIFICTION WITH Neuro-Self Tuning TO ENSURE THE OPERATION THE CURRENT LOOP OF THE ELECTRIC DRIVE WITH THE DESIRED STATIC AND DYNAMIC CHARACTERISTICS. PTRIODICO TCHE QUMICA www.periodico.thequimica.com Vol. 15 N0. 30. ISSN1806-0374 (impresso) ISSN 1806-9827 (CD-ROM) ISSN 2179-0302 (meio eletrolotgrnico) 2018.Porto Alegre, RS.Brasil. – P. 513-514

6. Abbas JJ, Chizeck HJ. Neural network control of functional neuromuscular stimulation systems. Ann Biomed Eng. 1993;21(4):459-460. doi:10.1007/BF02368636.

7. Asakawa, S, Kyoya, I. Hopfield neural network model for explaining double dissociation in semantic memory impairment. BMC Neurosci. 2013;14(1): P233. doi:10.1186/1471-2202-14-S1-P233.

8. Baddeley, B, Graham, P, Husbands, P, Philippides, A. A neural network based holistic model of ant route navigation. BMC Neurosci. 2012. – 13(1). – O1. doi:10.1186/1471-2202-13-S1-O1.

9. Chik D, Borisyuk R. Spiking neural network models for memorizing sequences with forward and backward recall. BMC Neurosci. 2009;10(1): P211. doi:10.1186/1471-2202-10-S1-P211.

10. Jaramillo-Avila U, Rostro-González H. Spiking neural network configuration designed for switching between basic forms of movement in a biped robot. BMC Neurosci. 2015;16(1): P104. doi:10.1186/1471-2202-16-S1-P104.

11. Kuo RJ, Tseng YS, Chen Z-Y. Integration of fuzzy neural network and artificial immune system-based back-propagation neural network for sales forecasting using qualitative and quantitative data. J Intell Manuf. 2016;27(6):1191-1207. doi:10.1007/s10845-014-0944-1.

12. Kutschireiter A, Surace SC, Sprekeler H, Pfister J-P. Approximate nonlinear filtering with a recurrent neural network. BMC Neurosci. 2015;16(1): P196. doi:10.1186/1471-2202-16-S1-P196.

13. Li C, Xu J, Xue L. Knowledge-Based Artificial Neural Network Models for Finline. Int J Infrared Millimeter Waves. 2001;22(2):351-359. doi:10.1023/A:1010760707665.

14. Li Y, Pu Y, Xu D, Qian W, Wang L. Image aesthetic quality evaluation using convolution neural network embedded learning. Optoelectron Lett. 2017;13(6):471-475. doi:10.1007/s11801-017-7203-6.

15. Lin W, Liao X, Deng J, Liu Y. Land cover classification of RADARSAT-2 SAR data using convolutional neural network. Wuhan Univ J Nat Sci. 2016;21(2):151-158. doi:10.1007/s11859-016-1152-y.

16. Manoj K, Charul B. Hybrid tracking model and GSLM based neural network for crowd behavior recognition. J Cent South Univ. 2017;24(9):2071-2081. doi:10.1007/s11771-017-3616-4.

17. Miner D, Triesch J. Self-organization of complex cortex-like wiring in a spiking neural network model. BMC Neurosci. 2015;16(1):P265. doi:10.1186/1471-2202-16-S1-P265.
18. Pomerleau DA. A reply to Towell's book review of Neural Network Perception for Mobile Robot Guidance. Mach Learn. 1995;18(1):121-122. doi:10.1007/BF00993825.
19. Turner JP, Nowotny T. Estimating numerical error in neural network simulations on Graphics Processing Units. BMC Neurosci. 2015;16(1):P182. doi:10.1186/1471-2202-16-S1-P182.
20. Yilmaz I, Gullu M. Georeferencing of historical maps using back propagation artificial neural network. Exp Tech. 2012;36(5):15-19. doi:10.1111/j.1747-1567.2010.00694.

УДК 519.6

КВАНТОВО-ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ГЛОБАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Кан Лян,
Шанхайский политехнический университет (SSPU), Китай,
А.П. Карпенко,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия,
e-mail: kangliang@sspu.edu.cn, apkarpenko@mail.ru

Аннотация. *Рассматриваем задачу непрерывной глобальной оптимизации без ограничений. Представляем гибридизацию канонического генетического алгоритма с квантовым алгоритмом – квантово-генетический алгоритм. Приводим описание программной реализации алгоритма и детали организации широкого вычислительного эксперимента по исследованию эффективности алгоритма. Исследование эффективности алгоритма выполнено на двухмерных тестовых функциях - сфера, Растригина и Розенброка. Результаты исследования показали эффективность предложенных алгоритмических и программных решений и перспективность использования квантово-генетического алгоритма для решения задач глобальной оптимизации.*
Ключевые слова: *эволюционные алгоритмы, квантовые алгоритмы, алгоритмы глобальной оптимизации, гибридизация.*

QUANTUM GENETIC ALGORITHM FOR GLOBAL OPTIMIZATION

Kang Liang,
Shanghai Polytechnic University (SSPU), China,
A.P. Karpenko,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract. *We consider the problem of continuous global optimization without restrictions. We present a hybridization of the canonical genetic algorithm with a quantum algorithm - a quantum genetic algorithm, as well as a description of*

the software implementation of the algorithm and details of organizing a wide computational experiment to study the algorithm's efficiency. The study of the efficiency of the algorithm was carried out on two-dimensional test functions of sphere, Rastrigin and Rosenbrock. The results of the study showed the effectiveness of the proposed algorithmic and software solutions and the prospects for using the quantum genetic algorithm to solve global optimization problems.
Keywords: *evolutionary algorithms; quantum algorithms; global optimization algorithms; hybridization.*

Введение. Рассматриваемые алгоритмы глобальной (непрерывной) оптимизации относятся к классу прямых (не использующих производные целевой функции) стохастических поисковых алгоритмов, которые в разных публикациях называют поведенческими, интеллектуальными, метаэвристическими, вдохновленными (инспирированными) природой, роевыми, многоагентными, популяционными и т.д. Вслед за [1] используем термин популяционные алгоритмы (П-алгоритмы).

П-алгоритмы находят широкое применение при решении задач глобальной оптимизации, возникающих в технике, а также, например, в машинном обучении, распознавании образов и др. [2]. Важно, что П-алгоритмы хорошо масштабируются – скорость, с которой растет объем вычислений при увеличении размерности задачи, обычно ниже, чем у классических алгоритмов оптимизации. В результате, если задача не может быть решена классическими алгоритмами из-за неприемлемо больших вычислительных затрат, П-алгоритмы часто позволяют найти, как минимум, близкие к оптимальным (квазиоптимальные) решения. Разной широты обзоры П-алгоритмов представлены, например, в [3 - 12].

В качестве базового популяционного алгоритма используем канонический генетический алгоритм (Genetic Algorithm, GA) [3]. При синтезе популяционных алгоритмов центральной является проблема балансировки их диверсификационных и интенсификационных свойств [1]. С целью повышения диверсификационных свойств канонического генетического алгоритма предлагаем его гибридизацию с квантовым алгоритмом в форме квантово-генетического алгоритма (Quantum Genetic Algorithm, QGA) [13].

1. Постановка задачи и схема канонического генетического алгоритма. Рассматриваем детерминированную задачу безусловной оптимизации

$$\min_{X \in R^{|X|}} f(X) = f(X^{*}) = f^{*}, \qquad (1)$$

где $|X|$ – размерность вектора варьируемых параметров X; $R^{|X|}$ – $|X|$-мерное арифметическое пространство; $f(X)$ – целевая функция (критерий оптимальности) со значениями в пространстве R^1; X^{*}, f^{*} – искомые (не-

известные) оптимальное решение и значение целевой функции соответственно.

Схема канонического генетического алгоритма имеет следующий вид.

1) Особей популяции представляем в виде хромосом.

2) Случайным образом создаем некоторое число исходных особей – начальную популяцию.

3) Оцениваем особей с помощью фитнесс-функции – каждой из них ставим в соответствие определенное значение приспособленности (fitness), которое определяет вероятность выживания особи.

4) На основе приспособленностей выбираем особи для скрещивания − этап селекции (selection). К хромосомам этих особей применяем генетические операторы скрещивания (crossing) и мутации (mutation), создавая, таким образом, следующее поколение (generation) особей.

5) Особей созданного поколения также оцениваем, производим селекцию, применяем генетические операторы и так далее до тех пор, пока не будет выполнен критерий остановы алгоритма.

2. Квантовые операции. Квантовый бит – минимальная единица информации в квантовых вычислениях – может находиться в состояниях $|\mathbf{0}\rangle$, $|\mathbf{1}\rangle$ или в любом состоянии, являющемся суперпозицией состояний $|\mathbf{0}\rangle$, $|\mathbf{1}\rangle$. Квантовая битовая формула имеет вид $|\boldsymbol{\phi}\rangle = \boldsymbol{\alpha}|\mathbf{0}\rangle + \boldsymbol{\beta}|\mathbf{1}\rangle$, где $\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}$ – амплитуды вероятностей соответствующих квантовых состояний, так что $\boldsymbol{\alpha}^2, \boldsymbol{\beta}^2$ – вероятности того, что квантовое состояние наблюдается (измеряется) как $|\mathbf{0}\rangle$ и $|\mathbf{1}\rangle$ соответственно; $\boldsymbol{\alpha}^2 + \boldsymbol{\beta}^2 = \mathbf{1}$.

Используем квантовую операцию, называемую *квантовые вращающиеся ворота* $U(\theta)$, которая для i-го квантового бита определяет формула

$$\begin{pmatrix} \alpha_i' \\ \beta_i' \end{pmatrix} = U(\theta)\begin{pmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{pmatrix},$$

где θ – угол поворота (рис. 1).

Состояние двойных квантовых битов можно записать в виде квантовой формулы

$$|\phi\rangle = \alpha_{00}|00\rangle + \alpha_{01}|01\rangle + \alpha_{10}|10\rangle + \alpha_{11}|11\rangle.$$

Вероятности того, что квантовое состояние такой двухбитной системы наблюдается как, например, $|0\rangle$ равна $\alpha_{00}^2 + \alpha_{01}^2$.

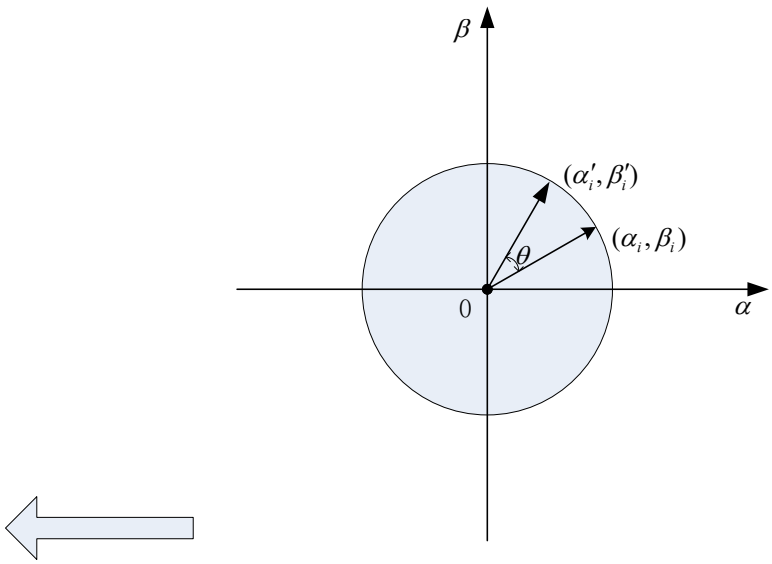


Рис. 1. Схема операции квантового вращения.

3. Квантово-генетический алгоритм. Общую схему квантово-генетического алгоритма определяет следующая последовательность шагов.

1) Полагаем $t = 0$ и инициализируем начальную популяцию $s_i(0)$; $i \in [1{:}|S|]$, где $|S|$ – число особей популяции, то есть генерируем $|S|$ хромосом $\{\bar{X}_i(0)\}$, закодированных с помощью квантовых битов.

2) Моделируем квантовое измерение для каждой из хромосом $\{\bar{X}_i(0)\}$ начальной популяции, чтобы получить соответствующее решение.

3) Оцениваем текущие эффективности всех особей популяции $\{f(X_i(0))\}$.

4) Находим лучшую особь $s^{\text{best}}(0)$ и соответствующее значение фитнесс-функции $f^{\text{best}}(0)$:

$$\min_{X \in \{X_i(0)\}} f(X_i) = f(X^{\text{best}}(0)) = f^{\text{best}}(0).$$

5) Проверяем выполнение условий останова. Если реализована последняя квантовая коррекция, то завершаем итерации. В противном случае полагаем $t = t + 1$ и переходим к следующему шагу.

6) Выполняем операцию квантового измерения для каждой из хромосом $\{\bar{X}_i(t)\}$.

7) Оцениваем текущие эффективности $\{f(X_i(t))\}$ особей популяции.

8) Применяем операцию квантовые вращающиеся ворота $U(t)$ ко всем хромосомам $\{\bar{X}_i(t)\}$ и, таким образом, получаем новую популяцию $\{s_i(t+1);\ i \in [1{:}|S|]\}$.

9) Аналогично шагу 4 находим лучшую особь $s^{\text{best}}(t+1)$ и соответствующее значение фитнесс-функции $f^{\text{best}}(t+1)$.

10) Возвращаемся к шагу 5.

Алгоритм использует полиморфное кодирование хромосом $\{\bar{X}_i(t)\}$. Так, хромосома $\bar{X}_i(t)$ включает в себя $|X|$ генов, соответствующих компонентам $x_{i,1}(t), x_{i,2}(t), \ldots, x_{i,|X|}(t)$ вектора $X_i(t)$, а также $2|X|$ «квантовых» генов $\begin{pmatrix} \alpha_{i,1}(t) & \alpha_{i,2}(t) & \ldots & \alpha_{i,|X|}(t) \\ \beta_{i,1}(t) & \beta_{i,2}(t) & \ldots & \beta_{i,|X|}(t) \end{pmatrix}$. Для генов $x_{i,1}(t), x_{i,2}(t), \ldots, x_{i,|X|}(t)$ используем двоичное кодирование, так что $x_{i,j}(t) = (x_{i,j,k}(t) \in \{0;\ 1\})$, а для «квантовых» генов – вещественное кодирование: $\alpha_{i,j}(t) = (\alpha_{i,j,k}(t) \in \Re^1)$, $\beta_{i,j}(t) = (\beta_{i,j,k}(t) \in \Re^1)$. Здесь $j \in [1{:}|X|], k \in [1{:}K]$; K – число разрядов в двоичном представлении гена $x_{i,j}(t)$.

В процессе инициализации популяции «квантовые» гены всех хромосом популяции получают значения $(\alpha_{i,j,k}(t), \beta_{i,j,k}(t)) = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}\right)$, то есть, в начальной популяции двоичные коды всех хромосом имеют равные вероятности суперпозиции своих возможных состояний.

Квантовые вращающиеся ворота реализуют, можно сказать, адаптивный квантовый оператор мутации, обеспечивающий эволюционное обновление популяции по правилам, представленным в таблице 1.

Таблица 1. Правила выбора угла поворота в операции квантового вращения.

$x_{i,j,k}$	$x_{i,j,k}^{\text{best}}$	$f_i < f^{\text{best}}$	$\Delta\theta_{i,j,k}$	$s(\alpha_{i,j,k}, \beta_{i,j,k})$			
				$\alpha_{i,j,k}\beta_{i,j,k} > 0$	$\alpha_{i,j,k}\beta_{i,j,k} < 0$	$\alpha_{i,j,k} = 0$	$\beta_{i,j,k} = 0$
0	0	False	0	0	0	0	0
0	0	True	0	0	0	0	0
0	1	False	$0{,}01\pi$	-1	+1	±1	0
0	1	True	$0{,}01\pi$	+1	-1	0	±1
1	0	False	$0{,}01\pi$	+1	-1	0	±1
1	0	True	$0{,}01\pi$	-1	+1	±1	0
1	1	False	$0{,}01\pi$	0	0	0	0
1	1	True	$0{,}01\pi$	0	0	0	0

В таблице 1 приняты следующие обозначения: $f_i = f(X_i)$; $f^{\text{best}} = f(X^{\text{best}})$; $s(\alpha_{i,j,k}, \beta_{i,j,k})$ – направление угла поворота; $\Delta\theta_{i,j,k}$ – величина угла поворота. Таким образом, принято, что в процессе квантового вращения компоненты $x_{i,j,k}$ угол поворота $\theta_{i,j,k}$ равен $\theta_{i,j,k} s(\alpha_{i,j,k}, \beta_{i,j,k})$.

Логика определения величин $\alpha_{i,j,k}, \beta_{i,j,k}$ (амплитуд вероятностей изменения бита $x_{i,j,k}$) состоит в следующем. Текущее значение пригодности $f(X_i(t))$ особи s_i сравниваем со значением пригодности $f(X^{\text{best}}(t))$ теку-

щей лучшей особи популяции. Если $f(X_i(t)) < f(X^{\text{best}}(t))$, то амплитуды вероятности $\alpha_{i,j,k}, \beta_{i,j,k}$ обновляем в направлении, благоприятном для появления решений близких к $X_i(t)$. В противном случае указанные величины изменяем так, чтобы повысить вероятность появления решений близких к $X^{\text{best}}(t)$.

4. Программная реализация и организация вычислительных экспериментов. Квантово-генетический алгоритм QGA реализован в программной системе MatLab. В этой же системе реализованы канонический генетический алгоритм GA, канонический алгоритм роя частиц PSO, а также алгоритм Монте-Карло (М-К) [1]. Вычислительные эксперименты выполнены для трех тестовых целевых функций с известными точными решениями [1]: функция сфера (*Sphere*); функция Растригина (*Rastrigin*); функция Розенброка (*Rosenbrock*). Имея в виду использование алгоритма QGA в задачах групповой робототехники, во всех вычислительных экспериментах размерность вектора варьируемых параметров *X* принята равной двум: $|X| = 2$. Начальная популяция генерировалась в гиперкубе

$$[-\alpha;\ \alpha]^{|X|} = \Pi = (X|\ -\alpha \le x_i \le \alpha;\ i \in [1{:}\,|X|]).$$

Для оценки значений показателей эффективности алгоритма, использован метод мультистарта с числом стартов *M*. Оценка эффективности алгоритма выполнена на основе следующих семи показателей:

- $\Phi_1 = \min\limits_{m \in [1:M]} f_m = f^*$ – лучшее по мультистарту достигнутое значение целевой функции, где f_m – лучшее значение этой функции, полученное в процессе старта с номером m;
- $\Phi_2 = \min\limits_{m \in [1:M]} \|X_m^* - X^*\| = \|X^* - X^*\| = \Delta X^*$ – мера близости лучшего по мультистарту значения компонентов вектора варьируемых параметров X^* к известному точному решению, где $\|\ \|$ - евклидова норма;
- $\Phi_3 = \bar{f}$ – оценка математического ожидания величин $\{f_m\}$;
- $\Phi_4 = \Delta\bar{X}$ – аналогичная оценка величин $\{\Delta X^*\}$;
- $\Phi_5 = p_f(\varepsilon_f)$ – оценка вероятности локализации минимума целевой функции с заданной точностью ε_f в пространстве значений этой функции;
- $\Phi_6 = p_X(\varepsilon_X)$ – аналогичная оценка вероятности локализации минимума целевой с заданной точностью ε_X в пространстве аргументов этой функции;
- $\Phi_7 = \bar{N}$ – среднее по мультистарту число испытаний (вычислений значений) целевой функции.

Кроме того, используем интегральный показатель Φ эффективности

алгоритмов, представляющий собой аддитивную скалярную свертку указанных нормированных показателей:

$$\Phi = \lambda_1\Phi_1 + \lambda_2\Phi_2 + \lambda_3\Phi_3 + \lambda_4\Phi_4 - \lambda_5\Phi_5 - \lambda_6\Phi_6 + \lambda_7\Phi_7 \to \min_X. \quad (2)$$

Здесь $\lambda_k \in [0;\ 1], k \in [1{:}7]$ – весовые коэффициенты;

$$\Phi_k = \frac{\Phi_k}{\Phi_k^{\min}},\ k = 1,2,3,4,7, \quad \Phi_k = \frac{\Phi_k}{\Phi_k^{\max}},\ k = 5,6,$$

где $\Phi_k^{\min}$ – наилучшее (наименьшее) полученное значение показателя Φ_k; $\Phi_k^{\max}$ – наилучшее (наибольшее) значение показателя Φ_k (см. (1)).

Эксперименты выполнены при следующих значениях свободных параметров алгоритма:

$$|S| = 50;\ \alpha = 10;\ m = 20;\ t^{\max} = 100;\ \varepsilon_f = \varepsilon_X = 0{,}01;\ M = 100.$$

В качестве условия окончания итераций использована стагнация вычислительного процесса: итерации заканчиваются, если после δ_t итераций оказывается справедливым неравенство $\mathrm{abs}\big(f^{*}(t) - f^{*}(t+\delta_t)\big) \le \delta_f$, где $\delta_t = 20$, $\delta_f = 0{,}01$. Весовые множители в формуле (2) приняты равными единице: $\lambda_k = 1, k \in [1{:}7]$.

5. Результаты экспериментов и их обсуждение. Результаты вычислительных экспериментов представлены в таблицах 2 - 5 и на рис. 2 - 8.

Таблица 2. Экспериментальные результаты: алгоритм Монте-Карло (М-К).

$f(X)$	Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4	Φ_5	Φ_6	Φ_7
Sphere	0,04	0,32	3,62	2,16	0,04	0,00	33,6
Rastrigin	3,12	0,14	16,45	2,84	0,00	0,00	35,3
Rosenbrock	0,90	0,22	117,04	3,46	0,00	0,00	37,8

Таблица 3. Экспериментальные результаты: алгоритм PSO.

$f(X)$	Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4	Φ_5	Φ_6	Φ_7
Sphere	0,7E-7	2,6E-5	6,60	0,00	1,00	0,89	27,12
Rastrigin	2,1E-7	3,3E-5	0,20	0,20	0,79	0,79	46,19
Rosenbrock	3,0E-7	2,3E-5	0,00	0,03	0,99	0,44	36,27

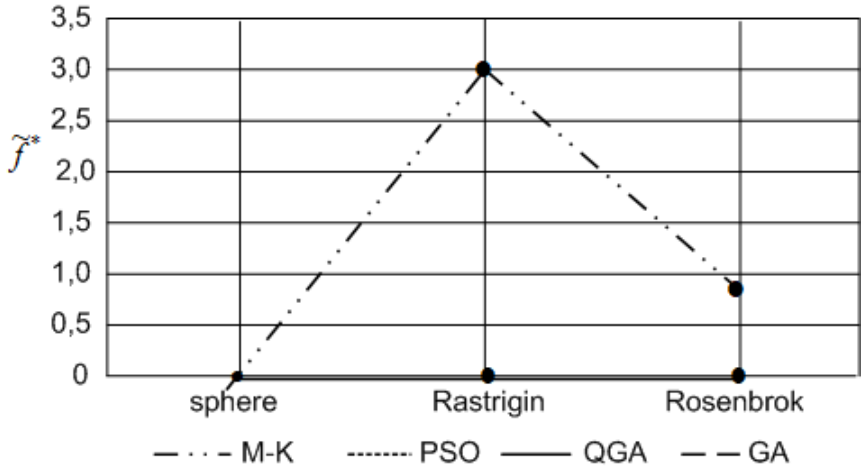


Рис. 2. Значения показателя эффективности Φ_1.

Таблица 4. Экспериментальные результаты: алгоритм GA.

$f(X)$	Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4	Φ_5	Φ_6	Φ_7
Sphere	4,6E-8	2,2E-4	2,1E-5	4,5E-3	1,00	0,94	56,11
Rastrigin	1,0E-7	3,2E-4	3,5E-5	4,8E-3	0,76	0,76	68,43
Rosenbrock	1,5E-10	0,4	6,0E-5	1,4	0,86	0	60,14

Таблица 5. Экспериментальные результаты: алгоритм QGA.

$f(X)$	Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4	Φ_5	Φ_6	Φ_7
Sphere	8,2E-6	2,7E-3	3,95E-3	0,04	0,95	0,70	44,13
Rastrigin	2,0E-5	3,2E-4	0,51	0,28	0,91	0,61	73,21
Rosenbrock	3,2E-5	9,8E-4	0,18	0,55	0,93	0,30	56,46

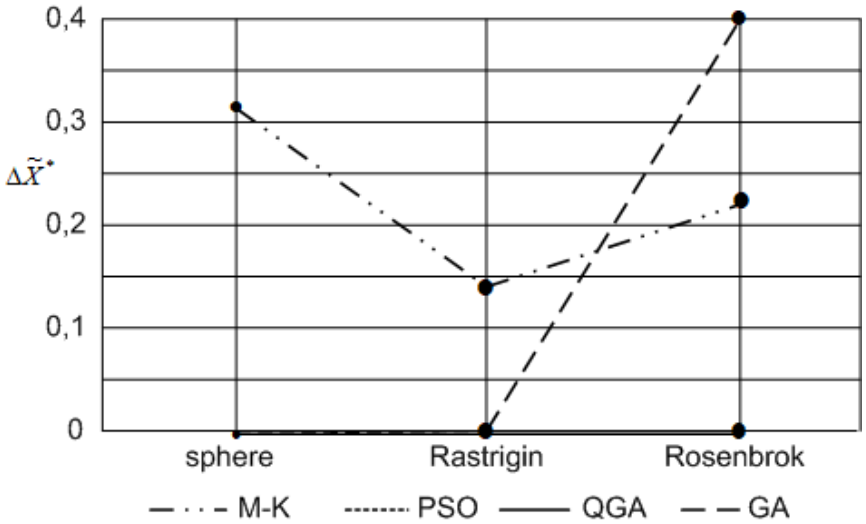


Рис. 3. Значения показателя эффективности Φ_2.

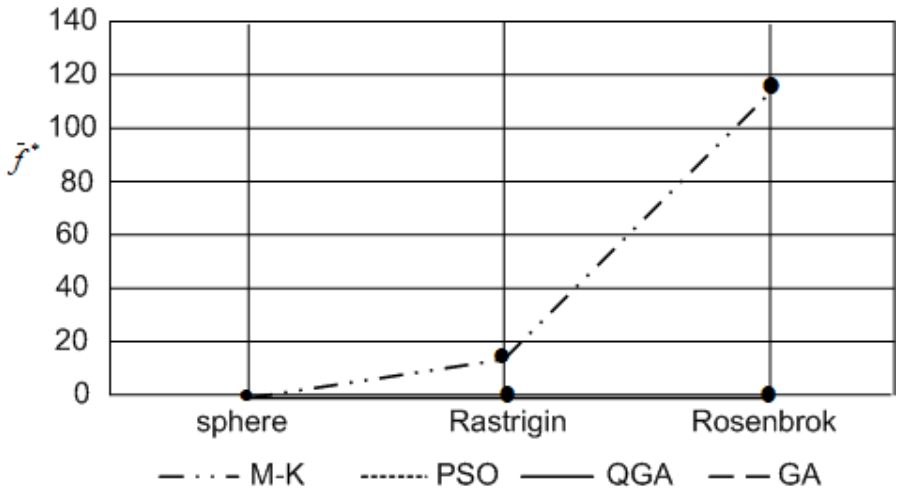


Рис. 4. Значения показателя эффективности Φ_3.

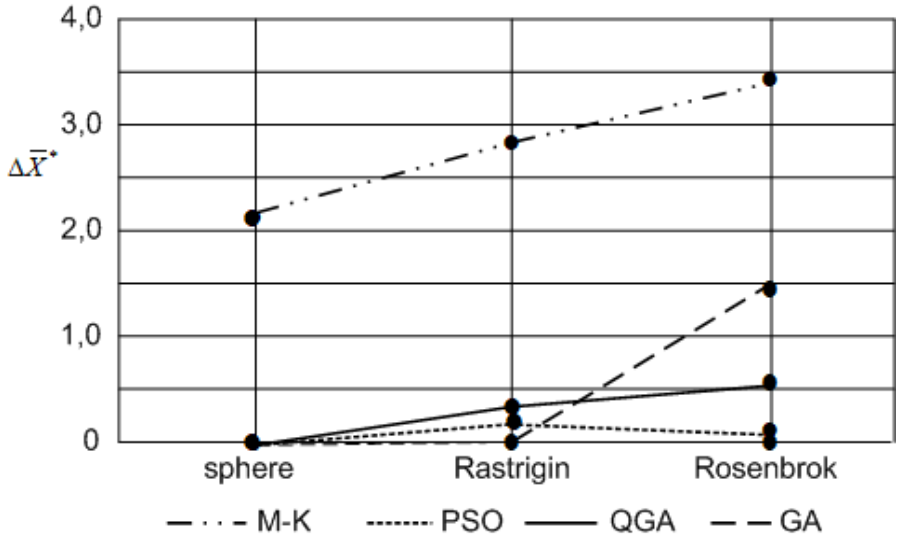


Рис. 5. Значения показателя эффективности Φ_4.

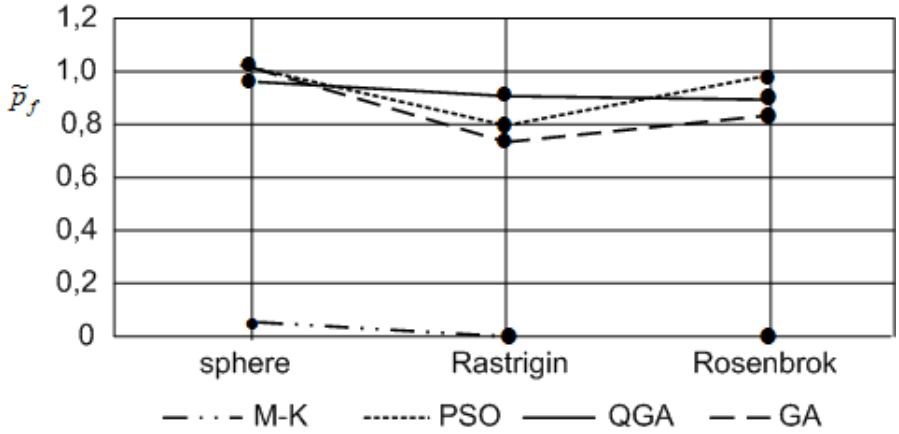


Рис. 6. Значения показателя эффективности Φ_5.

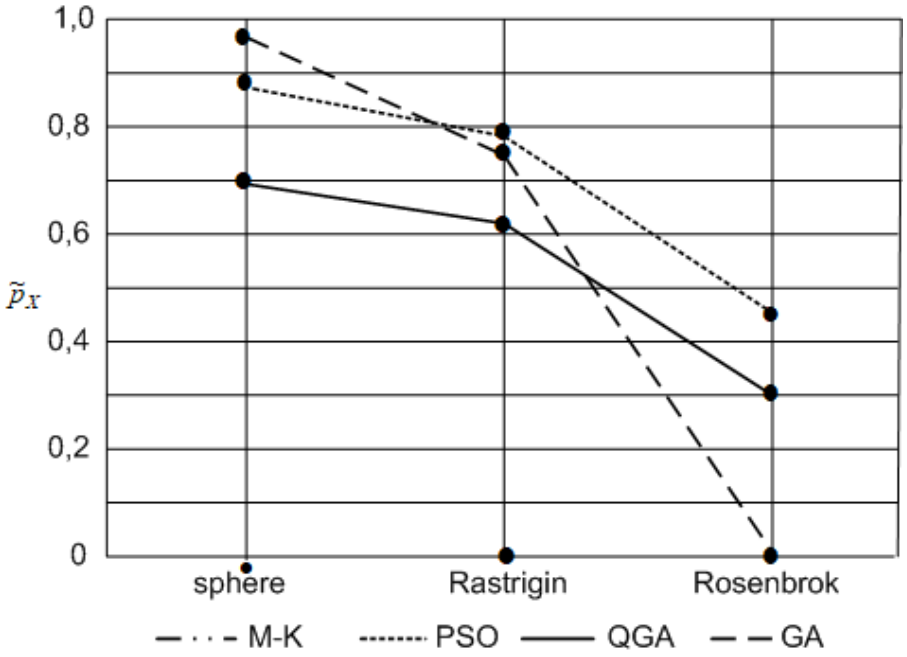


Рис. 7. Значения показателя эффективности Φ_6.

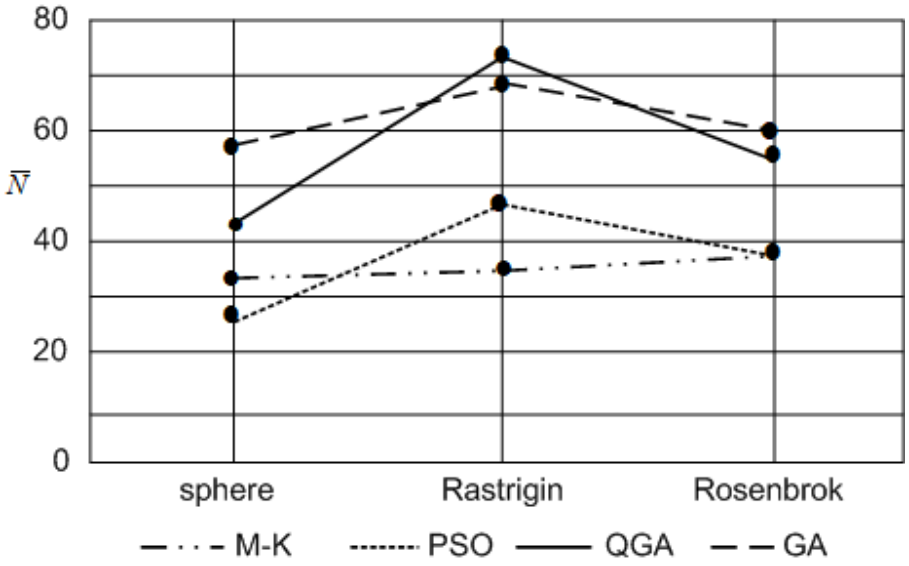


Рис. 8. Значения показателя эффективности Φ_7.

Рис. 2 - 5 показывают, что с точки зрения показателей Φ_1 – Φ_4 эффективность алгоритма QGA близка к эффективности канонических алгоритмов PSO и GA. По сравнению с алгоритмом Монте-Карло, алгоритм QGA, как и ожидалось, показывает лучшие результаты (особенно для многоэкстремальной функции Растригина и овражной функции Розенброка). По сравнению с алгоритмом GA алгоритм QGA, ожидаемо, показывает лучшие результаты (особенно для овражной функции Розенброка, для которой этот алгоритм оказывается примерно на 61% лучше).

Рис. 6 показывает, что по индикатору эффективности Φ_5 для многоэкстремальной функции Растригина алгоритм QGA обеспечивают пример-

но на 16% лучшие результаты по сравнению с каноническими алгоритмами PSO и GA. Отметим, что алгоритм Монте-Карло по этому индикатору показывает неприемлемо низкие результаты.

Качественно близкие результаты алгоритм QGA показывает также по показателю Φ_6. При этом для функции Розенброка алгоритмы GA и Монте-Карло по этому показателю показывает очень низкие результаты.

Рис. 8 иллюстрирует тот факт, что с точки зрения показателя Φ_7 алгоритм QGA хуже алгоритма PSO примерно на 38, 37 и 35% для функций сфера, Растригина и Розенброка соответственно. Для функций сфера и Розенброка алгоритм QGA обеспечивают примерно на 21% и 6% лучшие результаты по сравнению с каноническим алгоритмом GA.

Рис. 9 иллюстрирует поведение значений интегрального показателя Φ для алгоритмов Монте-Карло, PSO, GA, QGA. Из рисунка следует, что с точки зрения этого показателя алгоритм QGA примерно эквивалентен алгоритмам PSO и GA. Для функций Розенброка алгоритм QGA показывает лучшие результаты в сравнении с алгоритмом GA.

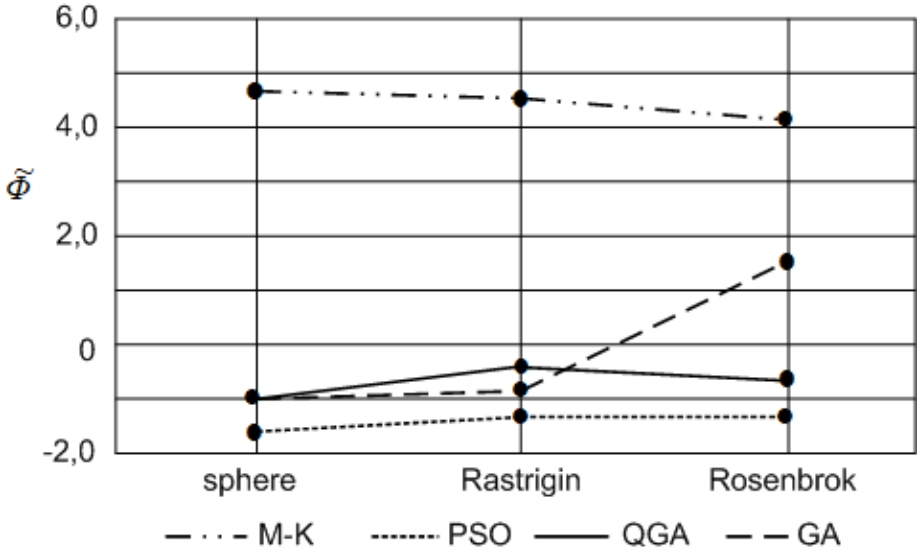


Рис. 9. Значения интегрального показателя эффективности Φ.

Заключение. В работе предложен новый алгоритм глобальной оптимизации QGA, представляющий собой «квантовую» модификацию канонического генетического алгоритма GA. Модификация направлена на обеспечение возможности использования алгоритма QGA для решения задач групповой робототехники, сводящихся к локализации глобального экстремума некоторой скалярной целевой функции.

Средствами программного комплекса MatLab выполнена программная реализация алгоритма QGA.

Исследование эффективности разработанного алгоритмического и программного обеспечения выполнено на двухмерных тестовых функциях сфера, Растригина и Розенброка. Результаты исследования показали эффективность предложенных алгоритмических и программных решений и

перспективность использования алгоритма QGA для решения указанного класса задач групповой робототехники.

Результаты исследования породили некоторые вопросы. Хотя квантово-генетический алгоритм QGA улучшен по сравнению с генетическим алгоритмом GA, этот алгоритм значительно проигрывает алгоритму PSO с точки зрения такого показателя эффективности, как среднее по мультистарту число испытаний. Для преодоления этого недостатка алгоритма QGA авторы в развитие работы планируют предложить и исследовать эффективность некоторых модификаций этого алгоритма на основе гибридизации его с другими популяционными алгоритмами глобальной оптимизации [1]. В развитие работы авторами планируется также исследовать эффективности алгоритма QGA для других тестовых функций.

Литература

1. Карпенко, А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы вдохновленные природой. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 446 с.
2. Godfrey C. Onwubolu, B. V. Babu. New Optimization Techniques in Engineering. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2004. - 712 p.
3. Гладков, Л.А., Курейчик, В.В, Курейчик, В.М. и др. Биоинспирированные методы в оптимизации: монография. – М.: Изд-во «Физматлит», 2009. – С. 384.
4. Родзин, С.И., Скобцов, Ю.А., Эль-Хатиб, С.А. Биоэвристики: теория, алгоритмы и приложения: монография. – Чебоксары: ИД «Среда», 2019. – 224 с.
5. Пантелеев, А.В., Метлицкая, Д.В., Алешина, Е.А. Методы глобальной оптимизации: Метаэвристические стратегии и алгоритмы. – М.: «Вузовская книга», 2013. – 244 с.
6. Brownlee Jason. Clever Algorithms: Nature-Inspired Programming Recipes, 2011. – 441 p. (https://github.com/clever-algorithms/CleverAlgorithms).
7. Can Umit, Alatas Bilas. Physics Based Metaheuristic Algorithms for Global Optimization // American Journal of Information Science and Computer Engineering, 2015. Vol. 1. No. 3. – pp. 94-106.
8. Nazmul Siddique, Hojjat Adeli. Nature Inspired Computing: An Overview and Some Future Directions // Cognitive Computation, 2015. Vol. 7. – pp. 706–714.
9. Sangita Roy, Samir Biswas, Sheli Sinha Chaudhuri. Nature-Inspired Swarm Intelligence and Its Applications // International Journal of Modern Education and Computer Science (IJMECS), 2014. Vol.12. – pp. 55-65.
10. Sean Luke. Essentials of Metaheuristics (Second Edition). 2013. Publisher: lulu.com. – P. 242.
11. Xin-She Yang. Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms. Second Edition. Luniver Press, United Kingdom, 2010. – 115 p.
12. Ashraf Darwish. Bio-inspired computing: Algorithms review, deep analysis, and the scope of applications // Future Computing and Informatics Journal. 2018. Vol.3. – pp. 231-246.
13. Ajit Narayanan, Mark Moore. Quantum-Inspired Genetic Algorithms / Evolutionary Computation, 1996, Proceedings of IEEE International Conference on. – pp. 1-6.

УДК 72.01

АДАПТИВНЫЕ КАРКАСНЫЕ КОНСТРУКЦИИ АСИММЕТРИЧНЫХ МНОГОФОКУСНЫХ ОБОЛОЧЕК

Д.Ю. Козлов,
НИИТИАГ филиал ФГБУ ЦНИИП Минстроя России, г. Москва, Россия,
e-mail: kozlov.dmitri@gmail.com

Аннотация. *Бионические исследования, проведенные в 1970-х – 1980-х годах в Лаборатории архитектурной бионики ЦНИИТИА показали, что формы асимметричных природных яйцевидных оболочек могут быть смоделированы посредством вращения плоских многофокусных кривых вокруг их осей симметрии. Такие кривые представляют собой обобщенные параболы и описываются уравнениями порядка 2^n, где n – число фокусов этой кривой. Каждая точка такой параболы лежит на равном расстоянии от заданной точки F (фокуса) и прямой l (директрисы), не проходящей через точку F. Если число фокусов увеличивается до двух и более, то при сохранении свойства директрисы кривые становятся замкнутыми и приобретают асимметричные, в частности яйцеобразные, формы. Дальнейшие исследования показали, что оболочки птичьих яиц состоят из нескольких слоев, выполняющих различные физиологические функции. Плетеный внутренний слой оболочки яйца выполняет механические функции, работая на растяжение. Результаты этих исследований послужили основой для экспериментов с асимметричными комплексными конструкциями, состоявшими из упругого каркаса и жесткого покрытия. В этих экспериментах адаптивный каркас конструкции, выполненный в виде циклического узла из замкнутого упругого стержня, воспроизводил несущий принцип плетеной внутренней оболочки яйца. Такой конструктивный принцип создания асимметричных оболочек упрощает их формообразование и снижает их вес. Преимущества асимметричных оболочек заключаются не только в лучшей сопротивляемости внешним нагрузкам, но и в выразительности их форм, позволяющих получать интересные архитектурные решения.*

Ключевые слова: *бионика, архитектурная бионика, яйцевидные оболочки, асимметрия, упругие структуры, узлы, формообразование, математическое моделирование, многослойные покрытия.*

ADAPTIVE FRAME STRUCTURES OF ASYMMETRIC MULTIFOCAL SHELLS

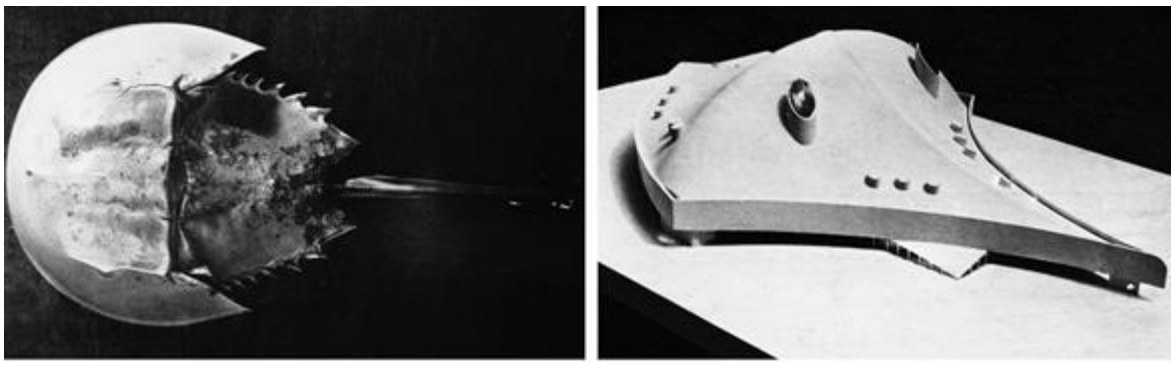
D.Yu. Kozlov,
Research Institute of Theory and History of Architecture and Urban Planning, Moscow, Russian Federation

Abstract. *Bionic studies undertaken in 1970s – 1980s in the Laboratory of Architectural Bionics (Moscow, Russia) have demonstrated that geometry of natu-*

ral asymmetric eggshells often forms by rotating of multifocal plane curves around their axes of symmetry. The curves can be described by an equation of the order of 2^n, where n is the number of foci of the curves. The curves are a generalization of a parabola. Each point of a parabola lies at an equal distance from a given point F (focus) and a given line l (directrix) that does not pass through F. When the number of foci increases to two or more and its directrix property preserves, the curve becomes closed and acquires an asymmetric egg-like shape. Further bionic studies demonstrated that the natural eggshells consist of several layers that perform different physiological functions. The inner woven layers of eggshells perform mechanical functions, working in tension. The results of the studies served as the basis for experiments with complex asymmetric structures with elastic frame and rigid coverings. In these experiments, adaptive frame structures made in the form of cyclic closed knots from elastic rods of composite materials simulated the bearing principle of the inner woven structures of an eggshell. This structural principle of asymmetric eggshells makes it possible to simplify formation of the shells and reduce their own weight. The advantages of asymmetric shells include not only the best resistance to external loads, but also the expressiveness of the form, which makes it possible to achieve interesting architectural solutions.
Keywords: *bionics, architectural bionics, egg-shells, asymmetry, resilient structures, knots, form-finding, mathematical modelling, multilayer coverings.*

Введение. Классики инженерного искусства 20-го века уделяли особое внимание форме конструкций как основному инструменту обеспечения наилучшей несущей способности сооружений. Так, Э. Торроха считал, что лучшим сооружением является то, надежность которого обеспечивается главным образом за счет его формы, а не за счет прочности его материала. По мнению П.Л. Нерви, «работа по форме» представляет собой наиболее существенное из всех средств механической сопротивляемости конструкций и наиболее распространенное в живой природе [1].

Механическая «работа по форме» оболочек живой природы также часто проявляется в их асимметрии. Асимметричными природными оболочками являются панцири моллюсков, яйца птиц, надкрылья насекомых, черепа млекопитающих, включая и человека. Их асимметричные формы возникают как результат функционирования живых организмов в окружающей среде. В этом случае асимметрия природных форм является адаптацией живых организмов к направленным воздействиям внешней среды, таким как ветровые нагрузки, давление воды, солнечное излучение, действие силы тяжести, и т.д. Таким образом, асимметрия форм оболочек живой природы является комплексным проявлением асимметрии функций живых организмов, в число которых входит и механическое сопротивление внешним и внутренним нагрузкам.



а) *б)*

Рис. 1. (а) Асимметричная природная оболочка – панцирь мечехвоста, (б) проект театрального здания для северных регионов.

Опыт живой природы может быть использован для создания асимметричных оболочек в области строительства и архитектуры (рис. 1). Как показали эксперименты и расчеты, асимметричные оболочки имеют многие преимущества перед симметричными оболочками, которые пока еще более распространены в практике строительства. С архитектурной точки зрения асимметричные формы в большинстве случаев предпочтительнее, чем симметричные. Они также допускают большую свободу объемных и планировочных решений, что дает возможность достигать их большей эстетической выразительности.

Архитектурная бионика как новое научное направление и архитектурно-бионический метод в архитектуре как его прикладная часть были впервые сформулированы в СССР в середине 1960-х годов в работах Ю.С. Лебедева [2]. Архитектурная бионика стала также синтезом теоретических положений советской архитектуры о гармонии природы как образца для архитектурного творчества и принципов технической бионики, находящихся на стыке естественных наук, кибернетики и инженерного искусства [3, 4].

По определению Ю.С. Лебедева, бионический метод представляет собой использование в архитектуре законов формообразования живой природы, ее средств и форм с целью решения архитектурных задач. Архитектурная бионика использует в архитектуре функции живой природы, неразрывно связанные с формой их проявления. Архитектурно-бионическая практика следует от функции к форме, чем принципиально отличается от заимствования форм природы с декоративно-изобразительными целями, характерных для архитектуры прошлых эпох [5].

Архитектурно-бионическое исследование в общем случае представляет собой процесс восхождения от биологического аналога к его обобщенной модели, затем к ее математическому принципу, а от него – к архитектурной форме или строительной конструкции. Непосредственная связь между биологическим аналогом и архитектурным или строительным объектом за редкими исключениями невозможна и требует целого ряда промежуточных стадий исследований.

1. Математическое описание асимметричных оболочек. Геометрические модели многих асимметричных оболочек живой природы могут быть сформированы многофокусными плоскими кривыми, вращающимися вокруг своих осей симметрии. Такие кривые описываются алгебраическими уравнениями порядка 2^n, где n – число фокусов этой кривой.

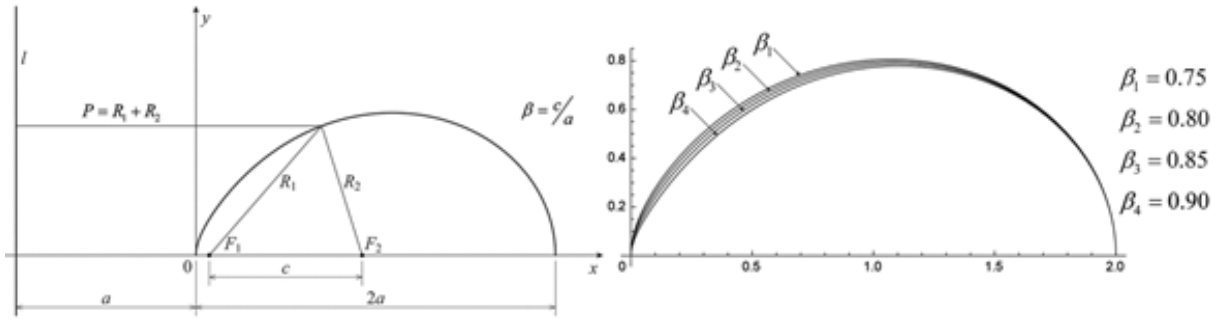
Многофокусные плоские кривые являются обобщением кривых второго порядка – эллипса, параболы и гиперболы. Для моделирования форм замкнутых оболочек, как правило, за основу принимается фокальное свойство эллипса, согласно которому сумма расстояний от каждой его точки до двух заданных точек F_1 и F_2 постоянна и больше расстояния между этими точками. Точки F_1 и F_2 являются фокусами эллипса, а постоянная сумма расстояний до них равна длине большой оси эллипса.

При увеличении числа фокусов и сохранении равенства суммы расстояний от них до каждой точки кривой образуются замкнутые кривые, описываемые уравнениями порядка 2^n, где n – число их фокусов. При коллинеарном и асимметричном расположении фокусов кривые принимают асимметричные, в том числе и яйцеобразные формы [6, 7]. Так как минимальное число фокусов такой многофокусной кривой, отличающейся от эллипса, равно трем, то ей соответствует уравнение восьмого порядка.

В 1971 году Г.В. Брандт предложила более простой и удобный способ описания яйцеобразных кривых на основе уравнений 4-го порядка. Для их вывода вместо эллипса была взята парабола и использовано ее директориальное свойство, согласно которому каждая точка параболы лежит на равном расстоянии от заданной точки F и заданной прямой l, не проходящей через F. Точка F есть фокус параболы, а прямая l – ее директриса. При увеличении числа фокусов параболы до двух и более и сохранении ее директориального свойства кривая становится замкнутой и приобретает асимметричную яйцевидную форму (рис. 2а). При двух фокусах кривой соответствует уравнение 4-го порядка. Его решение определяет формула

$$y = \frac{1}{2}\sqrt{3x(2-x)\left(1-\frac{\beta^2}{(x+1)^2}\right)}, \qquad (1)$$

где $0 \le x \le 2$, $0 \le \beta \le 1$, $\beta = c/a$; a – половина большой оси; c – расстояние между фокусами. При различных значениях коэффициента β, характеризующего форму кривой, и постоянной величине большой оси, уравнение (1) описывает семейство асимметричных кривых. Если отношение малой оси кривой к ее большой оси изменяется в пределах 0,75 - 0,86, то в этот диапазон попадает целый ряд меридиональных сечений птичьих яиц (рис. 2б). Например, отношение от 0,75 до 0,80 соответствует формам куриных яиц, от 0,81 до 0,84 – формам яиц перепелки [8].



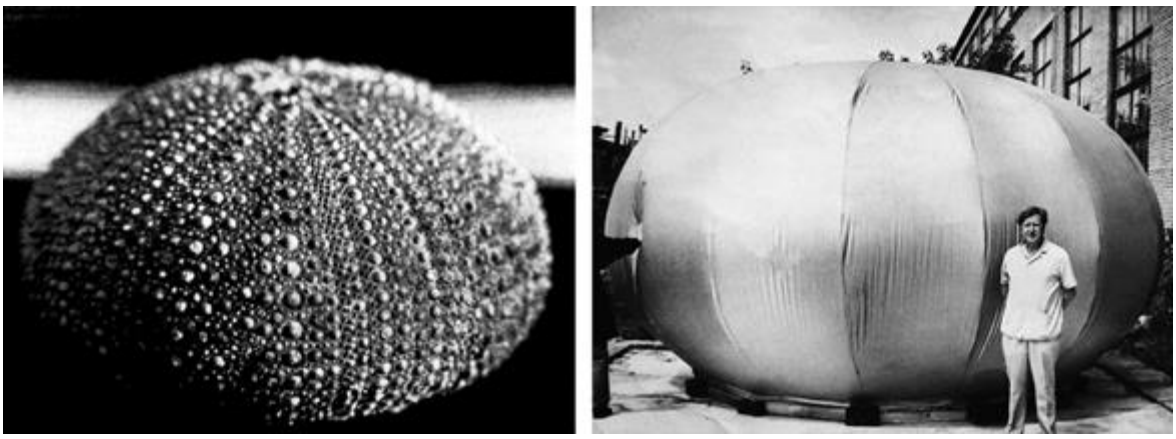
а) *б)*

Рис. 2. (а) Построение двухфокусной кривой,
(б) значения параметра β характерные
для продольных сечений птичьих яиц.

Поверхность, образованная вращением кривой (1) вокруг ее большой оси, уже в середине 1970-х годов послужила основой для компьютерного проектирования и создания физических моделей, выполненных на станках с числовым программным управлением. Аналогичным образом были выведены уравнения для трехфокусных кривых с постоянной суммой радиусов, и неколлинеарным расположением фокусов. Такие кривые при некоторых значениях своих параметров близки по своей форме к меридиональным сечениям панцирей морских ежей [8].

2. Проекты и экспериментальные конструкции асимметричных оболочек. Компьютерный анализ распределений кольцевых и меридиональных напряжений в оболочках различных форм показал их зависимость от изменения кривизны поверхности. При одинаковом опорном контуре параболоид имеет наибольшие меридиональные напряжения опорного кольца, эллипсоид имеет скачки напряжения при переходе через максимум. Двухфокусная яйцевидная поверхность имеет плавный переход через максимум и значительно меньшее напряжение, чем у параболоида при тех же габаритах опорного контура. Эти исследования дали основание для использования двухфокусных поверхностей и их фрагментов как оболочек покрытий, особенно в условиях, где требуется экономия объемов перекрываемого пространства [8].

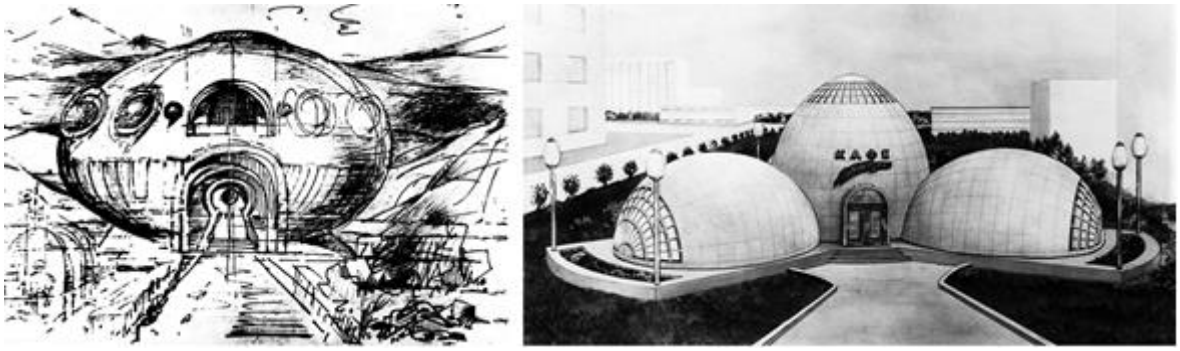
В 1970 – 1990 годах на основе полученных аналитических расчетов в Лаборатории архитектурной бионики были созданы многочисленные проекты зданий и сооружений в форме асимметричных оболочек. Их главными разновидностями были воздухоопорные (пневматические) конструкции (рис. 3) и бетонные оболочки-скорлупы, для которых использовались асимметричные оболочки-пневмоопалубки (рис. 4).



а) б)

Рис. 3. (а) Панцирь морского ежа, (б) Ю.С. Лебедев на испытаниях пневматической оболочки, форма которой получена вращением трехфокусной кривой (1970-е годы).

Особый интерес такие оболочки представляют для создания сооружений в экстремальных климатических условиях, с повышенными ветровыми и снеговыми нагрузками. Так как асимметричные оболочки, как показали эксперименты, лучше сопротивляются внешнему давлению, то был предложен ряд проектов подводных сооружений, оказывающих сопротивление давлению воды. Аэродинамическая форма асимметричных оболочек может быть также использована при создании летательных и подводных аппаратов.



а) б)

Рис. 4. Архитектурные композиции из яйцевидных оболочек (проекты 1970-х годов).

3. Исследования несущей внутренней структуры природных оболочек. Дальнейшие архитектурно-бионические исследования показали, что конструкции оболочек живой природы не являются однородными по своей структуре, а состоят, как правило, из нескольких слоев, выполняющих различные физиологические функции. В частности, скорлупа птичьего яйца состоит из семи слоев. Первый слой – кутикула – прочный наружный слой толщиной 30-50×10^{-3} мм. Далее следуют три известковых слоя пористой структуры с уменьшающейся плотностью к внутренней поверх-

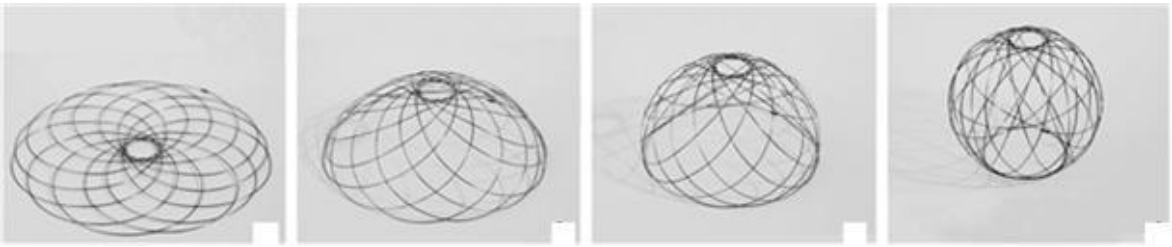
ности скорлупы толщиной 140-160×10^{-3} мм. Затем идут функциональный слой толщиной 60-80×10^{-3} мм и два плетеных слоя из кератиновых нитей прочной подскорлупной оболочки толщиной 80-100×10^{-3} мм. В целом скорлупа яйца имеет трехчастную структуру, в которой кутикула является внешним защитным средством для основного несущего, но сравнительно мягкого, с точки зрения механических свойств, слоя. Центральный функциональный слой, соединенный порами с внешней средой, производит резервацию кислорода и осуществляет влаго- и газообмен. Подскорлупные плетеные оболочки выполняют механические функции, работая на растяжение, и являются одновременно функционально-биологическими мембранами [9].

Сходную внутреннюю структуру имеют и другие природные оболочки, такие как панцирь краба, раковина морского гребешка и т.д. Поэтому обычно они работают не только на сжатие, но и на изгиб и на растяжение. Панцирь членистоногих (кутикула), как правило, имеет сложную структуру из отдельных щитков, подвижно соединенных между собой особой тканью и работающих в целом как упругая оболочка. На внутренней поверхности щитков расположены отростки для крепления к ним мышц, приводящих их в движение.

Важную роль упругих сетчатых структур в формировании природных оболочек отмечал также и Ф. Отто на основании своих более чем полувековых исследований живой природы. Так, в интервью, данном им в начале 2000-х годов архитектурной группе «Эмерджeнс», он говорил: «Нам необходимо изучать биологические структуры намного больше. Обычно они имеют только один структурный элемент – оболочку, наполненную водой, распространенную в бесконечном разнообразии вариантов. Оболочка сделана из волокон, тонкой сети. Волокна являются секретом к пониманию биологических структур» [10].

4. Асимметричные комплексные оболочки с упругим каркасом. Результаты проведенных исследований были положены в основу экспериментов с моделями упругих комплексных конструкций с жестким покрытием, начатых в середине 1980-х годов в Лаборатории архитектурной бионики. В этих экспериментах для моделирования несущей основы яйцевидных оболочек были впервые применены адаптивные каркасные структуры, выполненные в форме циклических узлов из упругих и замкнутых стержней [11].

Принцип действия таких структур основан на обратимой деформации упругих элементов, работающих за счет накопления упругой энергии и использующих так называемый «эффект резильянса», проявляющийся в накоплении энергии упругости в материале конструкций, который деформирует его, не вызывая в нем повреждений. При этом возрастающая деформация материала приводит к увеличению несущей способности самих конструкций, снижению их веса и удлинению срока их эксплуатации [12].



а) *б)* *в)* *г)*

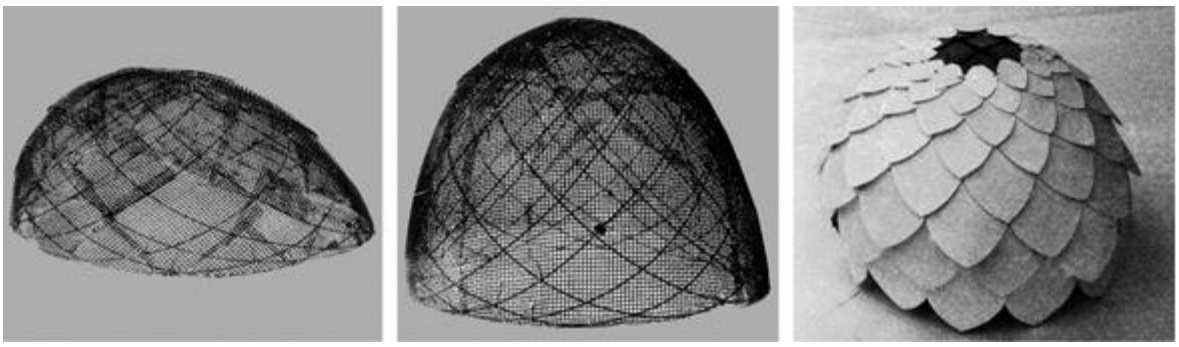
Рис. 5. Последовательность стадий трансформации структуры упругого циклического узла из плоскостного положения (а) в пространственную форму (г).

Такие структуры собираются на плоскости, а затем трансформируются в заданное пространственное положение, за счет чего упрощается и ускоряется процесс их монтажа (рис. 5). Эта технология сборки позволяет создавать по этому принципу конструкции покрытий в более сжатые сроки и с меньшими трудозатратами по сравнению с большинством известных аналогов, требующих сложного пространственного монтажа.

Адаптивные конструкции циклических узлов могут изготавливаться из упругих непрерывных стержней, выполненных из современных материалов, таких как легкие металлические сплавы или композиты – стекло- и углепластики, и имеют минимальное количество соединений, в предельном случае – только одно. Благодаря этому свойству они обладают повышенной надежностью и «живучестью» по сравнению с известными аналогами, монтируемыми из большого числа отдельных элементов с многочисленными соединениями.

Такие конструкции обладают большей вариативностью по сравнению с известными аналогами. Одна и та же изготовленная на плоскости конструкция может быть преобразована в различные пространственные формы, например, яйцевидные многофокусные оболочки различной кривизны. Любая из этих форм может быть жестко зафиксирована посредством дополнительных элементов крепления и превращена в геометрически неизменяемую конструкцию.

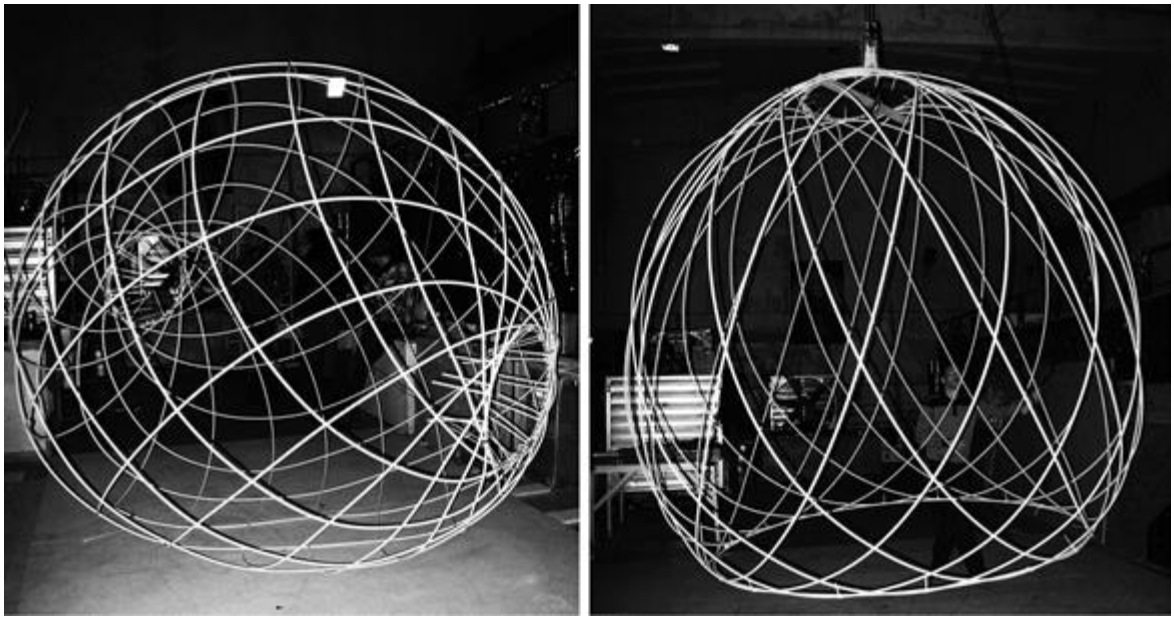
В упругих комплексных конструкциях жесткое внешнее покрытие, аналогичное строению панциря членистоногих, крепится к упругой внутренней оболочке. В результате образуется многослойная конструкция, где внешняя оболочка обладает большей жесткостью, чем внутренняя несущая основа. В этом случае несущая основа, выполненная в форме многофокусной поверхности вращения из упругого непрерывного стержня, выступает в роли армирующей структуры для комплексной конструкции оболочки. Жесткие внешние пластины произвольной формы крепятся к упругой внутренней структуре для стабилизации ее формы и передачи на нее сил. Такая комплексная конструкция позволяет сделать жесткую внешнюю оболочку максимально тонкой, что и наблюдается в аналогичных конструкциях живой природы (рис. 6).



а) б) в)

Рис. 6. Упругие комплексные конструкции яйцевидных оболочек с покрытиями (1980-е годы): а) горизонтальная асимметричная оболочка с сетчатым покрытием, б) вертикальная асимметричная оболочка с сетчатым покрытием, в) вертикальная асимметричная оболочка с упругим каркасом и жестким пластинчатым покрытием.

5. Экспериментальные исследования упругих адаптивных конструкций. Для исследования закономерностей изменения формы циклических узлов из упругих материалов были проведены эксперименты с различными способами растяжения и сжатия изначально симметричных структур в асимметричные. Растяжение осуществлялось по оси трансформации структуры при ее горизонтальном и вертикальном положениях. В первом случае добавочное напряжение позволило структуре противодействовать своим деформациям под собственным весом и удерживать заданную асимметричную форму (Рис. 7а).

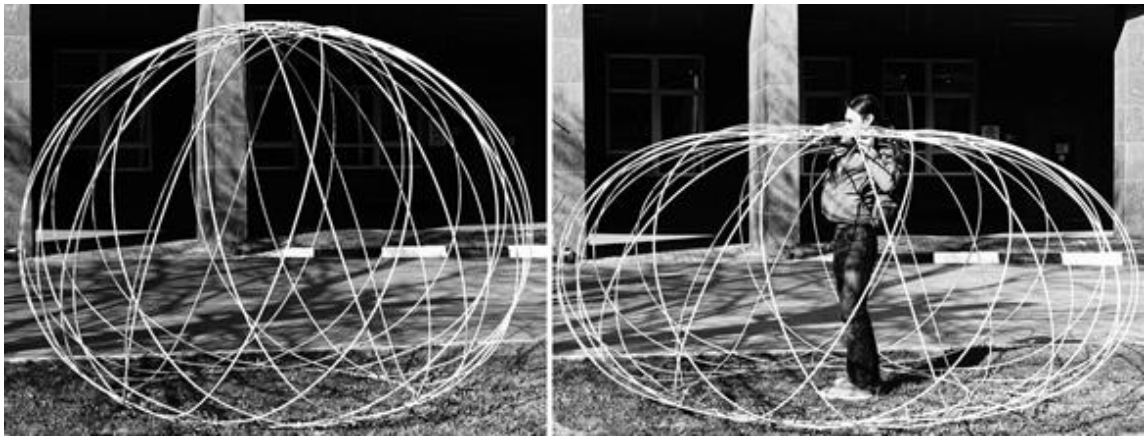


а) б)

Рис. 7. Эксперименты с преобразованием структур циклических узлов из стеклопластикового прутка к формам асимметричных оболочек методом растяжения: а) горизонтальное растяжение по оси трансформации, б) вертикальное гравитационное растяжение.

Во втором случае ось трансформации располагалась вертикально, структура подвешивалась и приобретала асимметричную яйцеобразную форму под действием гравитационного растяжения (рис. 7б).

В эксперименте со сжатием изначально симметричная структура (рис. 8а) под действием вертикальной нагрузки была преобразована в форму трехфокусной эллиптической оболочки, подобную форме панциря морского ежа (рис. 8б). Фиксация формы в таком положении приводила к увеличению несущей способности структуры за счет ее преднапряжения и увеличения пружинящих свойств.



а) *б)*

Рис. 8. Эксперименты с преобразованием структур циклических узлов из стеклопластикового прутка к формам асимметричных оболочек методом сжатия: а) структура под действием собственного веса, б) структура под действием вертикальной нагрузки преобразована в форму трехфокусной эллиптической оболочки.

Заключение. Конструктивные основы живых организмов различаются по принципу их расположения, который может быть внутренний или внешний. Живые организмы с внутренним расположением скелета, к которым относятся млекопитающие, птицы, рептилии и рыбы, известны как эндоскелетные. В противоположность им организмы с внешним расположением скелета, такие как моллюски, ракообразные и насекомые, относятся к экзоскелетным. У этих организмов несущую функцию выполняет покрытие, которое крепится к упругой внутренней оболочке.

В том случае, если экзоскелетные организмы в процессе своего функционирования изменяют свою форму, их жесткая внешняя оболочка состоит из отдельных элементов, обладающих подвижностью друг относительно друга. Характерными примерами таких подвижных жестких оболочек являются панцири насекомых и ракообразных, представляющих собой упругие комплексные конструкции.

В классическом строительном искусстве преимущественно рассматриваются строения с жестким каркасом. Это обеспечивает зданию устойчивость и долговечность, а также позволяет напрямую передавать нагрузки с элементов каркаса на фундамент. Упругие комплексные конструкции

предлагают совершенно иной принцип: упругий изменяемый каркас с возможностью изменения геометрических параметров и жесткое покрытие, подстраивающееся под каркас. Такой подход позволил бы удешевить строительство быстровозводимых сооружений за счет адаптивных возможностей каркаса и относительно небольшой толщины покрытия.

При проектировании и расчете упругих комплексных конструкций их материал можно считать универсальным пространственным сильно изгибаемым нелинейным конечным элементом. При моделировании упругих комплексных конструкций с жестким покрытием, используя нелинейный конечный элемент, можно полностью определить его деформацию.

Жесткое внешнее покрытие крепится к упругой плетеной внутренней оболочке, образуя многослойную конструкцию, аналогичную строению панциря экзоскелетных организмов. Внешняя оболочка обладает большей жесткостью, чем внутренний скелет – адаптивная сетчатая оболочка, выполняющая функцию армирующей структуры такой комплексной конструкции. Жесткие внешние пластины произвольной формы крепятся к упругой адаптивной внутренней структуре и передают усилия на него. Рассчитанная по формуле (1) асимметричная оптимальная форма конструкции позволяет сделать ее внешнюю ограждающую оболочку максимально тонкой, а всю конструкцию – предельно легкой.

Литература

1. Лебедев, Ю.С. Архитектура и бионика. – М.: «Стройиздат», 1977.
2. Лебедев, Ю.С. и др. Архитектурная бионика. – М.: «Стройиздат», 1990.
3. Kozlov, D., Architectural Bionics: From Living Nature to Architecture. *In: Kine[SIS]tem. From Nature to Architectural Matter*, Lisbon: ISCTE-IUL, 2017: 102-110.
4. Kozlov, D., The Heritage of the Laboratory of Architectural Bionics and the Latest Trends in Architectural Morphogenesis. *In: Proceedings of the 2019 International Conference on Architecture: Heritage, Traditions and Innovations*, 2019: https://doi.org/10.2991/ahti-19.2019.68
5. Otto, F., Burkhardt, B., Pollig, H. (eds.), A Publication for the Exhibition “Natural Structures” in the Shussev Museum of Architecture in Moscow. Information of the Institute for Lightweight Structures (IL) No 32, Stuttgart: University of Stuttgart; 1983.
6. Gardner, M., The Last Recreations: Hydras, Eggs, and Other Mathematical Mystifications. New York: Springer-Verlag; 1997.
7. Sahadevan, P.V., Evolution of ‘n’ polar curves by extension of focal points (by more than two) of an ellipse. *In: Proceedings of Indian Academy of Science*.; 1974; 79; 269-281.
8. Брандт, Г.В. Геометрия многофокусных поверхностей (в приложении к архитектурно-строительной бионике). – М.: Изд-во АН СССР, Научный совет по комплексной проблеме «Кибернетика», 1979.
9. Вознесенский, С., Ханухов, Х. Оболочки нового типа. *Архитектурная композиция. Современные проблемы*. – М.: «Стройиздат», 1970. – С. 147-149.
10. Frei Otto in Conversation with the Emergence and Design Group. *In: Architectural Design* Vol. 74, No. 3, London: Artmedia Press; 2004: 18-25.
11. Kozlov, D., Resilient Adaptive Structures of Multifocal Asymmetric Shells. *In: Proceedings of the International Conference on Spatial Structures 2020/21* Surrey, UK: Spatial Structures Research Centre of the University of Surrey; 2021: 546-554.
12. Kozlov, D., Dome Structures for Flexible Material. *In: Roofs: Human Settlements and Socio-Cultural Environment, Part 1.* Paris: UNESCO; 1991: 127-131.

УДК 575+616+51

СЛОЖНЫЕ СЕТИ В МОДЕЛЯХ ЭПИДЕМИЙ

В.В. Котин,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия,
e-mail: v.kotin@gmail.com

Аннотация. *Неотъемлемой частью сетевой науки (network science) с самого момента ее становления является исследование живых систем. Понятийный и математический аппарат теории сложных сетей позволяет, и весьма эффективным образом, выявлять практически значимые макроскопические особенности динамики сложных многокомпонентных объектов, холистические свойства которых определяются связями и взаимодействиями большого числа подсистем. Именно таковыми в своих внешних, доступных наблюдателю и экспериментатору проявлениях являются живые системы – социальные, экономические, биологические, искусственные.*

В работе представлен краткий обзор результатов применения теории сложных сетей (complex networks) для решения задач прогнозирования и контроля распространения инфекционных заболеваний в человеческих популяциях. Сравниваются два типа моделей популяционной динамики заболеваемости – компартментные и сетевые. Моделирование на основе гипотезы полного перемешивания (компартменты) сопоставляется с включением в теоретический инструментарий гипотетических и эмпирических данных о гетерогенности инфекционных контактов в человеческих сообществах (сетевые модели).

Рассматриваются различные типы сетей-моделей и эпидемиологически значимые сетевые метрики. Продемонстрирована зависимость эпидемического порога от структуры сети. Перечислены ожидающие своего решения проблемы использования сетевых моделей в математической эпидемиологии.

Ключевые слова: *сложные сети, модели эпидемий, эпидемический порог, безмасштабные сети.*

COMPLEX NETWORKS IN EPIDEMIC MODELS

V.V. Kotin,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract. *The study of living systems has been an integral part of network science since its formation. The conceptual and mathematical apparatus of the theory of complex networks makes it possible, and very effectively, to reveal practically significant macroscopic features of the dynamics of complex multicomponent objects with holistic properties determined by links and interactions between a large number of subsystems. These are the living systems – social, economic, biological, and artificial – in their external, accessible to the observer and experimenter manifestations.*

This paper presents a brief review of the results of applying complex networks theory to the problems of predicting and controlling the spread of infectious diseases in human populations. This study compares two types of population dynamics models: compartmental and network models. Modeling based on the hypothesis of complete mixing (compartmental models) is compared with the inclusion of hypothetical and empirical data on the heterogeneity of infectious contacts in human communities (network models) into the theoretical toolkit. This paper considers different types of network models and epidemiologically relevant network metrics and demonstrates the dependence of the epidemic threshold on network structure. The pending problems of using network models in mathematical epidemiology are listed.
Keywords: *complex network, epidemic model, epidemic threshold, scale-free networks.*

Введение. Достаточно неожиданная, а в ряде случаев и ставшая весьма критической, актуальность проблем математической эпидемиологии формирует новый интерес и новые подходы к «старым» задачам в этой области. Анализ последних публикаций по моделированию распространения инфекционных болезней в человеческих популяциях показывает, что традиционные компартментые модели, несмотря на известную их ограниченность (усреднение по выделенным группам населения всех эпидемических параметров), остаются до сих пор весьма востребованными. Рост числа публикаций, посвященных моделированию динамики инфекционных заболеваний, иллюстрируется на рис. 1 [1]. Во многих из индексированных в [1] работ используются именно компартментые модели.

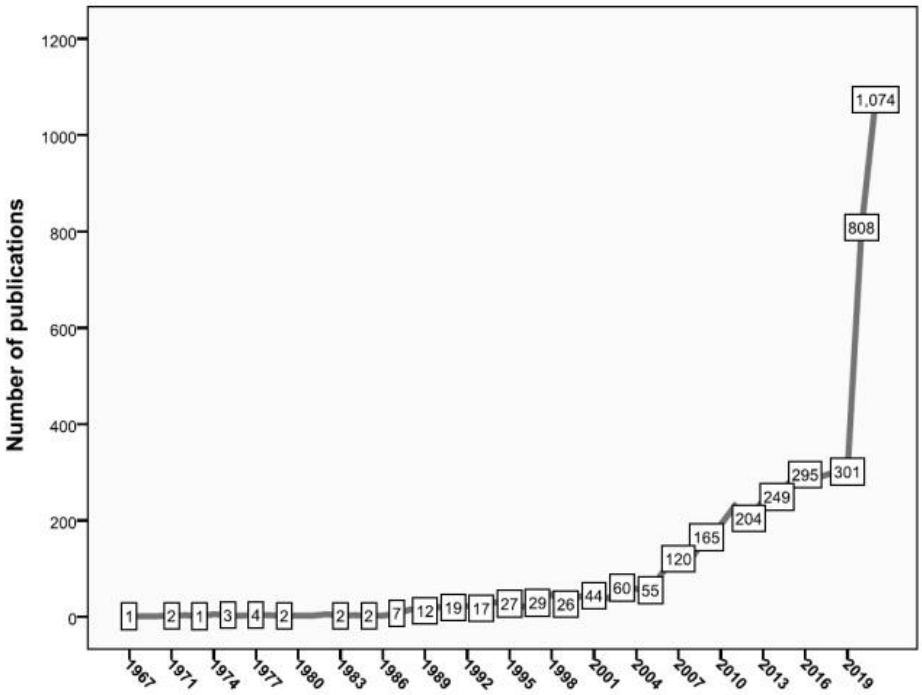


Рис. 1. Ежегодное количество публикаций, посвященных моделированию динамики отдельных инфекционных заболеваний (Приводится по [1], с. 5).

Востребованность компартментых моделей обусловлена, в частности, также и тем, что они позволяют компактно и последовательно формулировать задачи оптимального управления противоэпидемическими вмешательствами, а для их решения использовать всесторонне и детально разработанные методы теории оптимального управления и базирующиеся на основе этих методов эффективные программно-алгоритмические инструменты. Результаты, получаемые в рамках такого подхода, дают основания (однако, к сожалению, далеко не во всех случаях) для содержательной интерпретации и последующих практически значимых выводов.

Преодоление ограничений компартментных моделей и новые перспективы прослеживаются в применении достижений сетевой науки [2, 3]. Интенсивное вторжение в научный обиход концепции сложных сетей породило новые и, как полагает ряд авторов, вполне обоснованные надежды на преодоление тупика в фундаментальной проблематике системной сложности [6, 8]. Эпидемиология, также как и исследование многообразных феноменов распространения активности в связанных системах [4,5,9,11,12], принадлежат к числу именно тех предметных областей, которые наиболее естественным образом демонстрируют результативность адаптации методологии и математического аппарата теории сложных сетей к конкретным прикладным задачам [3, 4].

В настоящей работе основное внимание уделяется следующим вопросам: переход от компартментных моделей к сетевым [5], типы сложных сетей в моделях популяционной динамики заболеваемости [4, 11-13], эпидемический порог в сетевых моделях [5, 15].

Сложные сети, живые системы и эпидемиология. Принято считать, что сложные сети, могут быть определены, хотя и несколько нестрого, как «большие» (по числу вершин и ребер) графы [4]. Сложные сети отображают свойства естественных или искусственных объектов, состоящих из многих взаимодействующих, но в некотором смысле сравнительно простых и зачастую однотипных элементарных подсистем. Связи таких взаимодействующих подсистем обычно характеризуются чрезвычайной разветвленностью, «запутанностью», формируя в результате весьма нетривиальную динамику системы в целом [3, 4].

Теория сложных сетей с самого начала своего оформления в виде отдельного направления стала активно применяться в исследованиях живых систем [6]. Вот далеко неполный перечень областей применения концепций, методологии и формального аппарата сетевой науки: метаболизм; взаимодействие белков; регуляция генов; коннектом (*connectome*) – карта связей нейронов коры головного мозга; экология – пищевые цепочки и взаимодействия видов; эпидемиология – модели динамики инфекционных заболеваний в человеческих популяциях [3, 4, 11, 12].

Что же нового предлагают сетевые модели? Анализ материалов публикаций дает все основания полагать, что появляется возможность выхода за пределы ограничений, препятствующих решению ряда серьезных про-

блем, встающих на пути исследования живых систем. К числу открывающихся перспектив относятся: преодоление редукционизма, обнадеживающие подходы к решению фундаментальной проблемы сложности, формализация холистического описания иерархических систем, методы интерпретации экспериментальных данных о наблюдаемых результатах взаимодействия различных системных уровней [3, 4, 6].

Дополним и конкретизируем приведенный выше список биологических приложений кратким перечислением актуальных задач применения сетевых моделей в эпидемиологии: идентификация путей передачи инфекций в человеческих сообществах; динамика и прогноз заболеваемости в структурированных сообществах; оценка рисков и последствий эпидемий в зависимости от различных поведенческих паттернов; разработка и оптимизация противоэпидемических вмешательств [16]. Стоит отметить, что отнюдь не представляется неожиданным то обстоятельство, что сетевые модели в силу своей природы оказываются вполне естественным образом подходящими для анализа феноменов распространения эпидемий.

Приведем пример сетевого подхода к выявлению путей передачи инфекций в человеческих сообществах [3]. Во время вспышки эпидемии атипичной пневмонии (*SARS*) в Сингапуре в 2003 году, контакты 144 из 206 диагностированных пациентов, были прослежены (рис.2) вплоть до идентификации цепочки из 5 человек, в которую входили 4 так называемых суперраспространителя (*super-spreaders*).

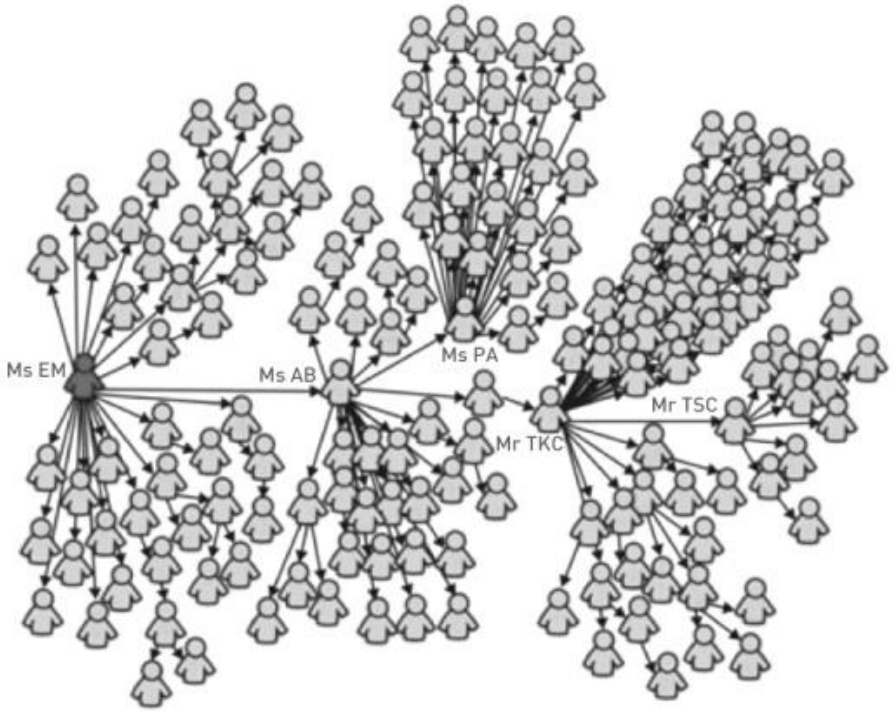


Рис. 2. Идентификация суперраспространителей SARS (Приводится по [3], fig.10-1).

Описание противоэпидемических вмешательств также может осуществляться в сетевых терминах. Так, например, схема иммунизации концентраторов (узлов с высокими степенями) – это, по существу, планирование первоочередной вакцинации индивидов, включенных в большое число инфицирующих связей с другими членами сообществ. Это может интерпретироваться как сетевая фрагментация, приводящая к прерыванию доступа патогена к индивидам, представленным в модели как узлы в сопряженных компонентах сети [3].

От компартментов к сетям: синтез сетевых моделей эпидемий. В качестве отправной точки для перехода от компартментных моделей к сетевым рассмотрим простейший вариант заболевания с отсутствием иммунитета (двухкомпартментная *SIS*-модель). При этом, согласно многократно описанному подходу, выделяют группу восприимчивых – компартмент *S*, соответственно переменную состояния *S(t)* – численность этой группы, и группу инфицированных (компартмент) *I* с численностью (переменной состояния) *I(t)*.

Построение сетевой эпидемической модели может быть сведено к следующей несколько упрощенной схеме (рис. 3): *i*-ый узел сети, имеющий степень *k*, ассоциируется с индивидом, связанным *k* инфекционными контактами с другими членами данного сообщества. Узел может находиться в одном из двух состояний:

- состояние *S* – здоров, восприимчив для заражения;
- состояние *I* – инфицирован, может выздороветь и перейти в состояние *S*.

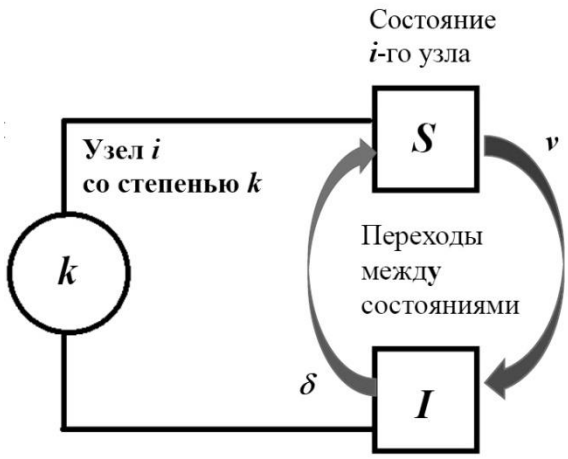


Рис. 3. Схема построения сетевой SIS-модели.

Связи между узлами отображают инфекционные контакты – пути передачи инфекционного агента. Степень узла *k* – количество связей, исходящих из данного узла модельной сети – описывает количество инфекционных контактов индивида.

Восприимчивый («здоровый», в состоянии *S*) узел заражается со скоростью *v*, если он связан с зараженным узлом («больным», в состоянии *I*).

Зараженный узел, находящийся в состоянии *I,* восстанавливается («выздоравливает») со скоростью δ. Средняя скорость развития эпидемии определяется формулой

$$\lambda = \frac{\nu}{\delta}. \qquad (1)$$

Более строго – скорости заражения и восстановления могут быть связаны с индексом узла *i,* имея при этом вероятностную трактовку [15]. Временная последовательность переходов между состояниями выделенного *i*-го узла или совокупность таких последовательностей для некоторого множества узлов ($i = 1,2...N$, где N – общее число узлов сети), по существу, и представляет собой сетевую модель распространения эпидемии в популяции.

Таким образом, построение сетевой модели распространения эпидемии в популяции в простейшем виде сводится к соотнесению типа компартмента в традиционной модели с определенным состоянием узла в сетевой модели. Сюда с необходимостью добавляется структура связей узлов сети-модели. Особенности подобного рода структуры связей узлов выясняются на основе гипотетически определенной либо эмпирически установленной цепочки трансмиссии инфекционного агента для данного типа заболевания в популяции.

Усложнение, надстройка сетевой модели с учетом особенностей конкретного типа заболевания состоит в увеличении числа возможных состояний узлов точно так же, как это обычно делается в традиционных моделях посредством разбиения популяции на большее число групп-компартментов. Модифицируется, разумеется, также и структура связей узлов, иными словами, может быть выбран иной тип сложной сети.

Типы сложных сетей в эпидемических моделях. Базовые эпидемические сетевые модели используют сети, представленные неориентированными, простыми, невзвешенными графами. Введение ряда допущений приводит к возможности применения статических (нетемпоральных) и однослойных сетей.

Чаще всего в работах по моделированию эпидемий упоминаются случайные сети, безмасштабные сети, решетки и сети «малого мира» (рис. 4) [3, 4, 11, 12]. Практическое значение имеют сети, реконструированные на основе эмпирических данных [14].

Сетевые модели и эпидемии в сообществах. *Случайные* сети с определёнными ограничениями могут использоваться для моделирования распространения инфекций в небольших группах с приблизительно равновероятными контактами между индивидами. Обычно это различного рода кружки по интересам, собрания, встречи, а также населенные пункты с неразвитой инфраструктурой.

Безмасштабные сети хорошо описывают сообщества, включающие (хотя, возможно, и сравнительно небольшое число) индивидов с очень большим числом контактов. Ими могут быть, например, учителя, врачи,

работники сферы услуг и т.д. Подобная ситуация в сетевых терминах трактуется как наличие узлов с очень высокими степенями. Такие узлы называются концентраторами, а соответствующие им члены сообществ – суперраспространителями [7].

Решетки (регулярные сети) вполне адекватны детским эпидемиям, которые порождаются контактами, сформированными за счет определенно структурированного распределения детей за соседними партами, в соседних классах, группах, школах и учреждениях.

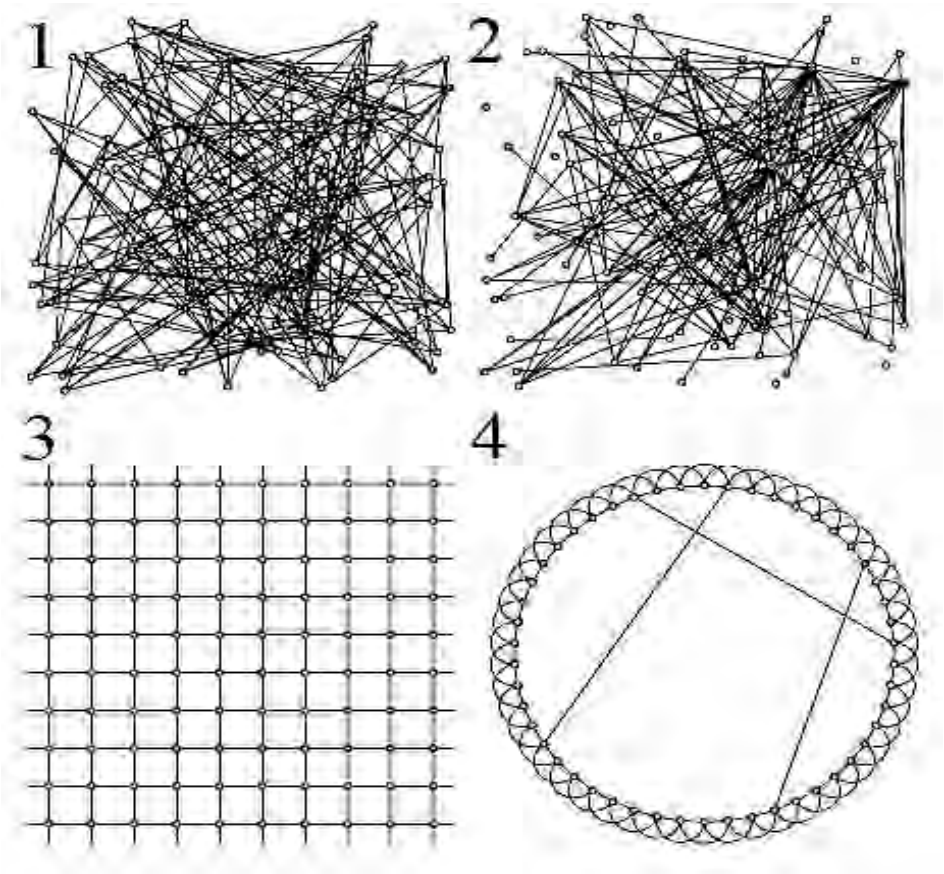


Рис. 4. Типы сетей в моделях эпидемий: 1- случайная сеть; 2 - безмасштабная сеть; 3 - решётка; 4 - сеть «малого мира» (Адаптировано по [12], с. 300).

Сети малого мира – основа для моделей эпидемий в содружествах, на рабочих местах, в офисах, плотных замкнутых сообществах. Ярким примером является документированная и смоделированная эпидемия COVID-19 на круизном лайнере «Diamond Princess» [10].

Отдельно следует упомянуть *пространственные* сети как пример сложных имитационных моделей распространения эпидемии с привязкой к географическому расположению населенных пунктов и транспортным сетям [13].

Сетевые метрики. В эпидемиологических моделях работают следующие сетевые метрики [4]: степень узла k; распределение степеней узлов $P(k)$; моменты распределения степеней $<k^n>$, $n=1, 2$; корреляции узлов или

условные вероятности $P(k \mid k')$ связи узлов со степенями k и k'; матрица смежности M_{ij}; коэффициент кластеризации C; центральность i-го узла по посредничеству b_i.

Исключительно важную роль как в процедуре синтеза сетевых эпидемических моделей, так и в интерпретации полученных результатов играет вид функции распределения степеней узлов $P(k)$. На рис. 5 показаны распределения степеней для случайной сети (*random network*) и безмасштабной сети (*scale-free network*) [11].

Случайная сеть характеризуется свойством однородности, которое и является основным фактором, влияющим на динамику инфицирования узлов в данном типе сети [5]. Скорость заражения (так же, как и эпидемический порог [15]) в случайной сети зависит от первого момента распределения степеней $<k>$.

Безмасштабная сеть обладает свойством сильной неоднородности в силу большого разброса значений степеней узлов. На формальном уровне такая система описывается наличием «тяжелых хвостов» распределения степеней (рис. 5), расходимостью второго момента $<k^2> \to \infty$ для некоторых видов функции распределения $P(k)$ и, следовательно, наличием узлов с очень высокими степенями $k >> 1$. Содержательно это означает возможность существования суперраспространителей в моделируемой сети инфекционных контактов [7].

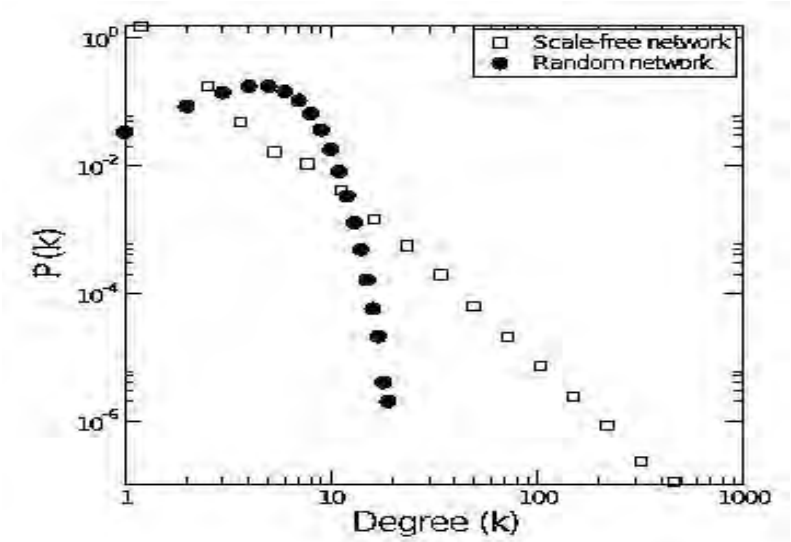


Рис. 5. Вид распределения степеней P(k) в двойном логарифмическом масштабе; ● - случайная сеть; □ - безмасштабная сеть (Приводится по [11], с.10).

Эпидемический порог. Данным термином принято обозначать некоторое критическое значение управляющего параметра, изменение которого переводит модельную систему из состояния затухания эпидемии в состояние роста эпидемии. В компартментных моделях в качестве такого управляющего параметра используется *базовое число репродукции* R_0 [5].

В сетевых моделях часто в качестве управляющего параметра рассматривается скорость распространения эпидемии (1) с нормировкой на единичную скорость восстановления (выздоровления) $\delta=1$. Одним из самых интересных результатов сетевого анализа эпидемического процесса представляется феномен *нулевого эпидемического порога.* При более общем подходе рассматривается зависимость эпидемического порога от вида функции распределения степеней и от корреляций степеней узлов [15].

Следуя работе [15], приведем в сжатом виде результаты, относящиеся к сетевому варианту *SIS*-модели.

Эпидемический порог в однородных некоррелированных случайных сетях. С учетом членов 1-го порядка динамика начальной стадии эпидемии в однородной случайной сети с *некоррелированными* узлами описывается уравнением

$$\frac{d\rho(t)}{dt} \approx -\rho(t) + \lambda < k > \rho(t) \quad , \tag{2}$$

где $\rho\ (t)$ – средняя плотность инфицированных узлов; $<k>$ – средняя степень узлов сети; λ – скорость распространения инфекции.

Из уравнения (2) следует, что эпидемический порог в случайной сети с некоррелированными узлами (при нормировке $\delta=1$) определяется выражением

$$\lambda_c^{nc} = \frac{1}{< k >} . \tag{3}$$

Критическое значение скорости заражения означает, что при выполнении условия $\lambda<\lambda_c^{nc}$ эпидемия затухает – плотность инфицированных узлов стремится к нулю $\rho\to 0$.

Эпидемический порог в некоррелированных безмасштабных сетях. В этом случае уравнение динамики плотности инфицированных узлов (в данном кратком обзоре не приводится), по форме аналогичное уравнению (2), содержит вероятности связи узла степени k с инфицированным узлом степени k'. Для вывода формулы эпидемического порога используется то обстоятельство, что в некоррелированных сетях вероятность связи узлов не зависит от степени узла k. В результате эпидемический порог определяется формулой [15]

$$\lambda_c^{nc} = \frac{< k >}{< k^2 >} . \tag{4}$$

Распределение степеней узлов безмасштабной сети описывается зависимостью $P(k)\sim k^{-\gamma}$ и при $\gamma<3$ соответствует очень большим флуктуациям степеней узлов $<k^2>\to\infty$. Тогда из (4) следует, что эпидемический порог снижается до нуля $\lambda_c^{nc}\to 0$.

Влияние корреляций узлов на эпидемический порог в безмасштабных сетях. Нулевой эпидемический порог для некоррелированных безмасштабных сетей с показателем закона распределения степеней $\gamma<3$ может смещаться от нуля до конечного положительного значения [15].

В коррелированной сети эпидемический порог определяется матрицей связности

$$C_{ij} = k_i P(j \mid i) \quad , \tag{5}$$

а не распределением степеней узлов $P(k)$, как в некоррелированных сетях:

$$\lambda_c = \frac{1}{\Lambda_{\max}} \quad , \tag{6}$$

где Λ_{max} - наибольшее собственное число матрицы связности C_{ij}.

Структура сети инфекционных контактов на основе эмпирических данных. Теоретически схема построения сетевой эпидемической модели укладывается в такую последовательность: компартменты – состояния узла – гипотеза об инфекционных контактах – выбор типа сети – сетевая модель. Вместе с тем, практически важным остается вопрос: как же перейти от гипотетической «модельной» сети к структуре реальных инфекционных контактов в сообществах? Апробированные и описанные в литературе методы, и технологии решения этой проблемы основаны на регистрации места контактов и их длительности, идентификации контактирующих лиц и последующей обработке полученных данных, позволяющих реконструировать структуру сети инфекционных контактов. Известными к настоящему моменту техническими средствами получения информации о путях передачи инфекционных агентов являются: геолокация посредством мобильных телефонов, видеонаблюдение, сопровождаемое геолокацией и ВЧ датчики сближения [14].

Рис. 6 иллюстрирует схему регистрации сближения с применением устройств RFID (*Radio Frequency Identification*) в виде бейджиков и индуктивных датчиков. Событие сближения регистрируется на расстояниях не более 1,6 м, при этом фиксируются положение «лицом к лицу», длительность контакта и геолокация. Результаты тестируются и хорошо согласуются с данными опросов. Отмечается, что реконструированные сети инфекционных контактов сильно неоднородны и содержат множество кластеров.

Заключение. В работе [16] сформулированы и прокомментированы актуальные проблемы сетевых моделей эпидемий. Перечислим эти проблемы: влияние неоднородности сообществ на оценку параметров и исход эпидемии; разработка аналитических методов для изучения эпидемий в статических невзвешенных сложных сетях; создание аналитических методов для моделирования эпидемий во взвешенных и динамических сетях; включение ослабевающего иммунитета в сетевые эпидемиологические модели; разработка и проверка схем аппроксимации; объяснение влияния сетевых свойств на исход эпидемии; установление связи между моделями и данными; разработка сетевых моделей вмешательств.

Основные направления в развитии сетевого моделирования эпидемий определяются решением этих проблем.

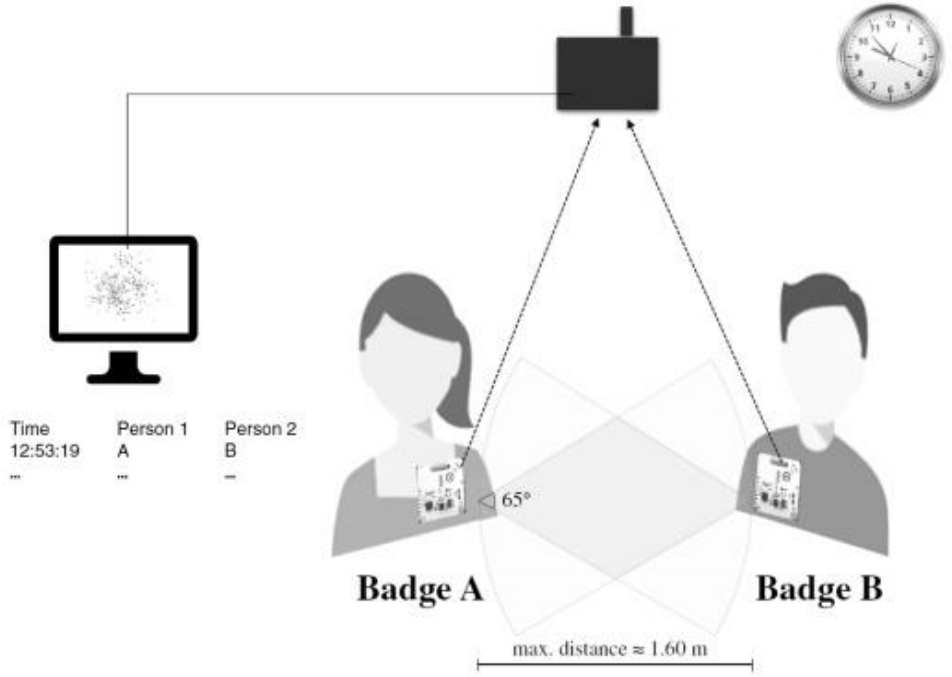


Рис. 6. Датчик B обнаруживает сигнал от датчика A и отправляет информацию на считывающее RFID устройство, связанное с сервером. Регистрируется время и событие взаимодействия (Приводится по [14], с. 2122).

Литература

1. Sweileh, W.M. Global research activity on mathematical modeling of transmission and control of 23 selected infectious disease outbreak. Global Health. 2022 Jan 21;18(1):4. doi: 10.1186/s12992-022-00803-x. PMID: 35062966; PMCID: PMC8778503.

2. A.L. Barabasi, R. Albert, Emergence of Scaling in Random Networks, Science 286, 509 (1999).

3. A.L. Barabasi, Network Science, http://networksciencebook.com, accessed 27 Jan. 2023.

4. Newman, Mark, Networks: An Introduction, Oxford, 2010; https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199206650.001.0001, accessed 27 Jan. 2023.

5. House, T. Modelling epidemics on networks, Contemporary Physics, 53:3, 213-225, DOI: 10.1080/00107514.2011.644443.

6. Costa, L. da F., Rodrigues, F. A., & Cristino, A. S.. (2008). Complex networks: the key to systems biology. Genet. Mol. Biol., 2008 31(3).

7. Razak, F.A.; Zamzuri, Z.H. Modelling Heterogeneity and Super Spreaders of the COVID-19 Spread through Malaysian Networks. Symmetry 2021, 13, 1954.

8. Евин, И.А. Введение в теорию сложных сетей // Компьютерные исследования и моделирование. – 2010. – т.2. – № 2. – с. 121–141.

9. Кузнецов, О.П. Сложные сети и распространение активности // Автоматика и телемеханика. – 2015. – Вып.12. – с. 3–26.

10. Feng Liu. Using the contact network model and Metropolis-Hastings sampling to reconstruct the COVID-19 spread on the “Diamond Princess” / Xin Li, Gaofeng Zhu // Sci Bull (Beijing) - 2020 - Vol. 65 - P. 1297-1305.

11. Danon L., Ford A.P., House T., et al. Networks and the epidemiology of infectious disease. Interdiscip Perspect Infect Dis. 2011; 2011:284909. doi:10.1155/2011/284909.

12. Keeling Matt J and Eames Ken T.D 2005. Networks and epidemic models. J. R. Soc. Interface. 2: 295–307.

13. Barthélemy, M., Spatial networks, Physics Reports, Vol.499, Iss.1–3, Feb.2011, p.p.1-101.

14. Elmer, T. et al. The validity of RFID badges measuring face-to-face interactions. Behavior Research Methods 51 (2018): 2120 - 2138.

15. Boguñá, Marián & Pastor-Satorras, Romualdo. (2002). Epidemic spreading in correlated complex networks. Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics. 66, 047104 (2002).

16. Pellis, L.et.al. Eight challenges for network epidemic models, Epidemics, Vol.10, 2015, pp. 58-62.

УДК 519.6+612.82

БИОНИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

М.Г. Кузьмина, А.В. Подопросветов,
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Россия,
Ю.Е. Гапанюк, Ю.Т. Каганов,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия,
e-mail: mg.kuzmina@gmail.com, llecxis@gmail.com,
gapyu@bmstu.ru, yurijkaganov@gmail.com

Аннотация. *Нейробионический метод яркостной сегментации изображений, развитый ранее на основе модели осцилляторной многоагентной системы с управляемой синхронизацией, позволил добиться достаточно высокой точности сегментации черно-белых и цветных изображений, а также включить в число решаемых задач задачу селективной яркостной сегментации и задачу поочередного выделения однояркостных пространственно разделенных фрагментов зрительной сцены. Предполагается развитие аналога осцилляторного метода яркостной кластеризации для задач анализа и обработки гиперспектральных изображений (кластеризации и семантической сегментации). Дальнейшее развитие нейробионической концепции предполагает использование теории динамических систем, реализованной на основе многоагентного подхода, а также использования метаграфовых моделей как реализации иерархической организации сложных нейронных сетей.*

Ключевые слова: *бионические модели и вычислительные алгоритмы, сложные нейронные сети и метаграфовые модели, многоагентные системы, задачи обработки гиперспектральных изображений.*

BIONIC APPROACH TO THE CONSTRUCTION OF HYPERSPECTRAL IMAGE PROCESSING SYSTEMS

M.G. Kuzmina, A.V. Podoprosvetov,
Keldysh Institute of Applied Mathematics PAS, Moscow, Russian Federation,
Yu.T. Kaganov, Yu.E. Gapanyuk,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract. *The neurobionic method of brightness segmentation of images, developed earlier on the basis of the model of an oscillatory multi-agent system with controlled synchronization, made it possible to achieve sufficiently high accuracy of segmentation of black-and-white and color images, and also to include among the solved tasks the task of selective brightness segmentation and the task of alternately selecting single-brightness spatially separated fragments of the visual scene. It is proposed to develop an analogue of the oscillatory brightness clustering method for the analysis and processing of hyperspectral images (clustering and semantic segmentation). Further development of the neurobionic concept involves the use of the theory of dynamic systems, implemented on the basis of a multi-agent approach, as well as the use of metagraph models as an implementation of the hierarchical organization of complex neural networks.*
Keywords: *bionic models and computational algorithms, complex neural networks and metagraph models, multi-agent systems, hyperspectral image processing tasks.*

1. Особенности задач обработки гиперспектральных изображений. Гиперспектральные изображения (hyperspectral images, HSI) определяются совокупностью данных, в которых представлены, как яркостная, так и спектральная информация, характеризующие изображение – трехмерным массивом цветных пикселей и множеством спектральных кривых, определенных для всех пикселей. Для черно-белых изображений полное множество гиперспектральных данных удобно представлять в виде трехмерного куба (3D data cube), содержащего двумерный пиксельный массив яркостной информации и одномерный массив спектральной информации для каждого пикселя (массив значений дискретизированной спектральной кривой). Трудности анализа гиперспектральных изображений связаны с тремя обстоятельствами: 1) многопиксельными массивами яркостей; 2) большим числом спектральных каналов; 3) сложным поведением спектральных кривых (с большим числом экстремумов). При этом полная окрестность каждого пикселя, как правило, содержит сильно избыточную информацию. Поэтому возникает необходимость предобработки – получения массивов гиперспектральных данных меньших размеров с сохранением наиболее существенной информации об изображении (так называемое «сжатие» данных).

Процедура «сжатия» тесно связана с определением множества неизбыточных характеристик изображения – так называемых «признаков»

(higher-level features). Получение признаков основано на исключении избыточной информации и скрытых корреляций, содержащихся в исходных данных. Одним из известных эффективных методов сжатия данных является метод главных компонент (Principle Component Analysis, PCA). Другие эффективные методы сжатия больших данных доставляют нейросетевые подходы, основанные на построении моделей многослойных сетей-автоэнкродеров (stacked autoencoders, SAE). Автоассоциативность является преимуществом автоэнкодеров (их настройка производится посредством самообучения, unsupervised learning, и не требует привлечения больших и представительных баз, размеченных данных). К настоящему времени разработано несколько типов архитектур SAE-сетей: каскады традиционных сетей-автоэнкодеров (SAE); сверточные автоэнкодеры (convolutional autoencoders; CAE).

Можно отметить примеры успешного применения SAE-подходов в решении задач анализа и обработки HSI-изображений. Так, в работах [1, 2] произведено подробное изучение возможностей SAE-сетей в задачах обработки гиперспектральных изображений. Были построены модели SAE-сетей и испытаны возможности SAE-метода при использовании чисто спектральной и объединенной спектрально-пространственной информации, содержащейся в гиперспектральных данных. Было показано, что в задачах кластеризации, классификации и семантической сегментации добавление не избыточных характеристик из SAE подхода позволяет добиться большей точности решения нужной задачи по сравнению с прямым применением таких методов, как: а) метод k – средних; б) метод, пространственной кластеризации, основанный на использовании плотности, для приложений с шумами (density-based spatial clustering of application with noise, DBSCAN); в) некоторые другие методы.

Сверточные автоэнкодеры (CAE) – многослойные двумерные глубокие сети, предназначенные для восстановления на выходе сети 2D-изображения, поданного на вход. Сеть CAE-автоэнкодера состоит из двух зеркально симметричных частей – кодирующей и декодирующей (восстанавливающей изображение по его «сжатой» версии). Извлеченные «признаки» изображения появляются в пиксельном массиве, определенном в двумерном горловом слое CAE-сети.

С особенностями решения задач обработки гиперспектральных изображений, связанными с анализом спутниковых данных, можно ознакомиться в работах [8, 9].

Предложение авторов состоит в том, что можно кластеризовать исходный набор спектральных характеристик в соответствии с одной из возможностей: 1) по метрике близости, описанной в работе [6]; 2) кластеризовать массив пикселей по цветовым характеристикам и далее применить алгоритмы сжатия, основанные на использовании автоэнкодеров для каждого кластера в отдельности. Такой подход поможет сохранить больший объем информации и, соответственно, повысить точность восста-

новления данных из сжатых изображений. Сложность подхода заключается в оценке статистической значимости повышения качества. (На качество алгоритма может влиять полнота множества представленных доменов для первичной кластеризации).

Далее будет предложен еще один метод яркостной сегментации изображений, который непосредственно можно обобщить на гиперспектральные изображения и назвать методом кластеризации.

2. Бионический метод яркостной сегментации чисто яркостных изображений. Метод яркостной сегментации чисто яркостных изображений (не содержащих спектральной информации) изображений, был развит в [3 - 5] на основе построения модели осцилляторной многоагентной системы с управляемой синхронизацией (OMAS, oscillatory multiagent system). Была построена пространственно двумерная система осцилляторов предельного цикла с изменяемой внутренней динамикой осцилляторов и изменяемым осцилляторным взаимодействием. Метод яркостной сегментации можно отнести к бионическим методам, поскольку в модели OMAS отражены экспериментально подтвержденные особенности работы мозга: 1) использование зрительной корой колебательной нейронной активности и синхронизации в процессе работы; 2) использование зрительной системой мозга динамического связывания по яркости в процессе обработки зрительной информации.

Процессором OMAS является осциллятор, динамика которого моделирует динамику нейронного осциллятора первичной зрительной коры мозга, образованного парой связанных нейронов (возбуждающего и тормозного). Это релаксационный осциллятор – осциллятор предельного цикла с параметрически управляемой бифуркационной динамикой (устойчивый предельный цикл динамической системы, соответствующий наличию устойчивых автоколебаний, бифурцирует в фокус, соответствующий переходу в состояние устойчивого равновесия посредством быстро затухающих колебаний). Осцилляторы OMAS расположены в узлах двумерной пространственной решетки, находящейся во взаимно-однозначном соответствии с пиксельным массивом анализируемого изображения. Динамика осциллятора OMAS определяется характеристиками пикселя – яркостью и направлением максимального градиента яркости в пикселе.

Состояние осциллятора характеризуется парой действительных переменных (комплексной переменной $u = u^{(1)} + i u^{(2)}$). Динамика осцилляторной системы OMAS управляется системой ОДЕ, записанной для комплексных переменных u_{jm}, определяющих состояния всех осцилляторов [3 - 5]:

$$\dot{u}_{jm} = f(u_{jm}; I_{jm}) + \sum_{j',m'}^{N} W_{jmj'm'}(u_{j'm'} - u_{jm}),\ j = 1,...,M; m = 1,...,N.$$

Функции $f(u_{jm};I_{jm})$ определяют внутреннюю динамику изолированных осцилляторов, а компоненты $W_{jm\,j'm'}$ матрицы взаимодействия осцилляторов построены в виде произведения трех функций,

$$W_{jm\,j'm'} = P_{jm\,j'm'}(\rho,\rho')Q_{jm\,j'm'}(\mathbf{s},\mathbf{s}')D_{jm\,j'm'}(|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|),$$

зависящих от размеров предельных циклов ρ и ρ' взаимодействующей пары осцилляторов, от направлений $\mathbf{s}$ и $\mathbf{s}'$ максимального градиента яркости внутри пикселей, и от пространственного расстояния между осцилляторами в OMAS. Сомножитель $P_{jm\,j'm'}$ определен пороговой сигмоидальной функцией $P_{jm\,j'm'} = w_0 H_{jm\,j'm'}(\rho_{jm}\rho'_{jm} - h)$, зависящей от произведения размеров предельных циклов ρ и ρ' [3], благодаря чему взаимодействие двух осцилляторов становится пренебрежимо малым, если хотя бы один из них находится в состоянии низкой активности. Сомножитель $Q_{jm\,j'm'}(\mathbf{s},\mathbf{s}')$ определен дельта-образной функцией, зависящей от $\mathbf{s}-\mathbf{s}'$, а сомножитель $D_{jm\,j'm'}(|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|)$ «обеспечивает» «обрезание» взаимодействия в OMAS на заданном конечном расстоянии. При таком построении взаимодействия в OMAS пара осцилляторов OMAS оказывается связанной, если оба осциллятора обладают достаточно большими амплитудами автоколебаний ρ и ρ', достаточно близкими $\mathbf{s}$ и $\mathbf{s}'$, а также расположены в системе на расстоянии, не превышающем заданный радиус пространственного взаимодействия. Построенная модель OMAS приводит к самоорганизованному возникновению кластерной синхронизации в осцилляторной системе, при которой синхронизованные кластеры осцилляторов соответствуют фрагментам изображения различного уровня яркости. При осуществлении яркостной сегментации используется также метод адаптации общей силы взаимодействия в OMAS и специальный рекуррентный процесс последовательной сегментации, состоящий из L шагов (L – число яркостных фрагментов изображения). Процесс начинается с задания величины минимальной силы взаимодействия, при которой синхронизуется кластер OMAS, соответствующий фрагменту изображения наибольшей яркости. Далее производится постепенное увеличение общей силы взаимодействия в системе и последовательное отключение из взаимодействия уже синхронизованных кластеров осцилляторов. Это позволяет произвести последовательное выделение всех фрагментов изображения, начиная с фрагмента наибольшей яркости. Помимо решения задач полной яркостной сегментации черно-белых изображений и сегментации цветных изображений метод допускает также решение следующих задач: a) задачи селективной сегментации изображения (выделения множества фрагментов с заранее заданным набором яркостей, см. рис. 1); b) задачи поочередного выделения пространственно разделенных однояркостных фрагментов изображения.

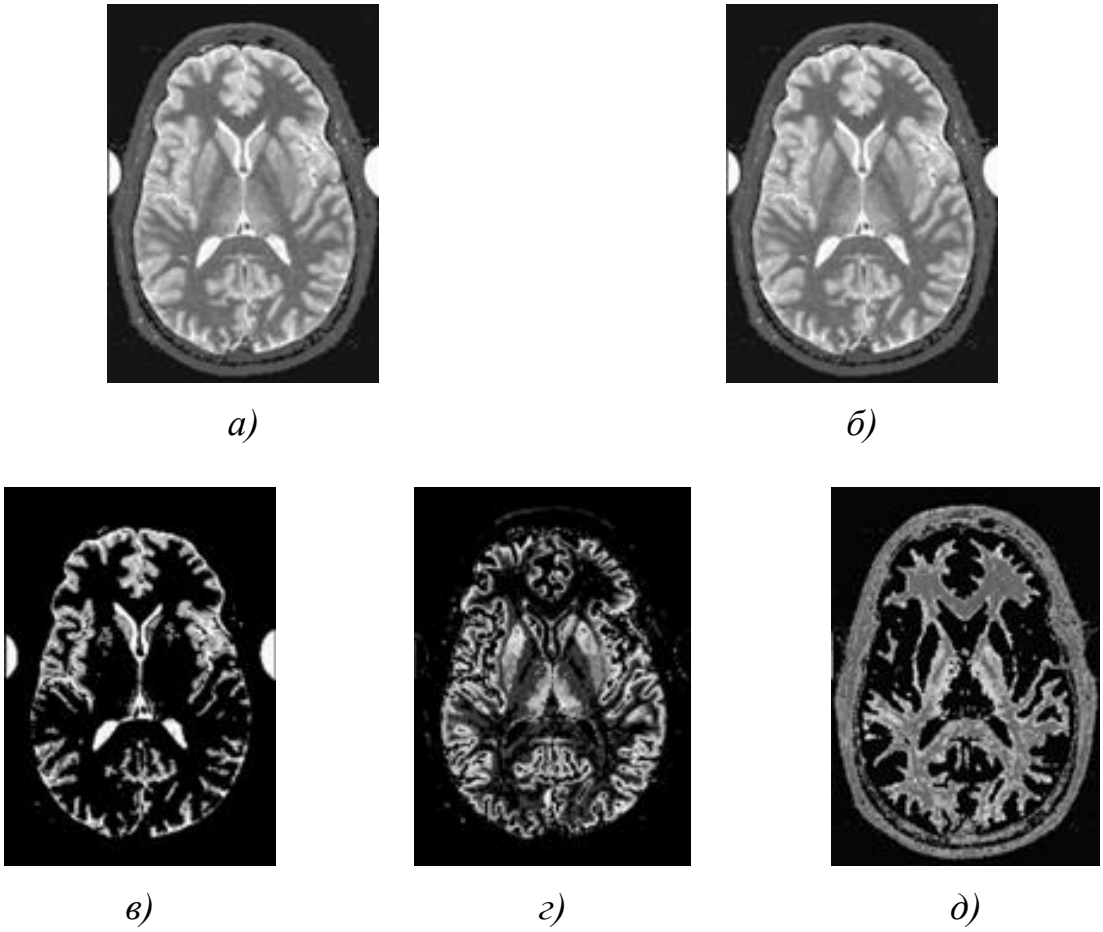


Рис. 1. Селективная яркостная сегментация изображения:
а) анализируемое изображение; б) результат полной яркостной сегментации; в) множество фрагментов наибольшей яркости;
г) множество фрагментов среднего уровня яркости;
д) множество наименее ярких фрагментов.

3. Дальнейшее развитие динамического подхода к бионическим моделям мозга. Осцилляторные нейронные сети представляют собой один из многих вариантов динамических систем, существующих в мозговых структурах. Моделирование этих структур на основе исследования их динамики позволяет, с одной стороны, лучше понять принципы работы мозга, а с другой – построить более совершенные модели искусственных нейронных сетей по сравнению с традиционными. Разработка моделей осцилляторных многоагентных систем с управляемой синхронизацией (OMAS) является подтверждением этой идеи. Основным свойством динамики многоагентных систем является наличие процессов самоорганизации, т.е. возникновение новых качеств, отсутствовавших у исходных агентов [10]. Дальнейшее развитие этого направления может быть связано с учетом иерархической организации реальных нейронных сетей и их динамической самоорганизации. В этом плане чрезвычайно большой интерес представляют работы К.В. Анохина [11, 12] в области разработки теории когнитома (рис. 2).

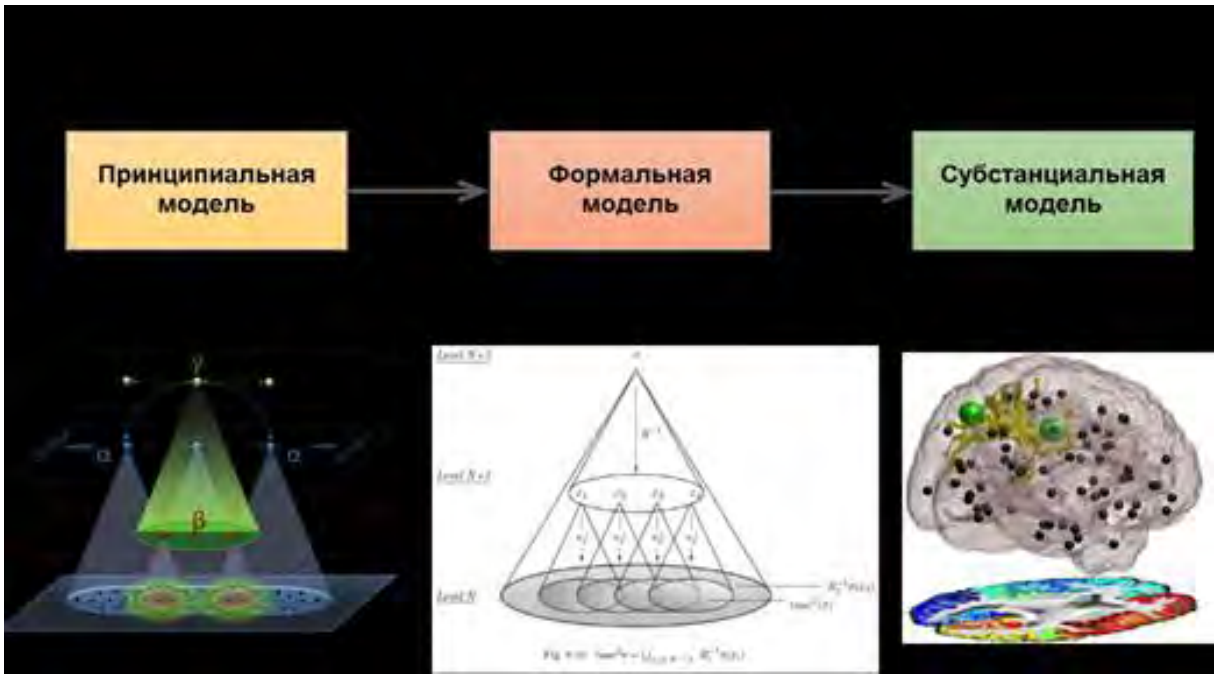


Рис. 2. Различные представления когнитома.

Когнитом представляет собой иерархическую динамическую сетевую структуру с гранулярной системой устойчивых нейронных образований. Такая структура может быть представлена в виде метаграфа, отражающего сложную иерархическую сеть с эмерджентностью в вершинах метаграфа [15]. Метаграфовый подход базируется на представлении сетевой организации в виде динамической системы [13], которая может быть интерпретирована на основе методов символической динамики как графовая структура [14] (рис. 3).

Метаграф – это холонически (иерахически) организованный граф вида

$$MG = \langle V, MV, E \rangle,$$

Вершина метаграфа характеризуется множеством атрибутов $v_i = \{atr_k\}, v_i \in V$, где v_i – вершина метаграфа; atr_k – атрибут. Ребро метаграфа также определяется множеством атрибутов, включая характеристики исходной и конечной вершин:

$$e_i = \langle v_S, v_E, \{atr_k\} \rangle, e_i \in E,$$

где e_i – ребро метаграфа; v_S – исходная вершина (метавершина) ребра; v_E – конечная вершина (метавершина) ребра; atr_k – атрибут.

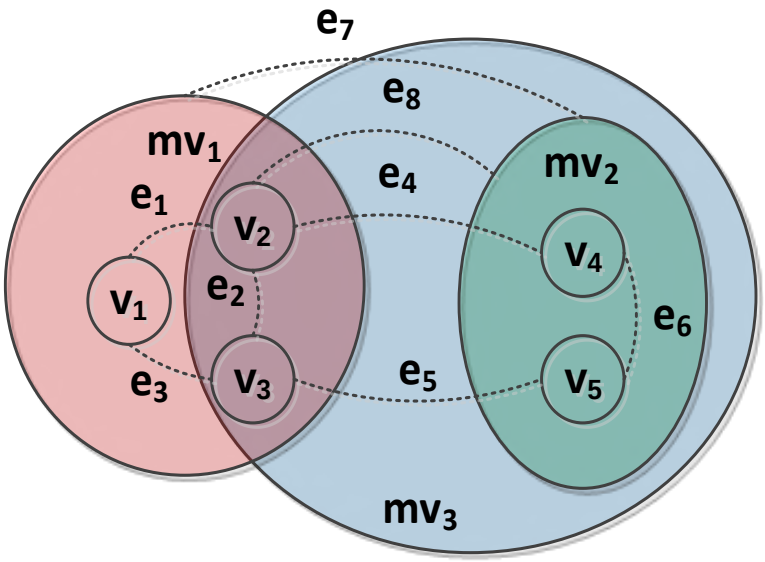


Рис. 3. Модель метаграфа.

Каждая из вершин верхнего уровня метаграфа может быть интерпретирована как гранула, которая соответствует более высокому уровню отображения. В свою очередь, информация, возникающая в результате взаимодействия нейронных структур мозга и окружающей среды, определяется внутренними целями, соответствующими иерархии целей на каждом уровне работы мозговых систем. Цель можно интерпретировать как функционал, который определяет, насколько внутренняя картина мира, сформированная в результате работы мозга, отличается от реальной картины мира. Она может быть представлена в виде гиперповерхности, имеющей множество экстремумов и изменяющейся в соответствии с изменением окружающей среды. Семантика возникает, когда воздействие внешней среды оценивается системой на основе некоторой шкалы, определяемой целью. В результате формируется система аттракторов, которая определяет поведение системы и реакцию системы на внешние воздействия, что и характеризует ее прагматику. В свою очередь, иерархическая структура аттракторов формирует также систему уровней языков, состоящих из различного типа символов. На каждом уровне имеется своя символика, определяемая средой, в которую погружена система аттракторов и соответственно семантике, определяемой этой средой. Взаимодействие между языками происходит путем формирования иерархии структур системы аттракторов. Структура аттракторов на самом верхнем уровне определяет характер будущих реакций, необходимых для адекватного ответа на воздействие внешней среды. Таким образом, осуществляется переход от динамики взаимодействия нейронных структур к символическому представлению процессов обработки информации мозгом. Это позволяет строить более адекватные модели нервной системы по сравнению с традиционными моделями многослойных искусственных нейронных сетей коннекционистского типа.

Заключение. Представляется возможным распространение развитого в [3 - 5] OMAS-метода на задачи обработки больших гиперспектральных изображений. Первые модели обыкновенных и сверточных автоэнкодеров, позволяющие осуществлять сжатие исходных гиперспектральных данных на основе использования чисто спектральной информации, содержащейся в данных, были построены в [7]. Были построены модели трехслойных, пятислойных и семислойных SAE-автоэнкодеров и вычислительно реализованы в облачной инфраструктуре Google Colaboratory на языке Python 3.8 с использованием библиотек TensorFlow, Math, Numpy и библиотеки Deephyp из работы [6]. Возможности моделей изучены на примерах изображений, содержащихся в одной из известных открытых баз гиперспектральных изображений (Pavia University). Была также построена модель сверточного автоэнкодера, на основе которой удалось повторить результаты, полученные в [6]. Даны оценки для средней ошибки сжатия и точности классификации. Рассмотрены модели динамического типа, основанные на осцилляторных нейронных сетях [3, 4, 5]. Они позволили построить более адекватные модели нейронных сетей, а также более быстрые и гибкие нейросетевые алгоритмы обработки изображений по сравнению с алгоритмами, основанными на моделях традиционных нейронных сетей. Можно отметить, что дальнейшее развитие направления, связанное с динамическим подходом [13, 14] и его интерпретацией с точки зрения теории метаграфов [14, 15] позволит выйти на новый уровень моделирования в теории искусственных нейронных сетей [16].

Литература

1. Y. Chen, ,Z. Lin, X. Zhao G. Wang, and Y. Gu. Deep learning-based assification of hyperspectral data. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote ensing, v. 7, no. 6., pp. 2094–2107, 2014.

2. Y. Chen, X. Zhao, and X. Jia, Spectra-spatial classification of hyperspectral data based on deep belief network, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 8, no. 6, pp. 2381–2392, 2015.

3. M.Kuzmina, E.Manykin, I.Surina, Oscillatory network with self-organized dynamical connections for synchronization-based image segmentation. BioSystems, 76, (2004), pp. 43-53.

4. Гричук, Е.С., Кузьмина, М.Г., Маныкин, Э.А. Выделение объектов в зрительной сцене осцилляторно-сетевым методом. Нейроинформатика-2009, 11 Всероссийская научно-техническая конференция, Сборник науч. трудов, часть 2. – Москва, 2009. – С. 254 – 261.

5. M.Kuzmina, E.Manykin, E.Grichuk, Oscillatory Neural Networks in problems of parallel information processing. Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston, 2014 (printed in Germany).

6. L.Windrim, Ramakrishnan, A.Melkumyan, R.J.Murphy, A.Chlingaryan. Unsupervised feature-learning for hyperspectral data with autoencoders. Remote Sens. 2019, 11, 864; https://doi.org/10.3390/rs11070864.

7. Кузьмина, М.Г., Подопросветов, А.В. Использование сетей-автоэнкодеров для сокращения размерности массивов больших данных, определяющих гиперспектральные изображения / Бионика – 60 лет. Итоги и перспективы. Сборник статей Первой Международно-практической конференции, 17-19 декабря 2021 года, г. Москва, под ред. А.П. Карпенко. – М.: Ассоц. техн. ун-тов, 2022. – С. 103.

8. Басс, Л.П., Кузьмина, М.Г., Николаева, О.В. Сверточные нейронные сети с глубоким обучением в задачах обработки гиперспектральных спутниковых данных, Препринт ИПМ РАН № 282. – Москва, 2018.

9. Басс, Л.П., Кузьмина, М.Г., Николаева, О.В., Пластинин, Ю.А., Скрябышева, И.Ю. Применение глубоких сверточных сетей в задачах обработки гиперспектральных спутниковых данных. – Моногр. «Искусственный интеллект в космической технике: состояние, перспективы применения», 2021.

10. Тарасов, В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. – М.: Эдиториал УРСС, 2002. – 352 с.

11. Анохин, К.В. Когнитом: гиперсетевая модель мозга / XVII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Нейроинформатика-2015». Сб. научн. тр. в 3 частях. Под общ. ред. Трофимова А.Г. – 2015. – С. 14–15.

12. Анохин, К.В. Когнитом: в поисках фундаментальной научной теории сознания // Журнал высшей нервной деятельности. – 2021. – т. 71. – № 1. – С. 39-71.

13. Лоскутов, А.Ю., Михайлов, А.С. Основы теории сложных систем. – М.-Ижевск: НИЦ РХД, 2007. – 620 с.

14. Osipenko, G. Dynamical systems, graphs, and algorithms. Springer-Verlag, 2007.

15. Tarasov, V., Kaganov, Y., Gapanyuk, Y. The Metagraph Model for Complex Networks: Definition, Calculus, and Granulation Issues. In: Proceedings of the XIX International Conference on Data Analytics and Management in Data Intensive Domains (DAMDID/RCDL 2017), Moscow, Russia, pp. 342-349 (2017).

16. Каганов, Ю.Т., Гапанюк, Ю.Е. Нелинейная динамика и происхождение когнитивных процессов интеллектуальных систем / Бионика – 60 лет. Итоги и перспективы. Сборник статей Первой Международно-практической конференции, 17-19 декабря 2021 года, г. Москва, под ред. А.П. Карпенко. – М.: Ассоц. техн. ун-тов, 2022. – С. 41-51.

УДК 519.6

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ПРИ НЕДОСТАТКЕ ОБУЧАЮЩИХ ДАННЫХ

А.В. Лысенко,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия,
e-mail: lysenkoanastasia09@gmail.com

Аннотация. *Рассматриваются модели для детектирования объектов, которые можно применять при недостатке данных, при этом скорость работы алгоритма должна быть близка к работе в реальном масштабе времени. Такая ситуация характерна для биологических систем. В силу этого работа носит бионический характер. Цель работы состоит в программной реализации и исследовании эффективности алгоритмов детектирования для сложных данных, а также при недостаточном количестве обучающих данных.*

Ключевые слова: *детектирование объектов, сложные данные, методы распознавания, нейронная сеть, бионические методы, метрика, оптимизация.*

AUTOMATED OBJECT RECOGNITION SYSTEM WITH A LACK OF TRAINING DATA

A.V. Lysenko,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract. *Models for detecting objects that can be used with a lack of data are considered, while the speed of the algorithm should be close to real-time operation. This situation is typical for biological systems. Because of this, the work is bionic in nature. The purpose of the work is to program implementation and study the effectiveness of detection algorithms for complex data, as well as with insufficient training data.*
Keywords: *object detection, complex data, recognition methods, neural networks, bionic methods, metrics, optimization.*

Введение. В современной жизни часто возникают задачи распознавания объектов: слежение за выделенной территорией, распознавание номеров автомобилей, распознавание лиц в пропускной системе и многие другие. Все это помогает облегчить работу человеку, сделав ее более простой и автоматизированной. Однако далеко не всегда достаточно просто можно решить эти задачи с помощью компьютера. Например, постановка диагноза в больнице, сложные данные, в которых иногда даже человек не в силах разобраться или же недостаток обучающих данных, приводит к необходимости использования специализированных методов, которые позволяют преодолеть эти проблемы. В данной статье будут рассматриваться проблемы, связанные с обучающими данными: детектирование данных, сложность данных и недостаток обучающих данных [1, 2].

Компьютерное зрение (computer vision) – это область искусственного интеллекта, которая позволяет компьютерам и системам извлекать информацию из изображений, видео и др. Компьютерное зрение стремятся приблизить к человеческому. Это одна из бионических проблем, которая в настоящее время входит в состав проблем искусственного интеллекта [3].

Благодаря компьютерному зрению есть возможность выполнять различные функции и для этого требуется меньше времени, чем человеку. Такие системы способны наблюдать за производством, анализировать тысячи объектов или процессов [4].

В данной работе будут рассмотрены методы обнаружения (детектирования) объектов и присвоение им метки (класса).

Современные методы обнаружения объектов можно разделить на два основных типа: одноэтапные методы и двухэтапные методы [5]. Одноэтапные методы работают быстрее, чем двухэтапные, и примеры таких моделей: YOLO, SSD и RetinaNet. Двухэтапные методы более точные, примеры таких моделей: Faster R-CNN, Mask R-CNN и Cascade R-CNN.

Процесс распознавания изображений связан с присваиванием метки соответствующему изображению. Таким образом, изображение собаки получает метку (класс) «собака». Соответственно изображение двух собак также получает метку «собака». При этом обнаруженный объект приобретает **ограничивающую рамку (бокс)** вокруг каждого изображения собаки и помечает бокс меткой «собака». Модель, таким образом, предсказывает: где именно находится каждый объект и какую метку следует присвоить обнаружению объектов.

В данной работе будут рассмотрены два алгоритма: YOLO и Faster R-CNN, которые относятся к разным типам. Для выбранных алгоритмов будет рассчитана скорость инференса и точность распознавания.

1. Постановка задачи. Требуется построить модель для обнаружения объектов. На вход модели подаются изображения, а на выходе получаем число, отвечающее номеру класса, к которому относится объект и координаты данного объекта на изображении. Поскольку поставлена задача детектирования, для оценки качества модели будут использоваться метрики: precesion, recall и f1-score, mAP [7].

2. Детектирование объектов. Метрики. Для проверки работоспособности модели существуют различные метрики. Это функции, которые показывают: насколько сильно ответы модели близки к ответам, данных в примере.

Проблема состоит в выборе правильной метрики.

Самой распространенной и интуитивно понятной метрикой является accuracy – доля правильных ответов алгоритма.

$$accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP}, \quad (1)$$

где *TP* (True Positive) – число истинно положительных ответов (классификатор верно отнес объект к данному классу); *TN* (True Negative) – число истинно негативных ответов (классификатор верно утверждает, что объект не принадлежит данному классу); *FP* (False Positive) – число ложно положительных ответов (классификатор неверно сопоставил объект с классом); *FN* (False Negative) – число ложно отрицательных ответов (классификатор неверно утверждает, что объект не принадлежит классу).

Но у этой метрики есть один большой минус, ее нельзя применять с неравными классами, она будет показывать результаты в лучшую сторону, хотя наша модель будет работать плохо.

Precision (точность) – доля объектов, названных классификатором положительными и при этом, действительно являющимися положительными.

$$precesion = \frac{TP}{TP+FP}. \quad (2)$$

Recall (полнота) – доля объектов положительного класса из всех объектов положительного класса, которые нашел алгоритм.

$$recall = \frac{TP}{TP+FN}. \quad (3)$$

F-мера представляет собой гармоническое среднее между точностью и полнотой. Эта мера стремится к нулю, если точность или же полнота стремится к нулю:

$$F = 2\frac{precision*recall}{precision+recall}. \quad (4)$$

Mean average precision (mAP) – одна из наиболее часто используемых метрик качества ранжирования:

$$mAP = \frac{1}{|classes|}\sum_{c=classes}\frac{|TP_c|}{|FP_c|+|TP_c|}. \quad (5)$$

Back Propagation (обратное распространение ошибки) – это метод обучения искусственной нейронной сети. Он является основным методом настройки весовых коэффициентов искусственной нейронной сети. Back Propagation относится к методам обучения с учителем [4, 5, 8].

Правильная настройка весовых коэффициентов позволяет снизить частоту ошибок и сделать модель более точной. Данный метод лежит в основе всех моделей.

Для применения метода обратного распространения ошибки, необходимы обучающие множества: *x* – входной вектор, *d* – желаемый результат на выходе, необходим для формирования ошибки.

На каждой итерации происходит два прохода сети – прямой проход и обратный для данных из обучающей выборки.

Обучение происходит следующим образом:

1) Инициализация. Генерируются синаптические веса и пороговые значения. Дисперсия выбирается так, чтобы стандартное отклонение взвешенной суммы входных сигналов, приходилось на линейную часть функции активации и не достигало области насыщения.

2) Прямой проход. Вычисляется взвешенная сумма входных сигналов для нейрона *j* слоя l, по формуле

$$v_j^l = \sum_{i=1}^{m} w_{ji}^l * y_i^{l-1} + bias_j^l, \quad (6)$$

где v_j^l – индуцированное локальное поле нейрона (взвешенная сумма); w_{ji}^l – весовые коэффициенты связи нейрона *j* с нейроном *i* на (*l*-1) слое; y_i^{l-1} – выходной сигнал нейрона *i* слоя (*l*-1).

Выходной сигнал вычисляется по формуле

$$y_j^{(l)} = f_j\left(v_j^{(l)}\right) \quad (7)$$

где $f_j\left(v_j^{(l)}\right)$ – функция активации.

Для первого слоя, имеем:

$$y_j^{(0)} = x_j. \tag{8}$$

3) Вычисление ошибки e:

$$e_j = d_j - y_j^L, \tag{9}$$

где y_j^L – выходной сигнал на последнем слое.

4) Обратный проход.

Имея функцию активации для выходного нейрона f^v и ошибку, вычисляем локальный градиент для выходного нейрона выходного слоя:

$$\delta_j^l = e_j^L * f'_j(v_j^L). \tag{10}$$

Локальный градиент для скрытого слоя определяет формула

$$\delta_j^l = e_j^L * f'_j(v_j^L) \sum_{k=1}^{K} \delta_k^{l+1} * w_{kj}^{l+k}. \tag{11}$$

Весовые коэффициенты настраиваются по формуле

$$w_{ji}^l = w_{ji}^l + lr * \delta_j * y_j^{l-1}, \tag{12}$$

где lr – шаг обучения нейронной сети. Этот шаг обычно выбирается вручную, часто используются значения 0.1, 0.01, 0.001 и т. д.

С помощью метода обратного распространения ошибки веса корректируются так, чтобы минимизировать значение функции потерь.

YOLO (You Only Look Once) – детектор, который делает один прогон картинки через одну нейронную сеть. Этот подход позволяет быстро обрабатывать изображения и видеть контекст полностью.

3. Алгоритм. Модели yolo имеют разные версии и реализации. Для экспериментов будет использоваться YOLOv5, которая была реализована на PyTorch, т.к. предыдущие версии модели были написаны на Darknet, который уступает PyTorch в производительности и возможностям конфигурации моделей [2, 9].

YOLO работает по следующему алгоритму:

1) Подготовка изображения одного размера (640*640).

2) Деление изображение на клетки размером *n***n*, клетки называют grid cells. Фокусируемся на grid cells, каждая клетка является «якорем», вокруг которого рисуются несколько прямоугольников (bounding boxes). Ширина и высота каждого bounding boxes вычисляется относительно центра клетки, поскольку мы не знаем размер ограничивающей рамки. Размер и позиция боксов могут задаваться пользователем или определяются на основе размеров bounding boxes датасета; данная техника называется anchor boxes. Для определения боксов из датасета используют K-means clustering и IoU. Обычно задают порядка трех

различных anchor boxes, которые будут нарисованы вокруг (или внутри) одной клетки.

3) «Прогнать» изображение через нейронную сеть (Darknet-53).

4) Отфильтровать лишние anchor boxes с помощью confidence score (уверенность модели) и NMS (см. ниже).

Faster R-CNN – улучшенная версия модели R-CNN. R-CNN работает медленно и не очень эффективно. Faster R-CNN имеет двухуровневую архитектуру.

Изначально в R-CNN каждая гипотеза обрабатывалась отдельно, что замедляло работу, но в Faster R-CNN исправили это, применив Region of Interest (RoI) слой, который позволял один раз обработать изображение и получить карту признаков. Карты признаков используются для обработки каждой гипотезы. Данный слой должен сопоставить координаты bounding box с соответствующими координатами карты признаков. Далее данная рамка подается на вход полносвязному слою для определения класса.

На примере faster RCNN рассмотрим алгоритм.

1) На вход принимается изображение.

2) Кадр прогоняется через CNN для формирования feature maps.

3) Отдельной нейронной сетью определяются регионы с высокой вероятностью нахождения в них объектов.

4) Далее эти регионы с помощью RoI pooling сжимаются и подаются в нейронную сеть, которая определяет класс объектов в регионах.

Довольно часто получается так, что модель выделяет несколько боксов, с большой уверенностью указывающие на один и тот же объект. С помощью **Non-maximum suppression** (NMS) можно обработать такие случаи и оставить только одну, наилучшую, ограничивающую рамку. Но при этом не стоит забывать о случае, когда на изображении может быть два разных объекта одного класса.

Случай, когда рядом находятся два объекта одного класса, может быть очень сложным, ведь все объекты разные по своей форме, и, соответственно, если два объекта пересекаются, то и боксы будут пересекаться и могут иметь слишком большой порог пересечения. В этом случаем стоит очень аккуратно подбирать порог.

В качестве метода оптимизации используется Adam. Adam – метод, вычисляющий скорость адаптивного обучения для каждого параметра. Adam рассчитывает индивидуальные скорости обучения для различных параметров, то есть Adam использует оценки первого и второго момента градиента, для того, чтобы адаптировать скорость обучения для каждого веса нейронной сети [8, 10].

Adam – алгоритм стохастического градиентного спуска, основанный на оценке первого и второго момента [8]. Метод определяет момент первого порядка – среднее значение градиента $m_t = \beta_1 m_{t-1} + (1-\beta_1) g_t$ и момент второго порядка – средняя нецентрированная дисперсия градиентов

$v_t = \beta_2 v_{t-1} + (1-\beta_2) g_t^2$, где g_t – градиент; β_1, β_2 – введенные гиперпараметры алгоритма (по умолчанию $\beta_1 = 0.9, \beta_2 = 0.999$).

Если задать m_t и v_t равные нулю, они будут долго накапливаться, особенно на начальных временных шагах, и особенно когда скорости затухания невелики. А если задавать какие-то изначальные значения, то это еще два дополнительных гиперпараметра, что является неприемлемо, поэтому m_t и v_t смещаются, так что получаем

$$\hat{m}_t = \frac{m_t}{1-\beta_1^t}, \quad \hat{v}_t = \frac{v_t}{1-\beta_2^t}.$$

Это называется этапом коррекции смещения.

Adam использует моменты, которые означают, что некоторая часть предыдущего обновления добавляется к текущему обновлению, так что повторные обновления в определенном направлении составляются, набираются обороты, движемся все быстрее и быстрее в этом направлении.

Еще один прием, который использует Adam, – адаптивно выбирать отдельную скорость обучения для каждого параметра. Параметры, которые обычно получают меньшие или менее частые обновления, получают большие обновления с Adam (обратное также верно). Это ускоряет обучение в тех случаях, когда соответствующие скорости обучения варьируются в зависимости от параметров. Например, в глубоких сетях градиенты могут стать небольшими на ранних уровнях, и имеет смысл увеличить скорость обучения для соответствующих параметров. Еще одним преимуществом этого подхода является то, что, поскольку скорость обучения регулируется автоматически, ручная настройка становится менее важной. Стандарт SGD требует тщательной настройки (и, возможно, онлайн-корректировки) скоростей обучения, но это менее верно для Adam и связанных с ним методов. При этом все еще необходимо выбрать гиперпараметры.

4. Датасет. В качестве набора данных использовалось два следующих датасета.

- Датасет, состоящий из 1000 изображений и 73 классов [1]. Эти данные имеют сложную структуру и сложно различимы.
- Для обучения использовалась валидационная часть датасета 2017 года.

Перед обучением модели необходимо разбить датасет на три выборки:

- Train (выборка для обучения);
- Validation (выборка для подборки гиперпараметров);
- Hold (тестовая выборка, для проверки качества модели).

Для стратифицированного разбиения датасета используется функция Multilabel Stratified Shuffle Split из iterstrat.ml_stratifiers. Данная функция

разбивает данные пропорционально на две части (train, val), поэтому необходимо воспользоваться дважды [6].

Из-за сложности данных, их количества необходимо сделать предварительную обработку данных. Очевидно, необходимо провести исследование и изучить данные, на предмет ошибок. Для проверки использовалась библиотека cleanlab, которая позволяет найти выбросы и ошибки в данных. После применения cleanlab были удалены семь изображений, которые имели неточную разметку.

Одним из способов увеличения объема данных является аугментация [8]. Добавление новых данных происходит путем добавления незначительно измененных копий уже существующих данных (искусственно добавляем «искаженные изображения»). Это помогает уменьшить переобучение при обучении модели. Большой набор данных не только предотвращает переобучение, но и имеет огромное значение для качества модели машинного обучения.

Методы увеличения объема данных: геометрическое преобразование (flip, crop, rotate), изменение цветовых каналов, добавление шума.

Заключение. В итоге нескольких экспериментов получились хорошие результаты. Для YOLO на тестовой выборке метрика f1_score = 0,72. График функции потерь для обучающей выборки представлен на рис. 1, а для валидационной – на рис. 2.

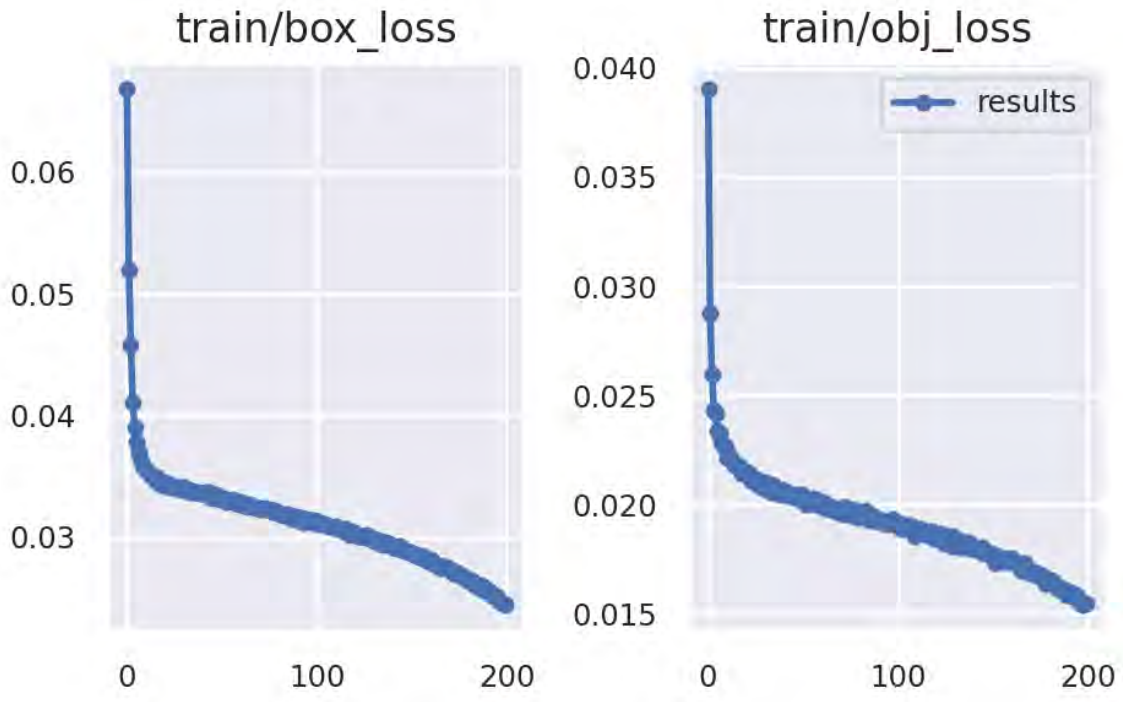


Рис. 1. Loss-функция обучения.

Результаты работы модели может быть не очень впечатляющие из-за того, что обучающих данных для некоторых классов недостаточно, поскольку для сложных классов должно быть больше данных (около 300 на

каждый класс). Классы для обучения сложные, имеют разную структуру, объекты могут сильно пересекаться, или один объект может почти полностью перекрывать другой. В этом случае NMS может удалить один объект, поэтому необходимо подбирать правильный порог.

Для Faster R-CNN лучшие f1_score=0.7, которые уступают YOLOv5.

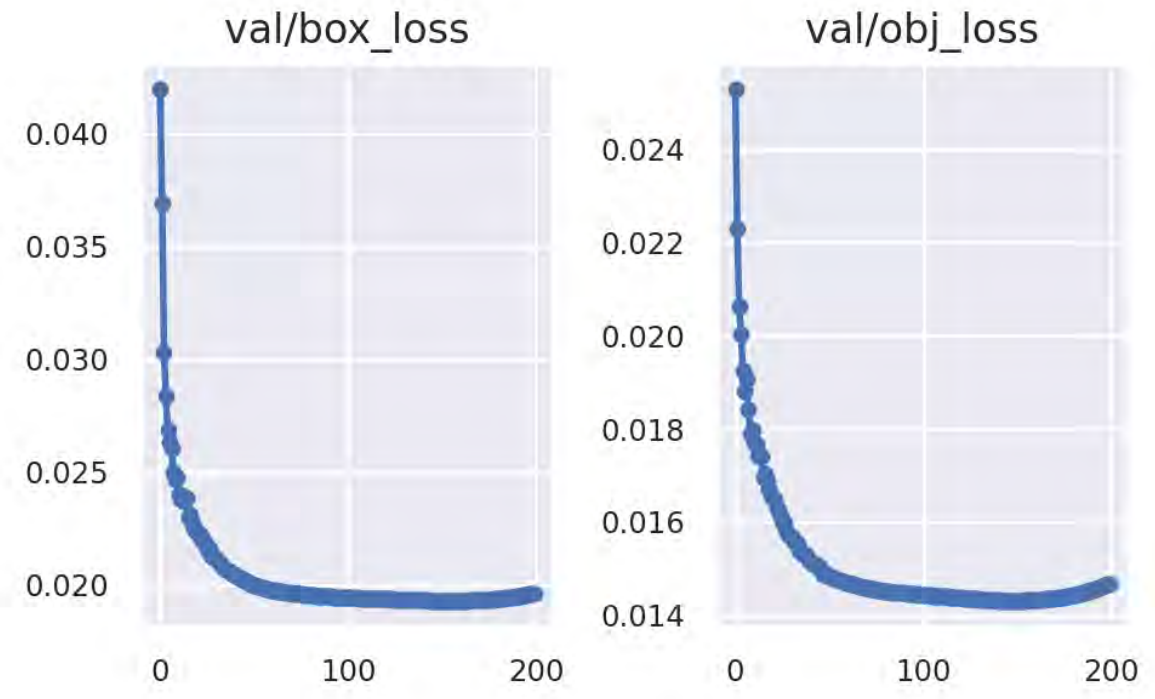


Рис. 2. Валидационная loss-функция.

Литература

1. Интернет-ресурс: http://www.ivl.disco.unimib.it/activities/food-recognition/.
2. Jan Eric Solem Programming Computer Vision with Python. Creative Commons. 2012.
3. Стивенс, Э., Антига, Л., Виман, Т. PyTorch. Освещая глубокое обучение. – СПб.: Питер, 2022. – 576 с.
4. Гудфеллоу, Я., Бенджио, И., Курвилль, А. Глубокое обучение. – М.: ДМК Пресс, 2018. – 658 с.
5. Редмон, Дж., Дивалла, С. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. – 2016. – 10 с.
6. Интернет-ресурс: https://cocodataset.org/
7. Ховард, Дж., Гуггер, С. Глубокое обучение с fastai и PyTorch. – СПб.: Питер, 2022. – 624 с. – (Серия «Бестселлер O'Raily).
8. Паттанаяк, С. Глубокое обучение и TensorFlow для профессионалов. Математический подход к построению системы искусственного интеллекта на PyTorch. – СПб.: ООО «Диалектика», 2019. – 480 с.
9. Патхака, А., Пандея, М., Раутарая, С. Application of Deep Learning for Object Detection. – 2018. – 12 с.
10. Нванкпа, Ч., Иджома, У., Гачаган, Э., Маршалл, С. Функции активации: сравнение тенденций в практике и исследования для глубокого обучения. – 2018 – 20 с.

УДК 519.6

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МУРАВЬИНЫХ КОЛОНИЙ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПОРЯДКА СЛЕДОВАНИЯ ГИПЕРПАРАМЕТРОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КЛАСТЕРА

И.Н. Синицын, Ю.П. Титов,
МАИ (НИУ), ФИЦ ИУ РАН,
г. Москва, Россия,
e-mail: sinitsin@dol.ru, kalengul@mail.ru

Аннотация. *В работе рассматриваются модификации метода муравьиных колоний позволяющие решать задачи направленного перебора гиперпараметров. Данная задача возникает при решении сложных вычислительных задач на кластере. Применение предложенных модификаций алгоритма позволяет осуществлять перебор наборов значений параметров для ускорения нахождения рациональных и оптимальных наборов, а также возможности рассмотрения всех наборов, как в случае перебора методом грубой силы.*
Ключевые слова: *метод муравьиных колоний, параметрический граф, изменение порядка следования, вычислительный кластер, оптимизация гиперпараметров.*

APPLICATION OF THE ANT COLONY METHOD TO OPTIMIZE THE SEQUENCE ORDER OF COMPUTATIONAL CLUSTER HYPERPARAMETERS

I.N. Sinitsyn, Yu.P. Titov,
Moscow Aviation Institute (National research university),
Federal Research Center «Computer Science and Control» of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Abstract. *The paper considers modifications of the ant colony method that allow solving problems of directed enumeration of hyperparameters. This problem arises when solving complex computational problems on a cluster. The use of the proposed modifications of the algorithm makes it possible to enumerate sets of parameter values to speed up the finding of rational and optimal sets, as well as the possibility of considering all sets, as in the case of brute force enumeration.*
Keywords: *ant colony method, parametric graph, reordering, computing cluster, hyperparameter optimization.*

Введение. Современные тенденции развития бионических систем нацелены на множество задач, где принятые методы решения либо не справляются с объемом информации, либо недостаточно быстро и точно находят решения [1]. Среди бионических систем в работе рассматривается метод муравьиных колоний [2 - 4].

Современное развитие вычислительной техники позволяет создавать сложные модели, так как вычислительная сложность с лихвой компенсируется мощностью и скоростью вычислений. При такой работе человек на основе

критериев, вычисленных с помощью модели, подбирает оптимальные параметры системы. Зависимость значений критериев от определенного набора параметров остается неявной, т.е. разработчик системы пытается неявно, когнитивно определить данные зависимости. Ответственность за точность значений параметров и оптимальность значений критериев лежит на разработчике или эксперте, который на основе собственного опыта завершает процесс оптимизации параметров. В результате стандартный процесс разработки системы высокой доступности на основе программной реализации вычислительной модели сводится к следующей последовательности действий.

1) Задание параметров системы.

2) Проведение вычислительного эксперимента и получение оценок критериев.

3) Анализ разработчиком полученных значений оценок критериев. В случае если критерии удовлетворяют требованиям, то утверждение параметров системы высокой доступности.

4) Если критерии не удовлетворяют требованиям, то разработчиком проводится анализ зависимостей между параметрами и критериями, поиск критичных мест.

5) Корректировка параметров системы и переход к шагу 1.

В настоящее время в связи с развитием суперкомпьютеров и других мощных вычислительных устройств, появилась возможность перенести многие оптимизационные, расчетные задачи с человека на вычислительные машины. Для данных классов задач предполагается множественный запуск расчетных программ на вычислительных кластерах, предоставив пользователю возможность задавать начальные параметры в виде множества. Таким образом, пользователь программы не решает задачу оптимизации, а возлагает ее на программное обеспечение, выбирающее начальные данные чаще всего методом грубой силы. Последовательность взаимодействия с подобной системой можно представить в следующем виде.

1) Для каждого параметра, разработчиком, задаются границы (диапазоны или отдельные наборы значений), в которых может варьироваться параметр.

2) На основе заданных диапазонов формируется множество наборов значений параметров.

3) Наборы поочередно отправляются на освободившиеся кластеры вычислителя и для каждого набора определяются значения критериев.

4) После вычисления значений критериев для всех наборов параметров они выдаются разработчику. При этом может производиться оптимизация, вычисления множества Парето и другие методы многокритериального анализа и систем поддержки принятия решений.

В подобной системе оптимизация проводится после того, как все наборы параметров были рассмотрены, при этом порядок передачи наборов параметров неважен и часто параметры передаются последовательно. С помощью метода муравьиных колоний предлагается переупорядочивать наборы параметров таким образом, чтобы рассмотреть рациональные наборы как можно раньше.

При такой постановке задачи появляется возможность контролировать пользователем процесс вычисления, подходящего ему, рационального набора параметров. Для этого пользователю выводится процесс вычисления, полученные значения критериев и рассмотренные наборы параметров, в том числе оптимальные на данный момент, и позволяется остановить вычисления. Данный механизм призван экономить ресурсы кластера.

1. Модификация метода муравьиных колоний. Метод муравьиных колоний первоначально разрабатывался для решения задачи коммивояжера [2, 3]. Путем выделения целевой функции и возможности установки ограничений данный алгоритм легко модифицируется для решения других оптимизационных задач на графах [5 - 9]. Современные исследования в области муравьиных колоний позволяют решать задачи поиска оптимального пути в специальных графах. Метод позволяет находить решения для различных параметрических задач, связанных с поиском оптимального набора параметров, классификации, выявления зависимостей и т.д. [10 - 13].

Представленные методы решают задачу нахождения одного оптимального решения. К этому решению должны сойтись все агенты (муравьи). В работе рассматривается возможность применения метода муравьиных колоний для последовательного перебора всех вариантов, а не сходимости к рациональному варианту, предложены модификации алгоритма для усовершенствования поиска.

Для работы метода муравьиных колоний предлагается параметрический граф, в котором для каждого параметра создается слой вершин. В каждом слое располагаются вершины, которые определяют конкретное значение параметра [6, 9,10,14,15]. Можно соединять дугами различные вершины из различных слоев. Вершины из одного слоя дугами соединяться не должны, иначе возможна установка двух значений для одного параметра. В рассматриваемом параметрическом графе предполагается расположение всех слоев в виде списка и возможность соединения дугами только вершины двух соседних слоев. Путь в данном параметрическом графе определяется последовательным прохождением по каждой вершине из каждого слоя последовательно, в том порядке, в котором расположены слои в списке (рис. 1).

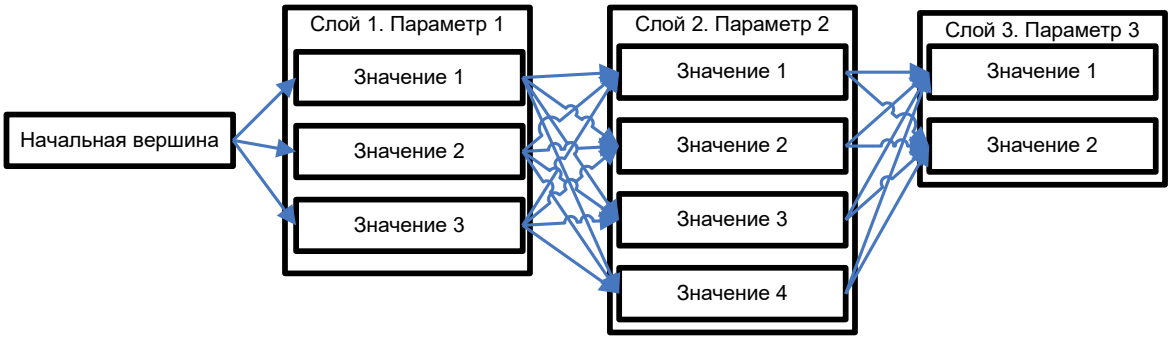


Рис. 1. Пример параметрического графа для работы метода муравьиных колоний.

В данном параметрическом графе веса (феромоны) заносятся на вершины графа, а не на дуги как в оригинальном алгоритме. В результате дуги в данном графе требуются только для перемещения агентов, поэтому в данном графе они не нужны. Перемещение агентов осуществляется между слоями, а вероятностная формула основана на всех вершинах соседнего слоя.

Так как методу муравьиных колоний необходимо перебрать все варианты наборов параметров, то необходимо хранить информацию о рассмотренных наборах параметров. Для хранения наборов параметров, которые были рассмотрены на кластере, предлагается использование хэш-таблицы. Схема алгоритма применения хэш-таблицы имеет следующий вид.

1) После получения агентом маршрута (т.е. когда агент прошел по одной вершине из каждого слоя и таким образом определил набор параметров) производится вычисление строки параметров, хэш-функции и поиск значения хэш-функции в хэш-таблице.

2) Если такое значение найдено, то агент не нашел новый маршрут (условно назовем такого агента «нулевым»). Количество заносимых весов (феромона) определяется, не исходя из работы кластера, а из значения критерия в хэш-таблице.

3) Если значений хэш-функции не найдено, то производится отправка набора параметров на вычислительный кластер и после получения значений критериев заносится новая запись в хэш-таблицу.

Так как не все агенты могут определить новое решение, то необходимо определить правила обработки этих нулевых агентов, имеющие следующий вид.

1) Не учитывать различия в агентах и обрабатывать нулевых агентов как обычных: данные агенты заносят веса на вершины параметрического графа в полном объеме. При этом значение целевой функции определять из хэш-таблицы.

2) Игнорировать данных агентов. Т.е. агент не заносит веса на параметрический граф. В таком случае фактически уменьшается количество агентов, рассмотренных на итерации.

3) Проводить повторный поиск нового решения для нулевого агента методом муравьиных колоний. Данный поиск можно проводить циклически, ограничив максимальное количество циклов.

4) Применять сторонний алгоритм, например, проводить обход параметрического графа как дерево. В данном случае происходит симбиоз различных алгоритмов и возможно получение лучших характеристик скорости сходимости и минимизации количества дополнительных итераций.

Алгоритм обработки нулевых агентов позволяют методу муравьиных колоний рассмотреть все возможные решения, а не сойтись к одному рациональному решению.

Основой метода муравьиных колоний является вероятностная формула выбора следующей вершины агентом. В оригинальной формуле для

выбора следующей вершины используется информация о количестве весов и длине дуги, а также информацию об уже пройденных дугах. Так как агент всегда перемещается в соседний слой, то вероятностная формула выбора вершины в следующем слое не зависит от агента, а из-за того, что веса заносятся на вершины, то и от текущей позиции агента.

Так как информации о длине дуги для предложенного параметрического графа нет, а влияние каждого конкретного значения параметра на значение критериев может быть вычислено только оценочно и, в общем случае, такая информация может отсутствовать, то в вероятностной формуле имеется только коэффициент, определяющий количество весов в вершине. Такой подход может приводить к зацикливанию алгоритма муравьиных колоний на не рациональном решении на ранних итерациях [10]. В работе [16] для данной задачи предложена следующая вероятная формула, в которой имеется параметр $kol(t)_{ij}$, отвечающий за количество посещений агентами вершины параметрического графа (коэффициент $k2$ в данной работе будет отвечать за работу параметра):

$$P_{ij,k}(t) = \frac{k1 * \tau^{\alpha}{}_{norm,ij}(t) + k2 * \left. 1 \middle/ kol(t)_{ij} \right.^{\beta}}{\sum\limits_{l \in J_{i,k}} (k1 * \tau^{\alpha}{}_{norm,ij}(t) + k2 * \left. 1 \middle/ kol(t)_{ij} \right.^{\beta})}, j \in J_{i,k}$$

Следует также отметить, что параметр $\tau^{\alpha}{}_{norm,ij}(t)$, отвечающий за количество весов в вершине j берется в нормированном виде. Нормировка осуществляется по всем вершинам слоя, позволяя использовать данный параметр в рамках взвешенной суммы

$$k1 * \tau^{\alpha}{}_{norm,ij}(t) + k2 * \left. 1 \middle/ kol(t)_{ij} \right.^{\beta}.$$

Если все агенты на итерации нулевые, то предлагается применение сброса состояния параметрического графа в начальное состояние (сброс графа) для возможности рассмотрения новых решений. При этом хэш-таблица не обнуляется, т.е. если агент находит решение из хэш-таблицы, то он не заносит веса на параметрический граф (если выбрано игнорирование нулевых агентов).

2. Результаты. Тестирование данного алгоритма производились на двух параметрических графах: графе большой размерности, содержащем более 10^9 решений, 13 слоев с количественными и качественными значениями параметров, и бэнчмарке «Carrom table function» для точности измерения 0,1 в диапазоне [-10, 10] для x1 и x2 с 40401 решением.

На рис. 2 представлены результаты работы различных модификаций метода муравьиных колоний с k2=0 (верхние графики) и k2=1 (нижние графики) на графе большой размерности.

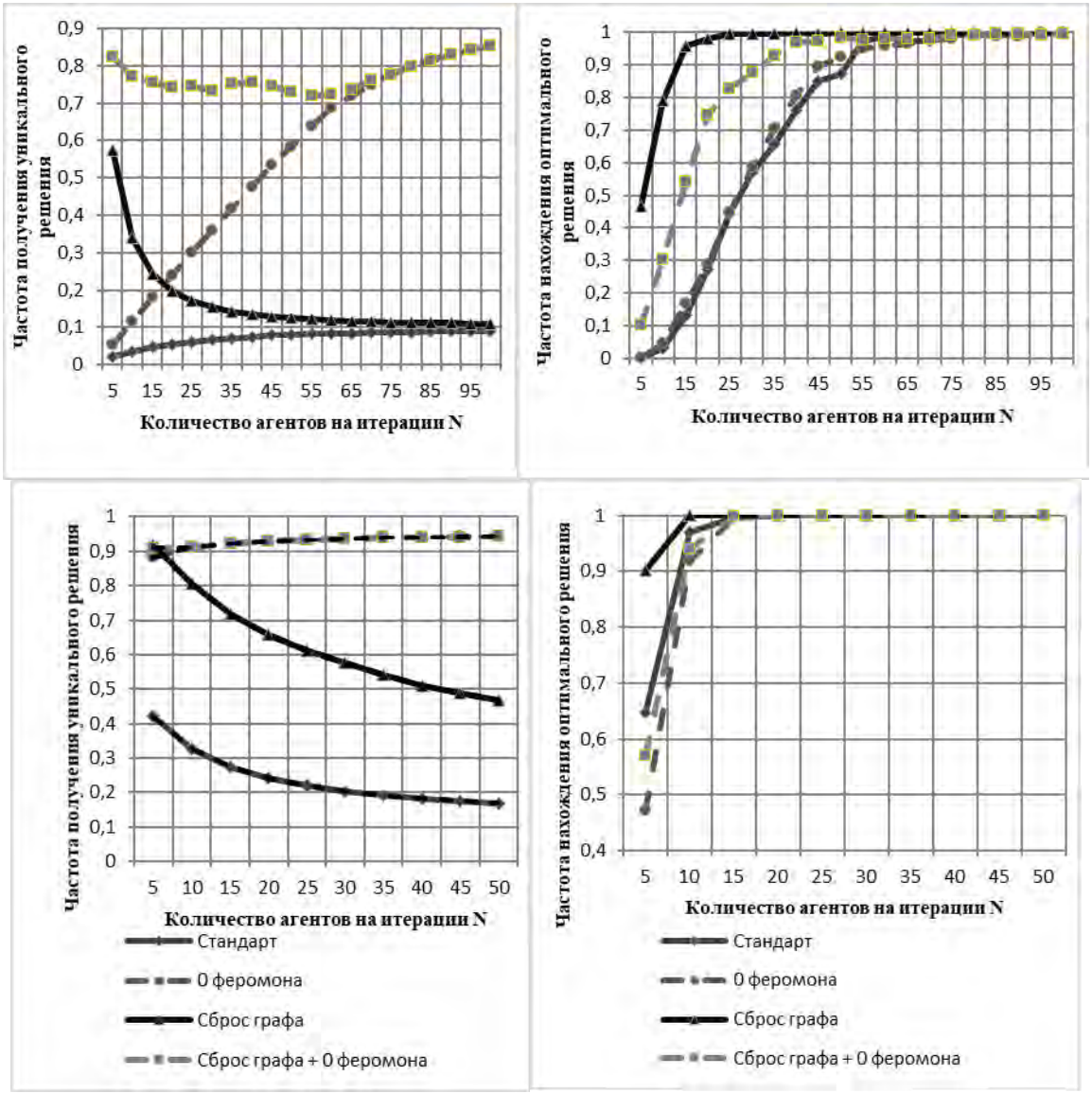


Рис. 2. Результаты работы модификаций метода муравьиных колоний для графа большой размерности.

Из рис. 2 можно сделать вывод, что наибольшее влияние оказывает значение коэффициента *k*2. При *k*2=1 уже при 15 агентах в группе 100% вероятность нахождения оптимального решения для 1000 итераций метода муравьиных колоний. Левый график рис. 2 показывает вероятность, что агент найдет новое решение, т.е. при частоте равной 1 все агенты находят новое решение.

Результаты исследования других алгоритмов для нулевого агента приведено на рис. 3.

На графиках рис. 3 улучшенным называется модификация с игнорированием нулевого агента и *k*2=1. Все алгоритмы находят оптимальное решение примерно при одинаковых итерациях, кроме стандартного алгоритма, который достаточно редко находит оптимальное решение из-за зацикливания алгоритма. Наилучшим алгоритмом является циклическое повторение поиска методом муравьиных колоний.

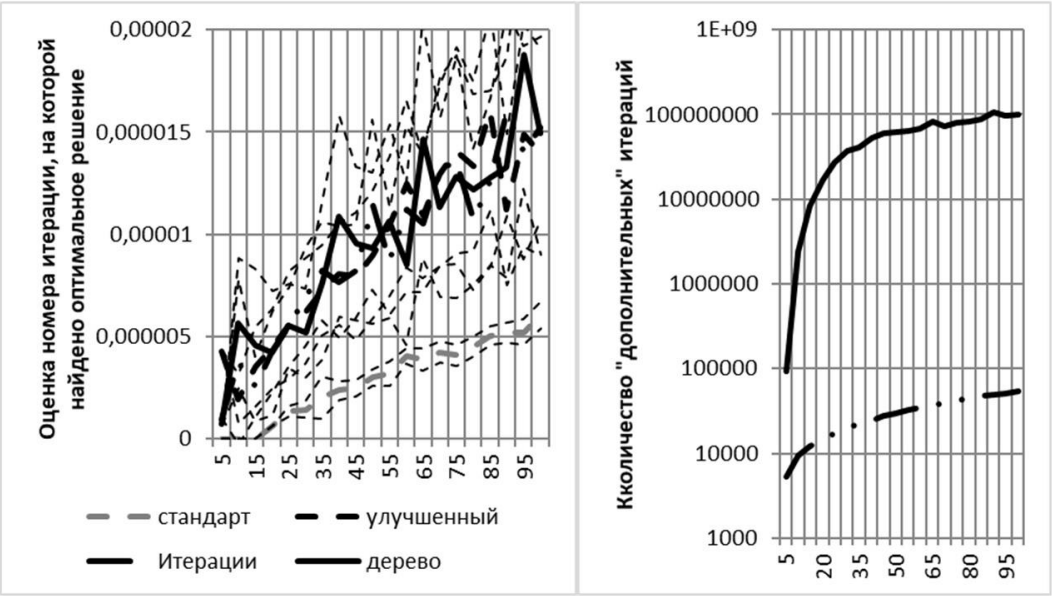


Рис. 3. Сравнение модификаций алгоритма для обработки нулевого агента.

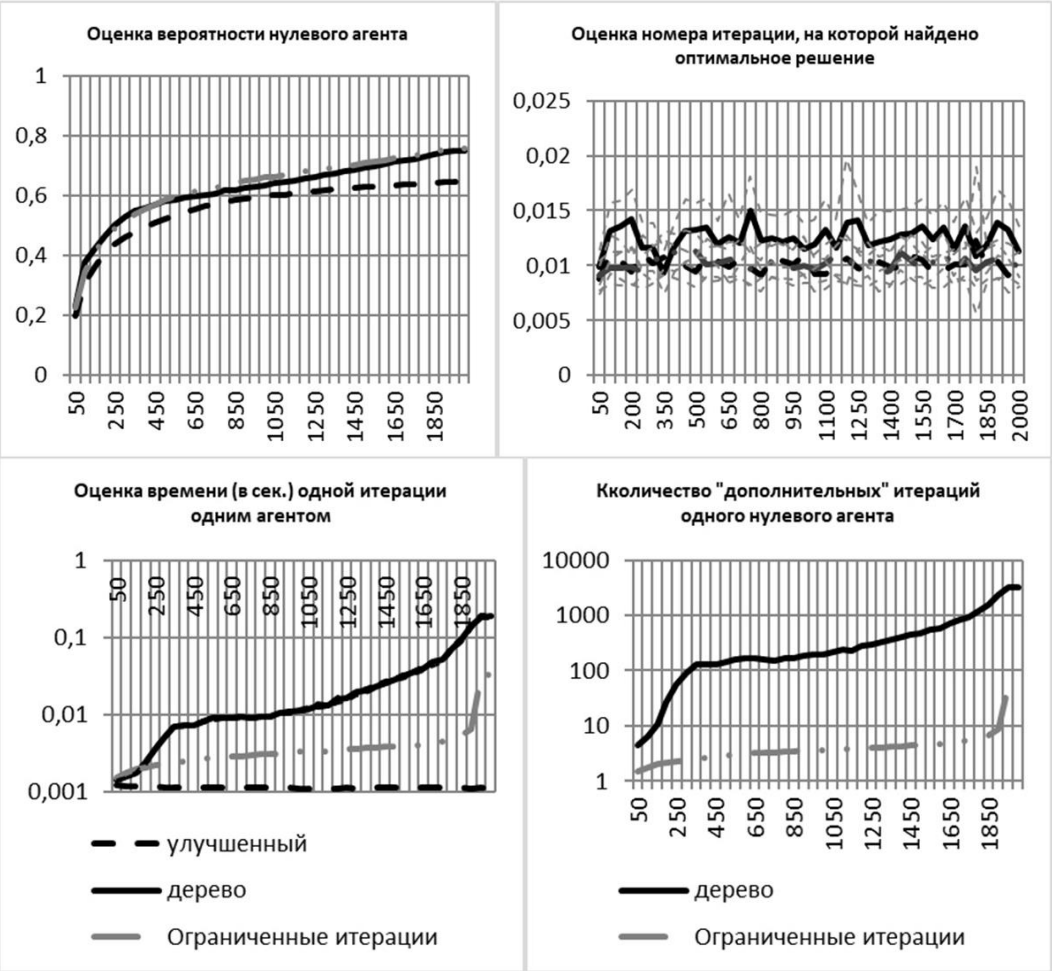


Рис. 4. Результаты работы алгоритма для бэнчмарка «Carrom table function».

На рис. 4 показаны результаты работы метода муравьиных колоний для бэнчмарка «Carrom table function». Варьировалось количество итераций алгоритма при 25 агентах на итерации. Для рассмотрения всех решений необходимо чтобы каждый агент нашел новое решение за 1936 итераций.

Когда остается мало не рассмотренных решений метод муравьиных колоний требует большее количество итераций. При этом резко увеличивается время работы алгоритма и применение для нулевого агента алгоритма обхода дерева требует больше времени и количества итераций, чем применение дополнительного циклического поиска.

Заключение. 1) Метод муравьиных колоний может быть модифицирован для направленного перебора гиперпараметров. 2) Добавление новых слагаемых/сомножителей в вероятностную формулу является сильнейшим инструментом для оптимизации алгоритма. 3) Использование данного параметра позволяет избежать «зацикливания» алгоритма. 4) При последовательном итерационном поиске и минимуме дополнительных итераций зацикливания не происходит. Данная тенденция сохраняется практически до рассмотрения последних решений. 5) При поиске по дереву отсутствие дополнительной информации и строгая очередность слоев приводит к большому числу дополнительных итераций.

Дальнейшее развитие предложенных алгоритмов:

1) определять вершины параметрического графа, в которых больше не осталось решений или минимальное число решений;

2) определять эффективность каждого слоя, его влияния на целевую функцию;

3) рассмотреть другие процедуры составления дерева, переставлять слои;

4) рассмотреть систему автоматической генерации параметрического графа.

Литература

1. Карпенко, А.П., Синицын, И.Н. Бионика и системы высокой доступности // Системы высокой доступности. – 2022. – Т. 18. – № 2. – С. 25−41. DOI: https://doi.org/10.18127/j20729472-202202-02.

2. Colorni, A., Dorigo, M., Maniezzo, V. Distributed Optimization by Ant Colonies. // Proc. First Eur. Conf. on Artific. Life, Paris, France, F.Varela and P.Bourgine (Eds.), Elsevier Publishing. pp. 134-142, 1992.

3. Dorigo, M., St¨ utzle, T.: Ant Colony Optimization //MIT Press, p. 321, 2004

4. Joseph, M. Pasia, Richard, F. Hartl, Karl F. Doerner. Solving a Bi-objective Flowshop Scheduling Problem by Pareto-Ant Colony Optimization M. Dorigo et al. (Eds.) // ANTS 2006, LNCS 4150, pp. 294–305, 2006.

5. Sudakov, V.A., Titov, Y.P. Modified Method of Ant Colonies Application in Search for Rational Assignment of Employees to Tasks // Proceedings of 4th Computational Methods in Systems and Software 2020. Vol.2, Vsetin: Springer Nature, 2020. P. 342-348. DOI 10.1007/978-3-030-63319-6_30.

6. Синицын, И.Н., Титов, Ю.П. Развитие стохастических алгоритмов муравьиной организации // Бионика – 60 лет. Итоги и перспективы. Сборник статей Первой Международной научно-практической конференции, 17-19 декабря 2021 года, г. Москва / Под ред. А.П. Карпенко // М.: Ассоциация технических университетов. – С. 210-220. 2022. DOI: 10.53677/9785919160496_210_220.

7. Титов, Ю.П. Модификации метода муравьиных колоний для решения задач разработки авиационных маршрутов // АиТ. – 2015. – №3. – С. 108–124.

8. Titov, Y.P. Modifications of the ant colony method for aviation routing // Automation and Remote Control. 2015. V.76. No3. P.458-471. DOI: 10.1134/S0005117915030091.

9. Хахулин, Г.Ф. Титов, Ю.П. Система поддержки решений поставок запасных частей летательных аппаратов военного назначения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16. – № 1-5. – С. 1619-1623.

10. Судаков, В.А., Батьковский, А.М., Титов, Ю.П. Алгоритмы ускорения работы модификации метода муравьиных колоний для поиска рационального назначения сотрудников на задачи с нечетким временем выполнения // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2020. – Т. 16. – № 2. – С. 338-350. DOI: 10.25559/SITITO.16.202002.338-350.

11. Parpinelli, R., Lopes, H., Freitas, A.: Data mining with an ant colony optimization algorithm. IEEE Trans. Evol. Comput. 2002. V6. No.4 P. 321–332.

12. Junior I.C.: Data mining with ant colony algorithms. In: Huang, D.-S., Jo, K.- H., Zhou, Y.-Q., Han, K. (eds.) ICIC 2013. LNCS. 2013. V. 7996, P. 30–38.

13. Pasia, J. M., Hartl, R. F., Doerner, K. F. Solving a Bi-objective Flowshop Scheduling Problem by Pareto-Ant Colony Optimization // ANTS 2006. 2006. P. 294–305.

14. Титов, Ю.П. Модификации метода муравьиных колоний для разработки программного обеспечения решения задач многокритериального управления поставками // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2017. – Т. 13. – № 2. – С. 64-74. DOI 10.25559/SITITO.2017.2.222.

15. Синицын, И.Н., Титов, Ю.П. Инструментальное программное обеспечение анализа и синтеза стохастических систем высокой доступности (XV) // Системы высокой доступности. – 2021. – Т. 17. – № 4. – С. 24-33. DOI 10.18127/j20729472-202104-02. – EDN YEGVMR.

16. Синицын, И.Н., Титов, Ю.П. Оптимизация порядка следования гиперпараметров вычислительного кластера методом муравьиных колоний // Системы высокой доступности. – 2022. – Т. 18. – № 3. – С. 23-37. – DOI 10.18127/j20729472-202203-02.

УДК 519.6, 575.8

МОДЕЛИРОВАНИЕ «ИСКУСТВЕННОЙ ЖИЗНИ» НА ОСНОВЕ МНОГОАГЕНТНОГО ПОДХОДА И ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ

А.Д. Тарасова, Ю.Т. Каганов,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия,
e-mail: atarasova413@yandex.ru, yurijkaganov@gmail.com

Аннотация. *Добавлены новые методы изучения и взаимодействия с системой. Проведено исследование применимости методов на основе многоагентного подхода и обучения с подкреплением для решения задач построения системы принятия решений. Предложены методы управления игровыми ситуациями в условиях неопределенности на основе указанных выше методов. Реализовано обучение с подкреплением в предложенной модели.*
Ключевые слова: *искусственная жизнь, обучение с подкреплением, многоагентный подход, эволюция, коэволюция.*

MODELING OF «ARTIFICIAL LIFE» BASED ON A MULTI-AGENT APPROACH AND REINFORCEMENT LEARNING

A.D. Tarasova, Y.T. Kaganov,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract. *New methods of studying and interacting with the system have been added. The study of the applicability of methods based on a multi-agent approach and reinforcement learning to solve the problems of building a decision-making system. Methods of managing game situations in conditions of uncertainty based on the above methods are proposed. Reinforcement learning is implemented in the proposed model.*
Keywords: *artificial life, reinforcement learning, multi-agent approach, evolution, coevolution.*

Введение. *Агент* – компьютерная программа, которая расположена в некоторой среде и способна автономно действовать и обучаться в этой среде для достижения своих целей [1, 2].

Многоагентная система – система, образованная несколькими взаимодействующими интеллектуальными агентами.

Обучение с подкреплением – обучение тому, что делать, т.е. как отобразить ситуации на действия, чтобы максимизировать численный сигнал – вознаграждение [3].

Эволюция в биологии – необратимое развитие организма на основе постепенного изменения живой материи в последовательности поколений организмов [4].

Нейроэволюция – процесс машинного обучения, основанный на эволюционных алгоритмах и нейронных сетях.

Генетический алгоритм – эвристический алгоритм поиска, используемый для решения задач оптимизации путем случайного подбора, комбинирования и вариации искомых параметров на основе принципов биологической эволюции [5].

Коэволюция – процесс машинного обучения двух и более популяций агентов, основанный на эволюционных алгоритмах, в которых значение функции приспособленности одного агента зависит от его взаимодействий с другими агентами [4, 5].

Роевое обучение – совокупность алгоритмов машинного обучения, вдохновленных живой природой и нацеленных на обучение роя агентов [5].

1. Математическая модель. Рассматриваем популяции $P1$ и $P2$ агентов A, эволюционирующие в среде U. Популяции $P1$ и $P2$ не могут скрещиваться между собой. Имеется множество вещественных скалярных выигрышей R, множество действий O (operation) и состояний окружений S (states). Поведение отдельных агентов определяют формулы

$$\phi(t) = \Phi\big(s(t)\big), \tag{1}$$

$$f(t) = F\big(\phi(t)\big), \tag{2}$$

где ϕ – вектор внутренних состояний агента A; s – вектор входных переменных, зависящий от состояния окружающей среды агента; f – выходная переменная; t – единица времени, принимающая целочисленные значения.

Выходная переменная f принимает n дискретных значений $f_1, f_2, \dots, f_n$.

Полагаем, что если $f(t) = f_k$, то в момент времени t агент A произвел действие f_k.

Число состояний не равно числу возможных действий.

Каждый агент A популяции P обладает ресурсом e, который меняется от действий агента, ресурсом t_a, который увеличивается на единицу в каждый момент времени и ресурсом e_p:

$$e(t) = \sum_{i=1}^{n} k_i\, a_i, \text{где} a_i = \begin{Bmatrix} 1, \text{если} f(t) = f_i \\ 0, \text{если} f(t) \neq f_i \end{Bmatrix}. \tag{3}$$

Здесь k_i – коэффициент равный -1 или 1 в зависимости от того приводит ли действие к уменьшению или увеличению ресурса.

В каждый момент времени происходит проверка ресурсов агентов популяции P и если $e \leq 0$, то агент считается мертвым и другие агенты могут уменьшить его ресурс e_p для пополнения своего ресурса e. Если $e_p \leq 0$ или если $t_a \geq t_z$, где t_z – параметр агента A, то агент A удаляется из системы.

Взаимодействие агентов определяется топологией среды U и параметрами цвета агентов *rgb*.

Для обеспечения эволюции популяции у агента есть действие f_s размножения. Если агент родитель Ap нашел партнера агента $Ap2$ и совершает действие f_s, то в популяцию P добавляется новый агент Ao. Часть параметров потомка наследуется от родителя по формуле

$$Bo_{ij} = \left(Bp_{ij} + Bp2_{ij}\right)/2 + \partial_{ij}, \tag{4}$$

где Bp и $Bp2$ – набор параметров родителей; Bo – набор параметров ребенка; ∂_{ij} – случайная величина, имеющая равномерное распределение на интервале $[-pm; pm]$. Выражение (4) – мутационный процесс с амплитудой мутации pm.

Стратегия агента A – отображение из пространства входных в пространство выходных переменных, задаваемых формулами (1) и (2).

В произвольный момент времени *t* агент характеризуется состоянием $st \in S$ и множеством возможных действий *O(st)*. Выбирая действие $o \in O(st)$, он переходит в состояние $st+1$ и получает выигрыш *rt*. Основываясь на таком взаимодействии с окружающей средой, агент, обучающийся с подкреплением, должен выработать стратегию π: $S \rightarrow O$, которая максимизирует величину $R=r0+r1+\cdots+rn$ [6, 7].

2. Правила поведения. Животные живут в двумерном пространстве. Все пространство разделено на клетки и ограничено камнями, за которые животные не могут выходить. На поле в случайном порядке в любой из клеток могут находиться камни, которые являются препятствием для животных. Животные не могут занимать с камнями одну клетку. Животные могут перемещаться в соседние клетки. В каждой клетке может находиться только одно животное или один любой другой объект.

Время дискретно, и в каждый такт времени каждое животное может выполнить только одно действие. Такими действиями могут быть:

1) отдых, то есть животное находится в состоянии покоя;
2) поворачиваться на 90 или 180 градусов;
3) перемещаться на одну клетку вперед;
4) атаковать соперника, только если противник находится спереди;
5) есть, из клетки спереди (в качестве пищи животным служат растения или другие животные);
6) скрещиваться, создавая потомство (необходимы два животных одного вида, находящиеся на соседних клетках).

Для того чтобы находить пищу у животного есть поле зрения. Животное может видеть на две клетки во всех направлениях, но оно не может видеть сквозь камни, растения и других животных. Также оно может определять расстояние до объектов. Эпизодически на несколько тактов в случайных клетках появляются растения. Поедать растения или других животных животное может только из клетки перед собой. Животное, съедая растение, находящееся в соседней клетке, восполняет свой энергетический ресурс.

Если двое животных находятся в соседних клетках, при достаточном количестве энергии у них может появиться желание к скрещиванию. В ре-

зультате появляется новое поколение животных. При этом геном потомка формируется на основе генома родителей при помощи рекомбинации и мутации. Только один родитель передает часть своей энергии. После удачного скрещивания новая особь помещается в одну из пустых соседних клеток от родителя, если она свободна. Если соседние клетки заняты, то новая особь умирает. Это означает, что новому поколению не хватает жизненного пространства.

Алгоритмы поведения животных. Для управления животными были разработаны следующие алгоритмы:

1) вычисление поля обзора;
2) нахождения пути;
3) выбора действия.

Алгоритмы, определяющие поле обзора. Каждая клетка поля обзора животного может принимать одно из следующих значений:

1) пусто;
2) камень;
3) еда;
4) животное.

Также даны координаты животного и его направление на этом поле. Нужно для каждой клетки в пределах поля видимости данного животного указать ее статус, и составить список всех видимых животных, еды, и свободного пространства. Первыми в списке идут ближайшие объекты.

Поле обзора животного составляет две клетки во всех направлениях. Оно может смотреть только через пустые клетки и для него нет разницы в какую сторону смотреть, поэтому алгоритм, высчитывающий поле обзора, не зависит от направления животного. Ниже приведен рисунок, который показывает, как работает данный алгоритм. Разными цветами обозначены клетки разных групп очередности, а стрелками обозначены зависимости (рис. 1).

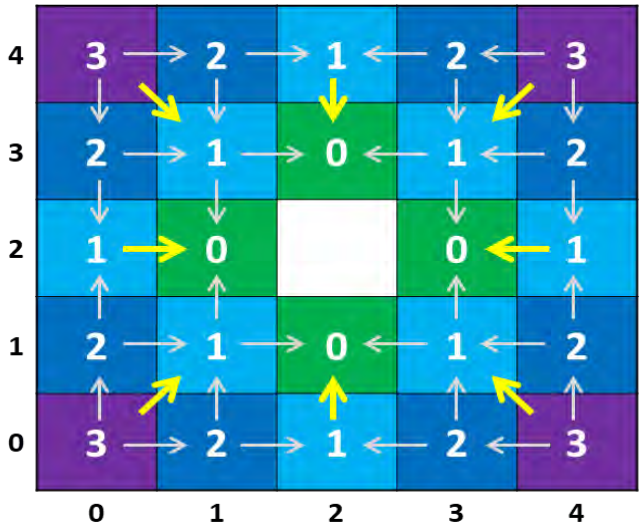


Рис. 1. Зависимость видимости клеток и разбиение на группы по зависимостям.

Алгоритм поля обзора проходит по клеткам согласно очередности группы, к которой она принадлежит, и просматривает ее зависимости, если они есть. Порядок выбора очередности клеток в одной группе неважен. Выбирается обход против часовой стрелки, начиная с верхней или верхней и левой клетки. Реальное поле сильно отличается от того как его воспринимает животное (рис. 2).

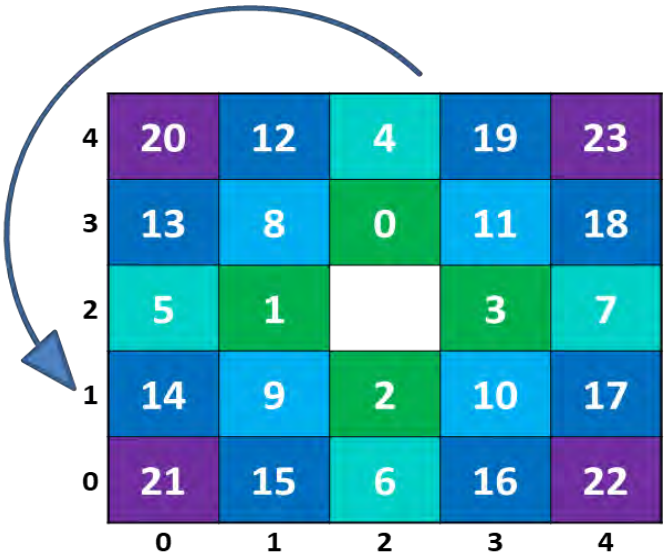


Рис. 2. Порядок очередности прохождение клеток алгоритмом, вычисляющим поле обзора.

Далее составляются списки нужных видимых объектов от близкого к далекому. Они зависят от направления животного, и ближайшими к животному объектами в одной и той же группе будут те объекты, которые находятся перед ним. Ниже показано, как происходит работа алгоритма для двух направлений (рис. 3, 4).

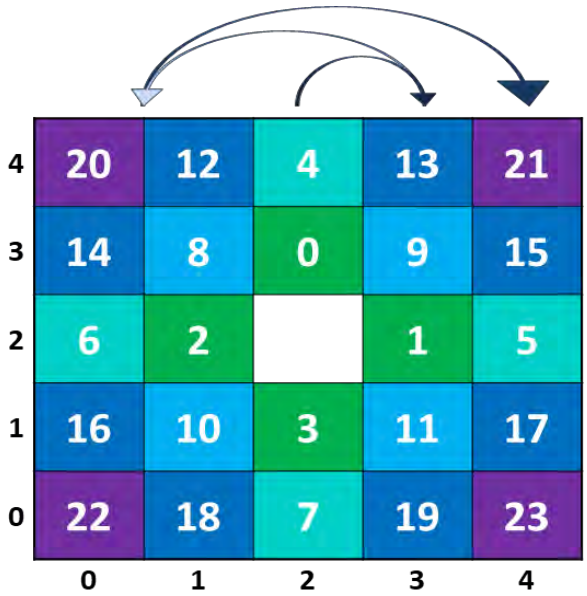


Рис. 3. Нумерация клеток от ближайших к далеким при животном, смотрящем вверх.

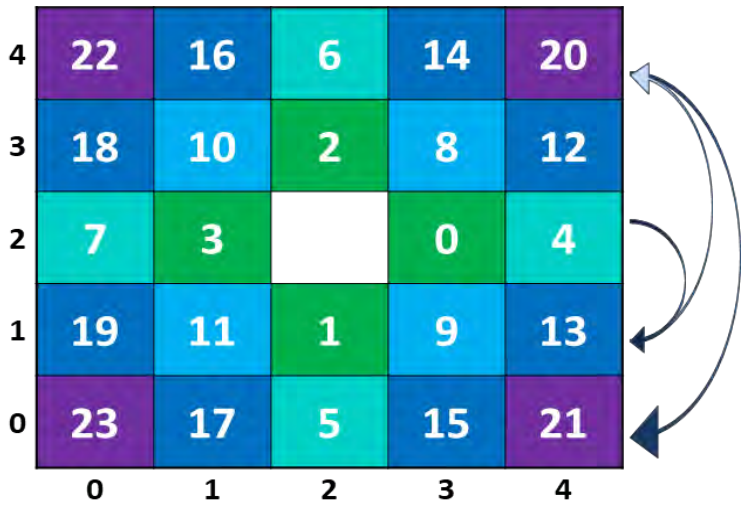


Рис. 4. Нумерация клеток от ближайших к далеким при животном, смотрящем вправо.

Алгоритм поиска пути. На вход алгоритму дается конкретное животное, уже просчитанное поле обзора для данного животного, а также конечная клетка будущего маршрута.

Во время работы алгоритм может поменять либо следующее направление животного (поворот), либо следующую клетку (движение вперед на 1 клетку). Алгоритм возвращает true, если путь построен, и false, если либо путь не существует, либо пунктом назначения является клетка спереди, и, причем, она занята.

Алгоритм выбора цели. В конце каждого шага для каждого животного запускается алгоритм выбора цели. Животное может, как продолжить выполнять предыдущую цель, так и переключиться на более приоритетную.

В этом алгоритме используются полученные в результате обучения с подкреплением параметры мотивации для атаки pA, размножения pS и голода pH. Животное имеет максимальную энергию mE и уровень энергии в данный момент e:

$\frac{e}{mE} > pA$ – животное может атаковать другое животное;

$\frac{e}{mE} > pS$ – животное может размножаться;

$\frac{e}{mE} \leq pH$ – животное голодно и ищет пищу;

$e \leq pH$ – у животного недостаточно энергии для перемещения, и оно хочет отдыхать.

Разделение на виды. У каждого агента присутствует параметр rgb – массив из трех элементов, каждый из которых представляет целочисленное число в диапазоне от 0 до 255. Каждый из элементов массива можно поделить на три подгруппы: *R(r1, r2, r3), G(g1, g2, g3)* и *B(b1, b2, b3)*. Величины *r1, g1, b1* находятся в диапазоне от 0 до 85, величины *r2, g2, b2* – в диапазоне от 86 до 170, *r3, g3, b3* – в диапазоне от 171 до 255.

В зависимости от того к каким подгруппам относится параметр *rgb* агента определяется к какому виду он относится.

В результате в модели на карте возможно до 27 видов агентов. Разные виды не могут спариваться между собой. Максимальное количество возможных видов можно поменять, изменив диапазон определения видов.

Заключение. В настоящей работе усовершенствована основная программа, тем самым усложнение и экспериментирование с кодом стало гораздо удобнее. Разработаны новые модули для иллюстрации симуляции и оптимизирован код. Добавлены новые методы изучения и взаимодействия с системой. Использованы подходы на основе методов многоагентного подхода и методов обучения с подкреплением. Проведено исследование применимости указанных методов для решения задач построения системы принятия решений на основе многоагентного подхода и обучения с подкреплением. Предложены методы управления игровыми ситуациями в условиях неопределенности на основе указанных выше методов. Реализовано обучение с подкреплением в модели. Дальнейшее развитие этого направления связано с использованием теории искусственных нейронных сетей и биоинспирированных методов оптимизации и принятия решений [8]. Разработанная методика может быть реализована как для игровых задач, так и для решения задач принятия решений в условиях неопределенности.

Литература

1. Тарасов, В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. – М.: Изд. УРСС, 2002. – 352 с.
2. Саттон, Р., Барто, Э. Обучение с подкреплением: Введение. 2-е изд. / пер. с англ. А. А. Слинкина. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 552 с.
3. Алфимцев, А.Н. Мультиагентное обучение с подкреплением: учебное пособие/ А. Н. Алфимцев. – М.: Изд-во МГТУ им Н. Э. Баумана, 2021. – 222 с.
4. Северцов, А.С. Теории эволюции: учебник для академического бакалавриата /А.С. Северцов. - 2-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во «Юрайт», 2019. – 384 с.
5. Карпенко, А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учебное пособие / А. П. Карпенко. - 3-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. – 446 с.
6. Редько, В.Г. Моделирование когнитивной эволюции: На пути к теории эволюционного происхождения мышления. М: URSS, 2015 (1 изд.), 2018 (2 изд.).
7. Бурцев, М.С. Эволюция кооперации в многоагентной системе // VII Всероссийская научно-техническая конференция "Нейроинформатика-2005". – М.: МИФИ, 2005.
8. Лапань, М. Глубокое обучение с подкреплением. AlphaGo и другие технологии. – Спб.: Питер, 2020. – 496 с.

УДК 614.876

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЛОГИКИ ПРИЕМА-ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РАДИОФАРМПРЕПАРАТА

И.Т. Утепбергенов, В.И. Фетцов,
Алматинский университет энергетики и связи
имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, Республика Казахстан,
Н. Бринзей,
Исследовательский центр автоматического управления в Нанси,
Кранский университет Лотарингии, Франция,
e-mail: i.utepbergenov@aues.kz, v.fettsov@aues.kz,
nicolae.brinzei@univ-lorraine.fr

Аннотация. *Ядерная медицина – одна из отраслей клинической медицины, потребляющая 50% мировых запасов радиоактивных изотопов. Радиоизотопы прикрепляют в качестве метки к определенным молекулам с учетом их биологических особенностей, в результате чего получают радиофармпрепараты. Исследуемая многоцелевая система синтеза изготовлена из готовых коммерческих деталей и используется для производства радиофармпрепаратов. В течение своего срока службы такие системы функционируют в условиях наличия сильного радиоактивного фона, поэтому она должна обладать высокой надежностью, чтобы выполнять свою миссию. Одним из ключевых факторов успешной работы является надежность логики приема-передачи сигналов. Целью данной работы является обоснование и выбор соответствующей методики исследования и изучения влияния радиоактивного излучения на передачу сигналов.*
Ключевые слова: *ядерная медицина, оценка надежности, блок-схема надежности, надежности логики приема-передачи сигналов.*

IMPROVING RELIABILITY OF THE LOGIC OF SIGNAL TRANSMISSION IN THE RADIOPHARMACEUTICALS PRODUCTION

I.T. Utepbergenov, V.I. Fettsov,
Almaty University of Power Engineering and Telecommunications
named after Gumarbek Daukeev, Almaty, Republic of Kazakhstan,
N. Brinzey,
Nancy Automatic Control Research Center, CRAN University of Lorraine, France

Abstract. *Nuclear medicine is one of the medical branches, that consuming 50% of the world's radioactive isotopes. Radioisotopes attach as a label to molecules, taking into account their biological characteristics, resulting in radiopharmaceuticals. An investigational multi-purpose synthesis system made from Commercial off-the-shelf (COTS) parts is used for the production of radiopharmaceuticals. During the product life, such systems operate in the presence of a*

strong radioactive environment, so it must meet high reliability requirements in order to fulfill its mission. One of the options for successful operation is the reliability of the logic of signal transmission. The purpose of this work is to justify and select the chosen research methodology and study the analysis of signaling data collection.
Keywords: *nuclear medicine; reliability assessment; reliability block diagram; reliability of the logic of signal transmission.*

Введение. Ядерная медицина – одна из отраслей клинической медицины, использующая радионуклиды для диагностики и лечения заболеваний, а также использующая метод лучевой терапии. В основном он необходим для диагностики и лечения онкологических заболеваний.

В настоящее время ядерная медицина делится на три основных направления:

1) радионуклидная диагностика (позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ);

2) лучевая терапия (прямое облучение раковой опухоли);

3) радионуклидная терапия (в опухоль вводят радиоактивный изотоп).

Радиоактивные изотопы используются во всех трех направлениях, при этом радиоактивная медицина потребляет 50% их запасов в мире. К таким изотопам относятся, в частности, радиофармпрепараты типа фтордезоксиглюкозы (ФДГ): он используется в позитронно-эмиссионной томографии при 95% онкологических заболеваний.

Производство радиофармпрепаратов можно условно разделить на две стадии – производство радиоизотопов и получение радиофармпрепаратов. Радиоизотопы производятся путем облучения специальной мишени в ядерном исследовательском реакторе или в ускорителях частиц, таких как циклотроны. Полученные радиоизотопы прикрепляют в качестве метки к определенным молекулам с учетом их биологических особенностей, в результате чего получают радиофармпрепараты.

Для получения фтордезоксиглюкозы используется универсальная система синтеза – полностью автоматизированный модуль синтеза и очистки радиоактивных соединений, используемых для диагностической визуализации методом ПЭТ.

1. Описание объекта исследования. Система синтеза изготовлена из готовых коммерческих компонентов, которые функционируют под воздействием радиации, поэтому она должна обладать высокой надежностью, чтобы выполнять свою задачу без сбоев (рис. 1).

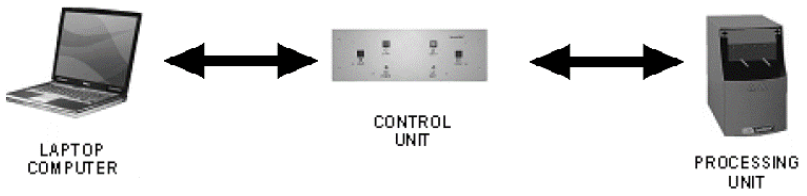


Рис. 1. Состав компонентов системы синтеза.

Система синтеза включает следующие три части:

1) ноутбук с установленным программным обеспечением для операторского контроля (на рис. 2 показано главное окно данного ПО, при синтезе ФДГ);

2) блок управления (по сути, он имеет несколько кнопок управления и содержит элементы питания и передачи данных (по интерфейсу RS-232), располагается за биологической защитой;

3) модуль синтеза – оборудование, выполняющее все операции процесса синтеза, который располагается внутри горячей камеры.

Модуль синтеза состоит из исполнительных механизмов и управляющей части. К исполнительным механизмам можно отнести: электромагнитные клапаны, сухие магнитные контакты, пневмоцилиндры, пневматический поворотный привод на 90 градусов, нагревательный элемент, вакуумный насос, регулятор давления, RFID датчик, датчик радиации, термопарный датчик, датчик давления.

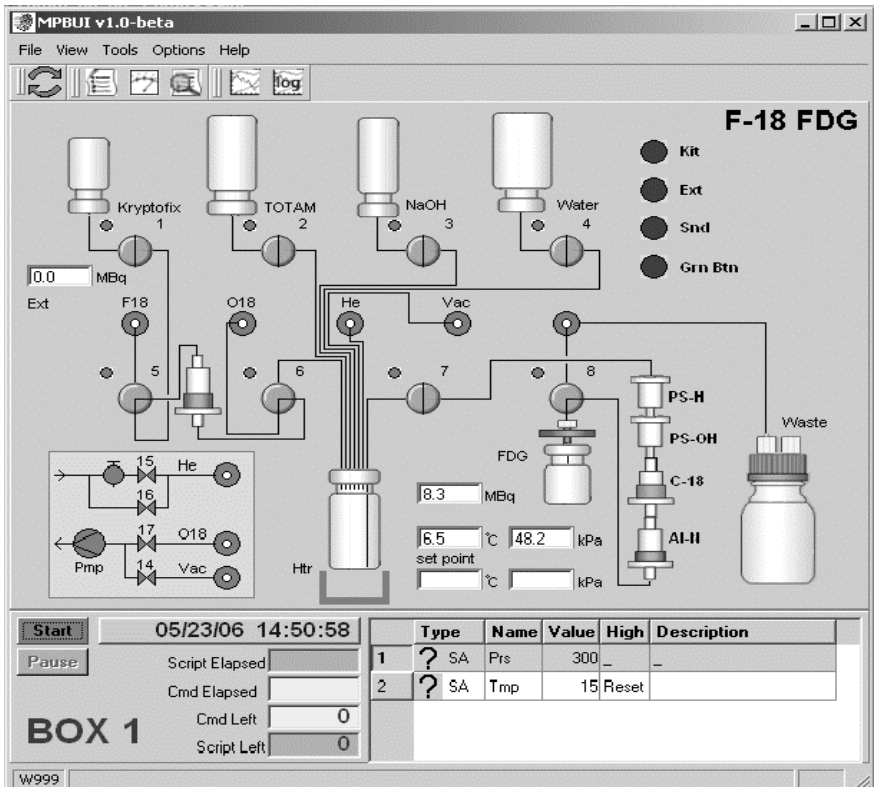


Рис. 2. Главное окно программного обеспечения системы синтеза.

Управляющая часть состоит из двух печатных плат – релейной и управляющей. В состав релейной платы входят: реле, диоды, резисторы, предохранитель, конденсаторы. Состав управляющей платы: 8-битный PIC микроконтроллер, операционные усилители, линейные драйверы и приемники, источник опорного напряжения, регуляторы напряжения, потенциометры, диоды, резисторы и конденсаторы.

2. Оценка надежности. В течение своего срока службы система синтеза для получения ФДГ функционирует в условиях наличия сильного

радиоактивного фона, поэтому она должна обладать высокой надежностью, чтобы выполнять свою миссию. Для оценки надежности системы была предложена следующая методика:

1) строится функциональная схема системы путем выделения функциональных частей (подсистем);

2) на основе полученной функциональной схемы строится блок-схема надежности;

3) проводится оценка надежности отдельных элементов подсистемы;

4) проводится расчет надежности всей системы.

С помощью данной методики была рассчитана надежность подсистемы фиксации картриджа. Была построена функциональная схема подсистемы (рис. 3), где MCU – PIC микроконтроллер, R – реле, RS – сухой магнитный контакт, EV – электромагнитный клапан, а PC – пневмоцилиндр.

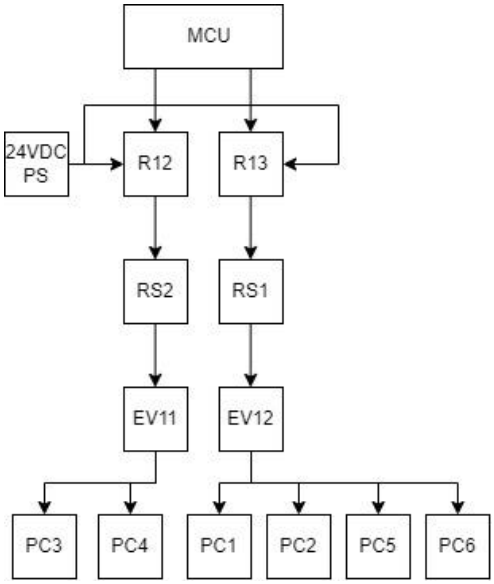


Рис. 3. Функциональная схема подсистемы фиксации картриджа.

Блок-схема надежности подсистемы фиксации картриджа была выполнена с помощью программного обеспечения GRIF (рис. 4). Для данной блок-схемы получено следующее двоичное слово надежности:

$$y = x_{MCU} \wedge \left(x_{R12} \wedge x_{RS2} \wedge x_{EV11} \wedge x_{PC3} \wedge x_{PC4} \vee x_{R13} \wedge x_{RS1} \wedge x_{EV12} \wedge (x_{PC1} \wedge x_{PC2} \vee x_{PC5} \wedge x_{PC6})\right)$$

В качестве альтернативного подхода была построена диаграмма Хассе [1] подсистемы (рис. 5). Сплошным контуром отмечен путь, а сплошным жирным – минимальный путь, штриховым контуром отмечен срез, а жирным штриховым – минимальный срез (Cut-set, minimal cut-set, path-set, minimal path-set). Для более компактного представления диаграммы Хассе бинарное слово подсистемы было упрощено до следующего вида:

$$x_{MCU}, x_{L1}, x_{L2_{el}}, x_{L2_{PC}1\wedge 2}, x_{L2_{PC}5\wedge 6}.$$

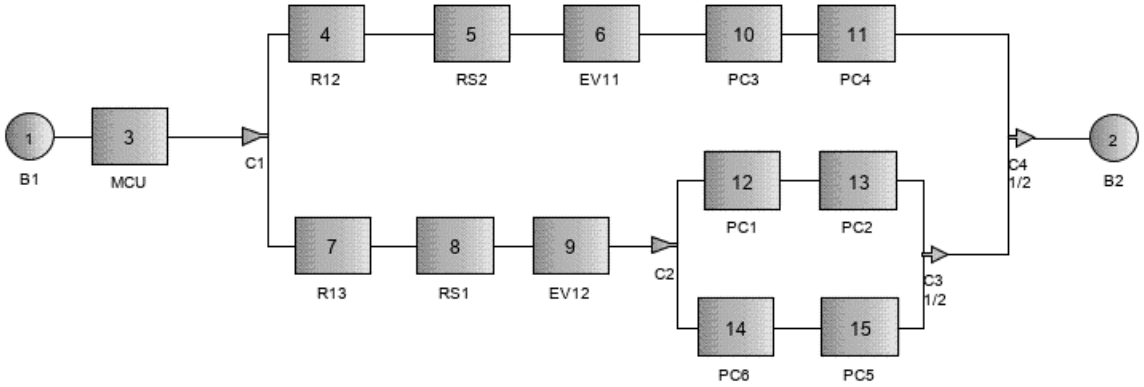


Рис. 4. Блок-схема надежности системы фиксации картриджа.

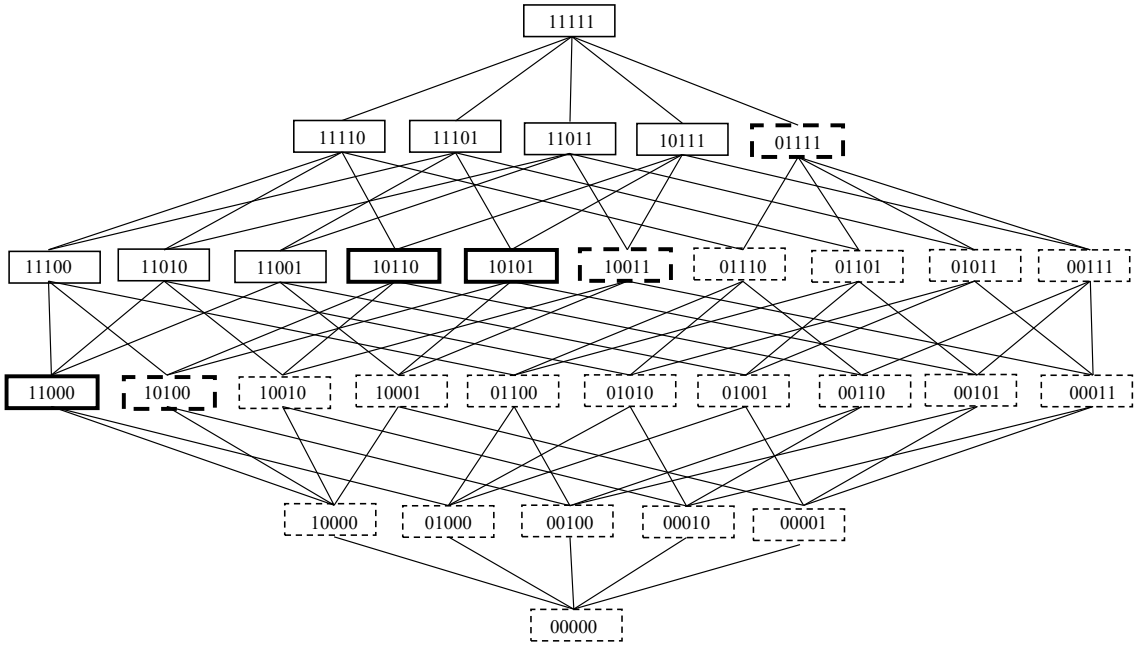


Рис. 5. Диаграмма Хассе системы фиксации картриджа.

Для вычисления надежности подсистемы были найдены значения частоты отказов отдельных элементов (таблица 1).

Значение частоты отказов были взяты из разных источников (таких как MIL217, базы данных надежности производителя и базы данных надежности аналогового оборудования).

Таблица 1. Частоты отказов элементов системы.

Элемент системы	Частота отказов
Микроконтроллер	$\lambda_{MCU} = 3.27 \cdot 10^{-9}$ч$^{-1}$
Реле	$\lambda_{R} = 3.54 \cdot 10^{-8}$ч$^{-1}$
Сухой магнитный контакт	$\lambda_{RS} = 5.00 \cdot 10^{-9}$ч$^{-1}$
Электромагнитный клапан	$\lambda_{EV} = 3.12 \cdot 10^{-6}$ч$^{-1}$
Пневмоцилиндр	$\lambda_{PC} = 1.37 \cdot 10^{-6}$ч$^{-1}$

Для расчета надежности подсистемы с помощью диаграммы Хассе построено выражение

$$R_{Sys}(t) = R_{MCU}(t) \cdot R_{L1}(t) + R_{MCU}(t) \cdot R_{L2el}(t) \cdot R_{L2_{PC1}\wedge 2}(t) + R_{MCU}(t) \cdot R_{L2el}(t) \cdot R_{L2_{PC5}\wedge 6}(t) + R_{MCU}(t) \cdot R_{L1}(t) \cdot R_{L2el}(t) \cdot R_{L2_{PC1}\wedge 2}(t) \cdot R_{L2_{PC5}\wedge 6}(t) - R_{MCU}(t) \cdot R_{L1}(t) \cdot R_{L2el}(t) \cdot R_{L2_{PC1}\wedge 2}(t) - R_{MCU}(t) \cdot R_{L1}(t) \cdot R_{L2el}(t) \cdot R_{L2_{PC5}\wedge 6}(t) - R_{MCU}(t) \cdot R_{L2el}(t) \cdot R_{L2_{PC1}\wedge 2}(t) \cdot R_{L2_{PC5}\wedge 6}(t)$$

Результаты расчетов надежности двумя методами приведены в виде кривых на рис. 6. Эти результаты, как и ожидалось, идентичны.

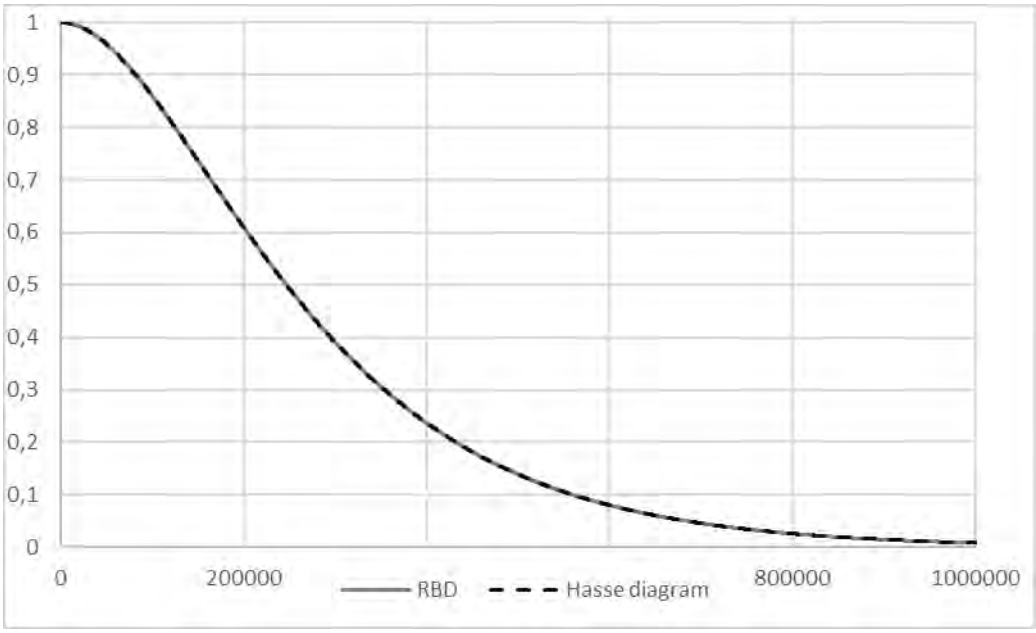


Рис. 6. Результаты расчетов надежности подсистемы.

3. Выбор методики оценки влияния радиоактивного фона на надежность системы. Существуют две основные категории радиационных эффектов, которые воздействуют на электронные устройства: эффекты полной дозы (Total Ionizing Dose [TID]) и эффекты одиночного события (Single-Event Effects [SEE]) [2, 3]. Эффекты полной дозы – это кумулятивные эффекты, вызывающие ухудшение электрических параметров на уровне устройства, схемы и системы. Они вызваны общим количеством ионизирующей энергии, выделяемой фотонами или частицами, такими как электроны, протоны или тяжелые ионы [4]. SEE индуцируются прохождением одного высокоэнергетического протона или тяжелого иона через устройство или чувствительную область микросхемы. SEE в цифровых интегральных схемах (ICs) могут быть либо разрушительными, либо неразрушающими, такими как возникновение переходных сбоев в комбинационной и последовательной логике [5].

Мягкие ошибки (Soft errors) представляют собой подмножество SEE которое включает также: однособытийное запирание (Single-Event Latch-up [SEL]), однособытийное функциональное прерывание (Single-Event

Functional Interrupt [SEFI]), однособытийные переходные процессы (Single-Event Transients [SET]), однособытийный сбой (Single-Event Upset [SEU]) и многобитовый сбой (Multiple-Bit Upset [MBUs]) [6, 7].

Наиболее часто применяемыми подходами для оценки частоты мягких ошибок (Soft Error Rate [SER]) являются методы, основанные на внедрении ошибок (Fault Injection), в том числе с помощью облучения пучками ускоренных ионов. Ограниченное количество участков, пригодных для внедрения ошибок, и необходимость сравнения с эталонной системой делают эти методики достаточно затратным по времени.

Был предложен аналитический метод [8], представляющий аналитическую модель, основанную на мягком распространении ошибок на уровне входа с использованием концепции вероятности распространения ошибок (Error Propagation Probability [EPP]).

В работе [9] предложен аналитический метод оценки частоты мягких ошибок SER цифровых схем при наличии переходных процессов с множественными событиями (Multiple Event Transients [MET]).

В этой области также использовался вероятностный метод доказательства теорем. Аббаси [11] расширил работу Хасана [12], формализовав статистические свойства непрерывных случайных величин, а также свойства распределения вероятностей множественных случайных величин. Аббаси использовал эту формализацию для формального анализа надежности технических систем с использованием доказательства теорем.

Для нашей системы марковское моделирование воздействий SEU и возможных методов их смягчения, выглядит наиболее приемлемым. Такое моделирование позволяет оценить надежность системы на ранних стадиях проектирования по ее диаграмме потока управляющих данных (Control Data Flow Graph [CDFG]) с использованием метода проверки вероятностной модели.

Заключение. В нашей работе отдано предпочтение использованию формальных методов проверки, поскольку они могут гарантировать точные решения. Для этого моделируем периодический скраб, используя обычные цепи Маркова. Неэкспоненциальные распределения времени удержания в цепях Маркова аппроксимируются путем вставки нескольких промежуточных состояний на основе распределения фазового типа.

Впервые проведен анализ надежности многоцелевой системы синтеза:

1) проведена идентификация функциональной блок-схемы подсистемы;

2) разработаны две модели для исследования надежности системы с помощью блок-схем надежности (RBD) и диаграммы Хассе;

3) получено аналитическое выражение для вероятностной оценки надежности системы.

Результаты работы показывают, что можно оценить надежность многоцелевой системы синтеза, используемой для производства радиофармпрепаратов для ядерной медицины. Впервые был предложен подход к модели-

рованию и вероятностной оценке для систем такого типа. Чтобы иметь модель всей системы синтеза, необходимо учитывать и другие подсистемы. Кроме того, следует определить компоненты, оказывающие решающее влияние на надежность системы, для уточнения интенсивности их отказов.

Для учета влияния радиационного фона на надежность системы была выбрана методика оценки частоты мягких ошибок.

Литература

1. N. Brinzei, JF Aubry. Graphs models and algorithms for reliability assessment of coherent and non-coherent systems. Proc IMechE Part O: J Risk and Reliability 2018, Vol. 232(2) 201–215.
2. J.P. Raymond, E.L. Petersen. COMPARISON OF NEUTRON, PROTON AND GAMMA RAY EFFECTS IN SEMICONDUCTOR DEVICES. IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-34, No. 6, December 1987.
3. Paul E. Dodd Lloyd W. Massengill. Basic Mechanisms and Modeling of Single-Event Upset in Digital Microelectronics. IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 50, NO. 3, JUNE 2003.
4. Krzysztof Iniewski. RADIATION EFFECTS IN SEMICONDUCTORS. CMOS Emerging Technologies Inc., Vancouver, British Columbia, Canada, 2010.
5. T.S. Nidhin, Anindya Bhattacharyya, R.P. Behera, T. Jayanthi, K. Velusamy. Understanding radiation effects in SRAM-based field programmable gate arrays for implementing instrumentation and control systems of nuclear power plants. Nuclear Engineering and Technology 49 (2017) 1589-1599.
6. P. Adell, G. Allen. Assessing and Mitigating Radiation Effects in Xilinx FPGAs. Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology Pasadena, California JPL Publication 08-9 2/08.
7. Luiz H. Claro, A. A. Silva, José A. Santos, Suzy F. L. Nogueira, Ary G. Barrios Jr. EVALUATION OF SOFT ERRORS RATE IN A COMMERCIAL MEMORY EEPROM. 2011 International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2011 Belo Horizonte,MG, Brazil, October 24-28, 2011.
8. G. Asadi, M.B. Tahoori, B. Mullins, D. Kaeli, and K. Granlund. Soft error susceptibility analysis of SRAM-based FPGAs in high-performance information systems. Nuclear Science, IEEE Transactions on, 54(6):2714–2726, 2007.
9. M. Fazeli, S. N. Ahmadian, S. G. Miremadi, H. Asadi, and M. B Tahoori. Soft Error Rate Estimation of Digital Circuits in the Presence of Multiple Event Transients (METs). In Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), 2011, pages 1–6. IEEE, 2011.
10. S Shazli and Mehdi Tahoori. A framework based on boolean satisfiability for soft error rate computation in early design stages. In Proc. Intl Workshop on Resilience Assessment and Dependability Benchmarking. Citeseer, 2008.
11. N. Abbasi. Formal Reliability Analysis using Higher-Order Logic Theorem Proving. PhD thesis, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada, 2012.
12. O. Hasan. Formal Probabilistic Analysis using Theorem Proving. PhD thesis, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada, 2008.

УДК 004:93

ЛОКАЛЬНЫЙ КЛАССИФИКАТОР ПОКОМПОНЕНТНОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ЛИЦА

Ш.Х. Фазылов, Н.М. Мирзаев, Ш.С. Кахаров,
НИИ развития цифровых технологий и искусственного интеллекта,
г. Ташкент, Республика Узбекистан,
e-mail: sh.fazilov@mail.ru, nomaz.mirza@rambler.ru, h.kaxarov93@gmail.com

Аннотация. *Приводятся основные этапы построения локального классификатора, предназначенного для покомпонентного распознавания лиц на основе принятия мягких решений по каждому из рассматриваемых компонентов лица, что позволяет повысить устойчивость работы системы биометрической идентификации личности по изображению лица. Приводятся результаты экспериментальных исследований, позволяющие оценить эффективность предложенного классификатора.*
Ключевые слова: *классификатор, распознавание лица, биометрическая идентификация, изображение лица, компоненты лица, дескрипторы.*

LOCAL CLASSIFIER OF COMPONENT-BASED FACE RECOGNITION

Sh.Kh. Fazilov, N.M. Mirzaev, Sh.S. Kakharov,
Research Institute for the Development of Digital Technologies and Artificial Intelligence, Tashkent, Republic of Uzbekistan

Abstract. The main stages of building a local classifier of component-based face recognition based on making soft decisions for each of the considered components of the face are given, which makes it possible to increase the stability of the system of biometric identification of a person from a face image. The results of experimental studies are presented, which allow evaluating the effectiveness of the proposed classifier.
Keywords: classifier, face recognition, biometric identification, face image, face components, descriptors.

Введение. В настоящее время существуют различные варианты реализации покомпонентного распознавания лиц, которые отличаются, в основном, выбором тех или иных сочетаний компонентов лица (брови, глаза, нос, рот и т.д.), способами определения признаков (дескрипторов) компонентов лица и алгоритмами распознавания.

В данной работе покомпонентное распознавание лиц реализуется в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1. Для выбранных компонентов лица определяются соответствующие значения признаков, которые подаются на вход локальных классификаторов, реализующих процесс мягкого распознавания. Затем на основе результатов этих классификаторов интегратор формирует окончательное решение по распознаваемому лицу.

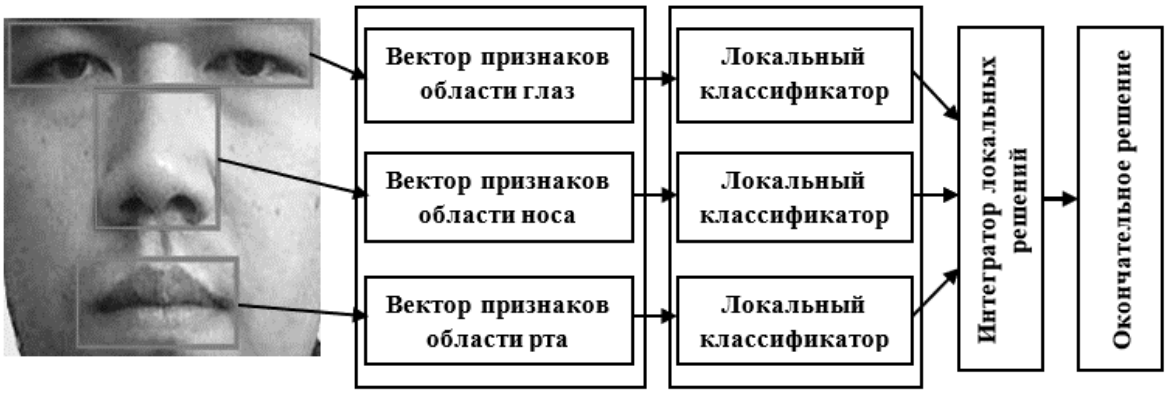


Рис. 1. Схема реализации покомпонентного распознавания лиц.

Такой подход к реализации покомпонентного распознавания лиц имеет ряд преимуществ, основное из которых состоит в том, что при использовании локальных классификаторов имеется возможность принятия мягких решений, которые представляются в форме списка кандидатов с приписанными им весами. Принятие таких решений обеспечивает устойчивость работы системы: малые изменения на входе любого локального классификатора приводят к малым изменениям, как на его выходе, так и на выходе всей системы.

1. Постановка задачи. Задача построения локального классификатора, обучаемого с учителем, по своей сути является классической задачей распознавания (задача Z), которая формулируется следующим образом [1].

Пусть дано множество F допустимых объектов. Каждый объект $F_i \in F$ описан в признаковом пространстве $F_i = \left(x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_n}\right)$.

Предполагается, что элементы F образуют l непересекающихся классов $C_1, \dots, C_j, \dots, C_l$:

$$F = j = 1lC_j, C_i \cap C_j = \emptyset, i \neq j, i, j \in \{1, \dots, l\}. \quad (1)$$

Разбиение (1) определено не полностью, а имеется только некоторая начальная информация I_0 о классах $C_1, \dots, C_j, \dots, C_l$. Пусть имеется некоторая выборка $\mathcal{F}^m (\mathcal{F}^m \subset F)$, состоящая из m объектов:

$$\mathcal{F}^m = \{F_1, \dots, F_u, \dots, F_m\}, \quad (2)$$

где $F_u \in F, u = \overline{1,m}$.

Введем следующие обозначения для объектов (2):

$$\mathcal{C}_j = \mathcal{F}^m \cap C_j, \mathcal{A}_j = \mathcal{F}^m \setminus \mathcal{C}_j.$$

Тогда начальную информацию I_0 о классах можно задать в виде

$$I_0 = \{F_1, \alpha(F_1), \dots, F_u, \alpha(F_u), \dots, F_m, \alpha(F_m)\},$$

где $\alpha(F_u)$ –информационный вектор объекта $F_u(F_u \in F^m)$: $\alpha(F_u) = (\alpha_{u1}, \dots, \alpha_{uj}, \dots, \alpha_{ul})$. Здесь α_{uj} –значение предиката, имеющего вид

$$P_j(F_u) = \begin{cases} 1, \text{если} F_u \in C_j; \\ 0, \text{если} F_u \notin C_j. \end{cases} \quad (3)$$

Задача состоит в построении такого алгоритма A, который позволяет по начальной информации I_0 вычислить значения элементарных предикатов (3): $A(F_u) = \alpha(F_u)$.

2. Метод решения. Построение локального классификатора в данной работе основано на решении задачи Z, в которой в качестве объектов выступают изображения рассматриваемого компонента лица (далее по тексту – «компонент»). В качестве компонента может рассматриваться например, правый глаз, левый глаз, нос или рот [2].

Предлагаемая модель локального классификатора основана на оценке взаимозависимости между идентификационными признаками изображения компонента лица и задается в виде следующих основных этапов.

1. Выделение сильносвязанных наборов признаков изображений компонента лица. На этом этапе определяются n' «независимых» подмножеств признаков компонента.

Рассмотрим все возможные непересекающиеся подмножества из данного набора признаков $\{x_1, \dots, x_p, \dots, x_n\}$. Определим общее множество таких подмножеств через W. Из множества W выделим n' «независимых» подмножеств, состоящих из сильносвязанных признаков. Совокупность этих подмножеств обозначим как

$$W_B = \{\Omega_1, \dots, \Omega_q, \dots, \Omega_{n'}\}.$$

При этом элементы $\Omega_q \left(q = \overline{1, n'}\right)$ зависят не только от n' параметров, но и от первоначальной информации. Поэтому они будут разными для каждого класса $K_j (j = \overline{1, l})$.

2. Формирование набора идентификационных признаков изображений компонента лица. На этом этапе формируется набор n' идентификационных признаков изображений компонента.

Для формирования набора идентификационных признаков из каждого Ω_q подмножества выделим один типичный представитель $x_{i_q} (x_{i_q} \in \Omega_q)$. Совокупность таких представителей определяет набор идентификационных признаков, формирующих пространство размерности n'. При этом размерность n' намного меньше размерности исходного пространства признаков $n (n' \ll n)$. Далее пространство идентификационных признаков обозначим через

$$X' = \left(x_{i_1}, \dots, x_{i_q}, \dots, x_{i_{n'}}\right).$$

3. Определение функции различия $d(F_u, F)$ между изображениями F_u и F. На этом этапе определяется функция различия изображений компонента лица F_u и F, описывающая меру различия между этими изображениями:

$$d(F_u, F) = \sum_{q=1}^{n'} \lambda_q \left(a_{ui_q} - a_{i_q}\right)^2, \tag{4}$$

где a_{ui_q} – значение i_q – идентификационного признака изображения F_u; a_{i_q} – значение i_q – идентификационного признака изображения F; λ_q – неизвестный параметр, представляющий важность соответствующего признака изображения компоненты лица.

4. Определение обобщенной функции различия между изображением компонента лица F и изображениями этого компонента, представленными в классе K_j. На этом этапе определяется обобщенная функция различия, описывающая отличие изображения компонента лица F от класса K_j. Обобщенная функция различия может быть задана как

$$D(K_j, F) = \sum_{F_u \in K_j} \gamma_u d(F_u, F), \tag{5}$$

здесь γ_u – параметр, представляющий важность изображения F_u в обучающей выборке.

5. Определение функции близости $R(K_j, F)$ между изображением компонента лица F и изображениями этого компонента, представленными в классе K_j. Здесь функция близости между изображением компонента лица F и класса K_j определяется с помощью радиальных функций [3]:

$$R(K_j, F) = \frac{1}{1 + \tau D(K_j, F)}, \tag{6}$$

где τ – параметр алгоритма распознавания.

Для изображения компонента лица F с использованием радиальных функций на основе выражения (6) можно вычислить оценки принадлежности

$$F: R(K_1, F), \ldots, R(K_j, F), \ldots, R(K_l, F).$$

На основе этой последовательности оценок принадлежности формируются мягкие результаты распознавания (мягкие решения) локального классификатора в виде упорядоченного списка кандидатов.

Таким образом, перечисленные этапы формируют модель локальных классификаторов, основанную на оценке взаимосвязанности между признаками рассматриваемого компонента лица.

Для исследования эффективности различных моделей классификаторов были проведены эксперименты по распознаванию лиц на основе покомпонентного подхода. В эксперименте участвовали предложенный в данной работе локальный классификатор, обозначенный как A1, модель классификатора, реализующего метод k-ближайших соседей, обозначенный как A2, а также модель классификатора, реализующего алгоритм вычисления оценок, обозначенный как A3.

Эксперимент проводился с использованием следующих баз данных фронтальных изображений лиц:

- FERET [4], содержащей 1187 изображений лиц (размер изображения 256x384 пикселей);
- LAB DPS [5], состоящая из 9806 изображений (размер изображений 210x250 пикселей).

Оценка эффективности работы тестируемых классификаторов осуществлялась на основе показателей точности и времени распознавания компонентов лица.

В таблице 1 приведены результаты распознавания компонентов лица по базе изображений FERET.

Таблица 1. Результаты распознавания по базе данных изображений лиц «FERET».

Алгоритм	Точность распознавания компонентов				Время, затраченное на анализ одного изображения (мс)
	Правый глаз	Левый глаз	Область носа	Область рта	
A1	0,951	0,952	0,898	0,822	3,2
A2	0,917	0,901	0,764	0,766	10,4
A3	0,931	0,922	0,807	0,781	8,2

В таблице 2 приведены результаты распознавания по базы данных изображений лиц «LAB DPS».

Таблица 2. Результаты распознавания по базе данных изображений лиц «LAB DPS».

Алгоритм	Точность распознавания компонентов				Время затраченное на анализ одного изображения (мс)
	Правый глаз	Левый глаз	Область носа	Область рта	
A1	0,918	0,925	0,805	0,811	3,1
A2	0,912	0,917	0,703	0,702	9,7
A3	0,908	0,913	0,732	0,723	8,6

Более высокая точность распознавания элементов лица по базе данных FERET объясняется тем, что качество изображений лиц в этой базе несколько выше, чем в базе данных «LAB DPS».

Данные, приведенные в таблицах 1 и 2, иллюстрируют более высокое качество распознавания предложенного классификатора A1 по сравнению с классификаторами A2 и A3. Это связано с тем, что при обучении классификатора A1 формируется набор независимых идентификационных признаков рассматриваемого компонента лица, обеспечивающих более полное извлечение полезной информации из обучающей выборки. Кроме того, данные таблиц 1 и 2 показывают существенный выигрыш по времени распознавания компонентов лица с использованием классификатора A1 по сравнению с классификаторами A2 и A3. Это объясняется тем, что в процессе обучения A1 происходит существенное сокращение размерности исходного пространства признаков за счет выделения идентификационных признаков, представляющих распознаваемый компонент лица.

Заключение. В данной работе рассмотрена задача биометрической идентификации личности человека на основе покомпонентного распознавания лица. Для формирования мягких решений предложен локальный классификатор, основанный на оценке взаимозависимости между исходными признаками изображения рассматриваемого компонента лица. Использование локальных классификаторов позволяет ускорить процесс биометрической идентификации за счет реализации параллельного распознавания компонентов лица с последующим формированием обобщенного решения на основе интеграции мягких решений локальных классификаторов.

Литература

1. Журавлев, Ю.И. Избранные научные труды. – М.: Магистр, 1998. – 416 с.
2. Sh. Fazilov, O. Mirzaev, E. Saliev, M. Khaydarova, S. Ibragimova, N. . Model of recognition algorithms for objects specified as images. Proceedings of the 9th International Conference Advanced computer information technologies. IEEE, pp. 479–482 (2019). https://doi.org/10.1109/ACITT.2019.8779943
3. R.O. Duda, P.E. Hart, D.G. Stork. Pattern classification. – John Wiley & Sons, 2012. – 688 p.
4. Color FERET Database / NIST, https://www.nist.gov/itl/products-and-services/color-feret-database, last accessed 2022/12/03
5. N.S. Mamatov, B.A. Abdukadirov, Sh.S. Kakharov, B. Orifjonov, G. Abdukadirova. Peculiarities of face detection and recognition. 2021 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT), pp. 1–5, IEEE, Tashkent (2021). https://doi.org/10.1109/ICISCT52966.2021.9670086

УДК 681.5.013

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ МОДИФИЦИРОВАННЫХ АЛГОРИТМОВ ИСКУССТВЕННЫХ ИММУННЫХ СИСТЕМ

О.И. Ширяева, Т.И. Самигулин,
Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева,
Институт информационных и вычислительных технологий МОН РК,
г. Алматы, Республика Казахстан,
e-mail: oshiryayeva@gmail.com, timur.samigulin@yandex.kz

Аннотация. *В данной работе получены результаты синтеза интеллектуальной системы управления сложным промышленным объектом на основе модифицированных алгоритмов искусственных иммунных систем, AIS, и современного промышленного оборудования. Разработано программное обеспечение для автоматизированной настройки типовых контроллеров промышленного многомерного и многосвязного (MIMO) объекта на основе модифицированных алгоритмов AIS и оценки их эффективности. Эти алгоритмы используются для минимизации критериев качества такого промышленного объекта, как дистилляционная колонна очистки газа от примесей. В работе также обосновывается эффективность внедрения разработанной интеллектуальной системы для решения задач оптимального управления технологическим производством в нефтегазовой отрасли, на примере реального производственного процесса предприятия.*
Ключевые слова: *искусственные иммунные системы, модифицированные алгоритмы, система оптимального управления, оценка эффективности алгоритма, сложная система управления, дистилляционная колонна очистки газа.*

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF OPTIMIZATION MODIFIED ALGORITHMS OF ARTIFICIAL IMMUNE SYSTEMS

O.I. Shiryayeva, T.I. Samigulin,
Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev,
Institute of Information and Computational Technologies,
Almaty, Republic of Kazakhstan

Abstract. *In this paper, the results of the synthesis of an intelligent control system for a MIMO industrial facility based on modified algorithms of artificial immune systems, AIS are obtained. The efficiency of AIS algorithms for automated configuration of typical controllers of an industrial MIMO facility has been evaluated. AIS algorithms are used to minimize the quality criteria of the distillation column processes of gas purification from impurities.*
Keywords: *artificial immune systems, modified algorithms, optimal control system, algorithm efficiency evaluation, MIMO control system, distillation column.*

Введение. Искусственные иммунные системы, известные как Artificial Immune System (AIS), в настоящее время получили широкое применение в качестве механизма для решения различных задач оптимизации. В теории оптимальных систем управления техническими системами и технологическими объектами алгоритмы AIS относятся к интеллектуальным поисковым алгоритмам, которые инспирированы живой природой. Также в настоящее время широко представлены и имеют практическую реализацию модифицированные алгоритмы AIS, для модификации которых используются и другие биоинспирированные поисковые алгоритмы, такие как генетические алгоритмы, алгоритмы роевого интеллекта и пр.

Цель работы заключается в получении результатов оценки эффективности оптимизационных модифицированных алгоритмов AIS при их использовании для решения задач оптимального управления технологическими процессами.

В настоящее время разработано большое количество систем оптимального управления для одномерных объектов (SISO) на основе биоинспирированных алгоритмов, однако большинство сложных промышленных объектов имеют многомерную, многосвязную структуру (MIMO). Синтез MIMO-систем управления занимает важную часть при решении индустриальных задач с применением алгоритмов искусственного интеллекта. Успешное внедрение промышленного искусственного интеллекта обуславливает его интеграцию, например, в нефтегазовой отрасли, отличающейся высокими технологическими требованиями к процессам, набором больших данных и использованием микропроцессорной техники [1]. Это является следствием интенсивного развития интеллектуальных алгоритмов для эффективного решения различных задач производства [2]. В частности, для обработки данных, для оптимального управления производственными процессами, для решения задач прогнозирования на основе технологий умного производства, методов машинного обучения, цифровых двойников [3].

1. Постановка задачи и обоснование ограничений. Для практической реализации интеллектуальных методов используем двухконтурную систему управления процессами дистилляционной колонны тарельчатого типа. Дистилляционная колонна является важнейшим промышленным агрегатом в нефтегазовой и химической промышленности, предназначенным для очистки жидкостей и газов от примесей.

Большой ряд работ имеет дело с бинарной структурой управления изменения расхода рефлюкса и тепловой нагрузки ребойлера для регулирования компонентного состава дистиллята и кубового остатка. В этой *L-V* структуре входами являются скорость потока жидкости, L, и скорость потока пара, V, а выходами – концентрации продуктов χ_D и χ_B. В данной работе используется модель дистилляционной колонны тарельчатого типа Minh, с количеством тарелок N=14 [4].

Структура *L-V* может рассматриваться как стандартная структура управления для дистилляции с контролем состава, при этом колонна содержит один поток сырья и два потока продукта:

– поток сырья содержит мольный процент компонента, χ_F;

– поток верхнего продукта, дистиллят, χ_D;

– поток продукта, выходящего из нижней части, содержит легкий компонент, χ_B.

Здесь управляемыми переменными, которые должны поддерживаться на заданном уровне, являются состав дистиллята, χ_D, и состав нижней части, χ_B. Управляющими переменными, используемыми для управления или поддержания регулируемых переменных в их желаемом заданном значении, являются скорость обратного потока L и скорость кипения пара V. Неконтролируемыми возмущениями являются скорость подачи, F, и состав легких компонентов подачи χ_F.

Модель дистилляционной колонны, при L-V конфигурации с наличием внешних возмущений, может быть представлена системой с двумя входами и двумя выходами [4], и аддитивным возмущением, что соответствует двумерной системе управления:

$$\begin{vmatrix} \chi_D(s) \\ \chi_B(s) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} L(s) \\ V(s) \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} D_1(s) \\ D_2(s) \end{vmatrix} \cdot F(s), \qquad (1)$$

где $D_1(s), D_2(s)$ – параметры внешних возмущений, определяемые входным потоком колонны, $G_{11}(s), G_{22}(s)$– передаточные функции двух контуров регулирования:

$$G_{11}(s) = \frac{K_1}{T_1 s + 1} = \frac{0.0042}{1.9588s + 1}; \quad G_{22}(s) = \frac{K_2}{T_2 s + 1} = \frac{0.0072}{1.9588s + 1}. \qquad (2)$$

Так как в системе (1) в наличии аддитивные возмущения, то в качестве возмущения в схеме моделирования выбрано единичное ступенчатое воздействие. По результатам моделирования (рис. 1) очевидно его влияние на процесс.

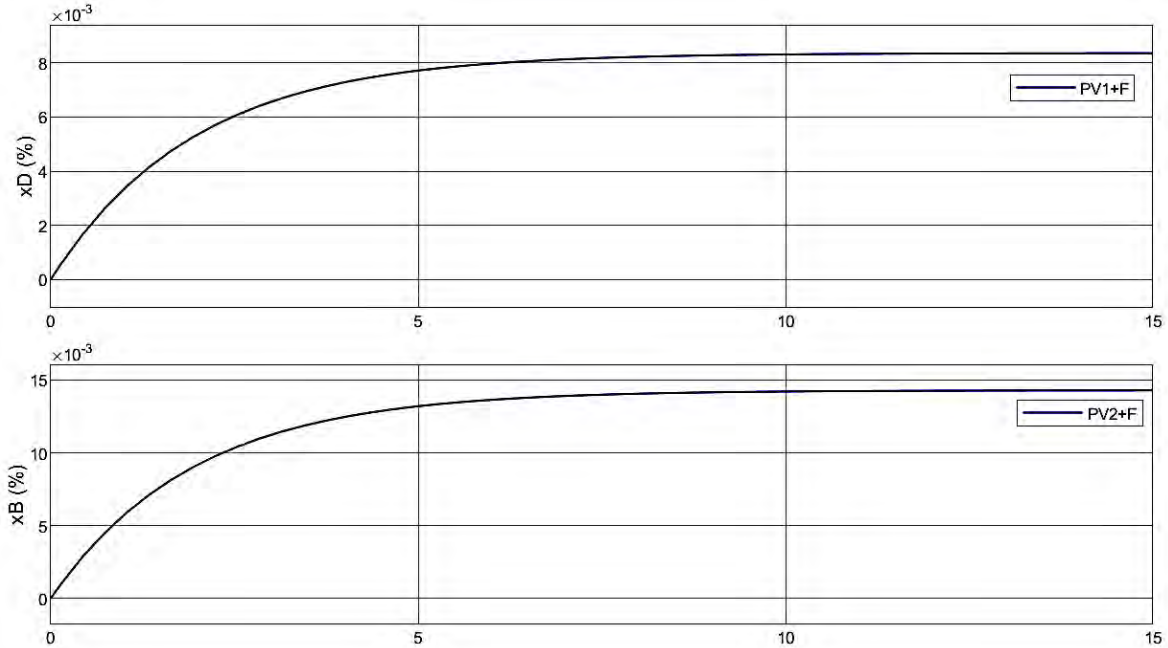


Рис. 1. Выходные сигналы объекта (1) с возмущениями.

Качество выпускаемых продуктов определяется чистотой дистиллята, χ_D, превышающей или равной 98%, и нижнего продукта, χ_B, менее/равной 2%. Разница между желаемыми сигналами χ_D, χ_B и текущими значениями выходных сигналов соответствует ошибке рассогласования, $E(t)$.

Для обеспечения качества продуктов, введем в рассмотрение интегральный квадратичный критерий качества

$$ISE = \int_{t=0}^{t_1} E^2(t)dt \quad \to \min, \tag{3}$$

минимум которого обеспечивается промышленным регулятором различной структуры: PID, I-PD, PI-D [5].

Для апробации алгоритма AIS на класс промышленных регуляторов, в данной работе рассмотрим задачу синтеза I-PD регулятора

$$u(t) = K_p \cdot K_s \cdot \left\{ y(t) + \frac{1}{T_I} E(t) + T_D \frac{dy(t)}{dt} \right\}, \tag{4}$$

где K_p – коэффициент усиления пропорциональной составляющей регулятора; K_s – коэффициент отношения разницы верхнего и нижнего предела управляющего сигнала $u(t)$ и разницы верхнего и нижнего предела текущего значения выходного сигнала $y(t)$; T_I – постоянная времени интегрирующей составляющей регулятора; T_D – постоянная времени дифференцирующей составляющей регулятора.

Критерий (3) является целевой функцией для оптимизации и в этом случае задача сводится к следующей: найти неизвестные параметры регуляторов, K_{P1}, T_{I1}, K_{P2}, T_{I2}, которые обеспечивают минимум критерию качества (3) на основе алгоритма AIS.

Для задачи синтеза I-PD регуляторов системы (1) используется квадратичный критерий качества (3), для которого вычисление квадратичной интегральной оценки осуществляем по формуле [6]

$$ISE_{I-PD} = \frac{\left(1 + K \cdot K_P\right)^2 + \left(T + K \cdot T_D\right) \cdot K \cdot \dfrac{1}{T_I}}{2 \cdot \left(1 + K \cdot K_P\right) \cdot K \cdot \dfrac{1}{T_I}} \to \min. \tag{5}$$

В ходе использования поисковых алгоритмов для нахождения минимума целевой функции (5) необходимо учитывать следующие ограничения:

– время моделирования и, соответственно, диапазон интегрирования, ограничены временем моделирования технологического процесса;

– параметры регулятора, как решения оптимизационной задачи, должны быть положительны, то есть $K_P > 0, \quad T_I > 0, \quad T_D > 0$;

– параметры регулятора должны соответствовать диапазонам значений, при которых отсутствует деление на ноль в критериях качества;

– диапазоны изменения параметров должны удовлетворять условиям устойчивости;

– ограниченное время моделирования.

В соответствии с вышеприведенными положениями, сформулируем постановку задачи.

Постановка задачи. Для контуров системы (2) необходимо синтезировать регуляторы, которые обеспечивают минимум критерию качества (5) на основе поисковых оптимизационных алгоритмов AIS.

2. Оценка эффективности модифицированного алгоритма AIS. В соответствии с постановкой задачи, сделанной в предыдущем разделе, процедура настройки регулятора дистилляционной колонны, в условиях воздействия внешних возмущений, может осуществляться на основе алгоритма AIS с блоком адаптации, характеризующимся свойством бипластичности, что является модификацией классического алгоритма клональной селекции CLONALG или CSA [5].

Решая задачи синтеза регуляторов с различной структурой, есть возможность сформировать блок выбора соответствующего иммунного алгоритма, в зависимости от постановки задачи в текущий момент функционирования процесса. Подобный блок реализуется в виде искусственной иммунной системы, AIS, с блоком адаптации. В этом случае, при воздействии внешних возмущений, есть возможность выбора определенной структуры регулятора, которая может обеспечить бесперебойную работу системы и желаемые режимы функционирования дистилляционной колонны.

В настоящее время, для решения различных задач оптимизации, разработаны различные модификации алгоритма клональной селекции. Например, алгоритм клонального отбора на основе иерархических мутаций (LMCSA), алгоритм клонального отбора с постоянной мутацией (FMCSA) [7], улучшенный алгоритм клональной селекции (ICLONALG) [8], алгоритм клональной селекции с операцией переменного соседства (ICSAVNS) [9], алгоритм клонального отбора с гипермутацией (HMCSA) [10], алгоритм клонального отбора с редактированием рецептора (RECSA) [11] и т.д. В основе данных модификаций лежат сформированные изменения в шагах алгоритма клональной селекции.

В ходе реализации алгоритма клональной селекции, с модификацией на основе двойной пластичности, проводится адаптация критерия качества под изменяющуюся структуру регулятора от I-PD к другим таким структурам, как PID и PI-D следующим образом. Критерии качества используются в теории искусственной иммунной системы в качестве антигенов:

$$Ag = f\big(E(t), u(t)\big). \tag{6}$$

Подмножество антигенов тождественно выражению, включающему параметры регуляторов:

$$Ag = f\left(K_P, \frac{1}{T_I}, T_D, u(t)\right). \tag{7}$$

При изменении структуры регулятора, в алгоритме производится адаптация критерия качества за счет настройки подмножества (7). В качестве начальной популяции в таком случае берутся значения параметров регуляторов, настроенные на предыдущей итерации.

Получим результаты применения алгоритма AIS для целевой функции (5), в случае системы управления процессами дистилляционной колонны (1). В этом случае критерий качества для I-P регуляторов, стоящих в двух контурах (2), имеют вид:

$$ISE_{I-P1} = \frac{\left(1 + 0.0042 \cdot K_{P1}\right)^2 + 1.9588 \cdot 0.0042 \cdot \dfrac{1}{T_{I1}}}{0.0084 \cdot \dfrac{1}{T_{I1}} + 2 \cdot 0.0042^2 \cdot K_{P1} \cdot \dfrac{1}{T_{I1}}} \to \min, \tag{8}$$

$$ISE_{I-P2} = \frac{\left(1 + 0.0072 \cdot K_{P2}\right)^2 + 1.9588 \cdot 0.0072 \cdot \dfrac{1}{T_{I2}}}{0.0144 \cdot \dfrac{1}{T_{I2}} + 2 \cdot 0.0072^2 \cdot K_{P2} \cdot \dfrac{1}{T_{I2}}} \to \min. \tag{9}$$

Для оптимизации критериев (8) и (9), в среде MATLAB реализованы шаги алгоритма AIS. При реализации алгоритма AIS формируется начальная популяция, которая представляет собой параметры регуляторов из диапазона допустимых значений, удовлетворяющего свойству устойчивости замкнутой системы и технической реализуемости. Затем производится полный цикл вычислений, на основе шагов поискового AIS.

Общие настройки алгоритма: *N*=100 – размер популяции; Ab=cadeia (n,44) – популяция антител; gen=50 – число генераций; pm=0,5 – вероятность мутации; *d*=0,3 – популяция, которая подвергается случайным перестановкам; beta=0,5 – множитель, контролирующий количество клонов.

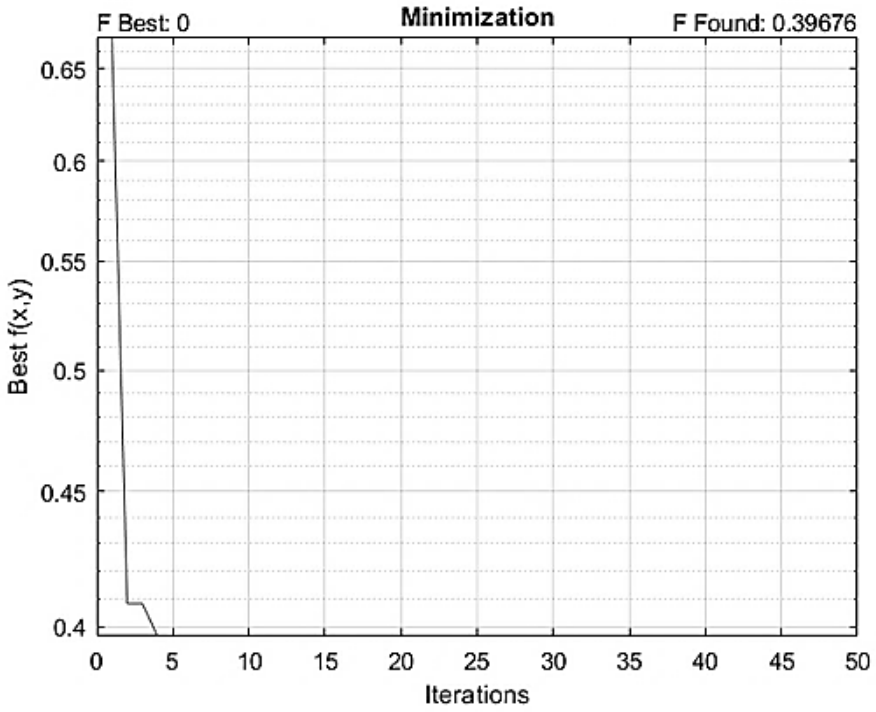
В ходе реализации алгоритмов в среде MATLAB, для первого контура и для второго контура, были получены:

– оценки эффективности применения алгоритма для минимизации критериев качества (рис. 2, а),

– параметры типовых регуляторов (4), как решение поставленной задачи (рис. 2, б).

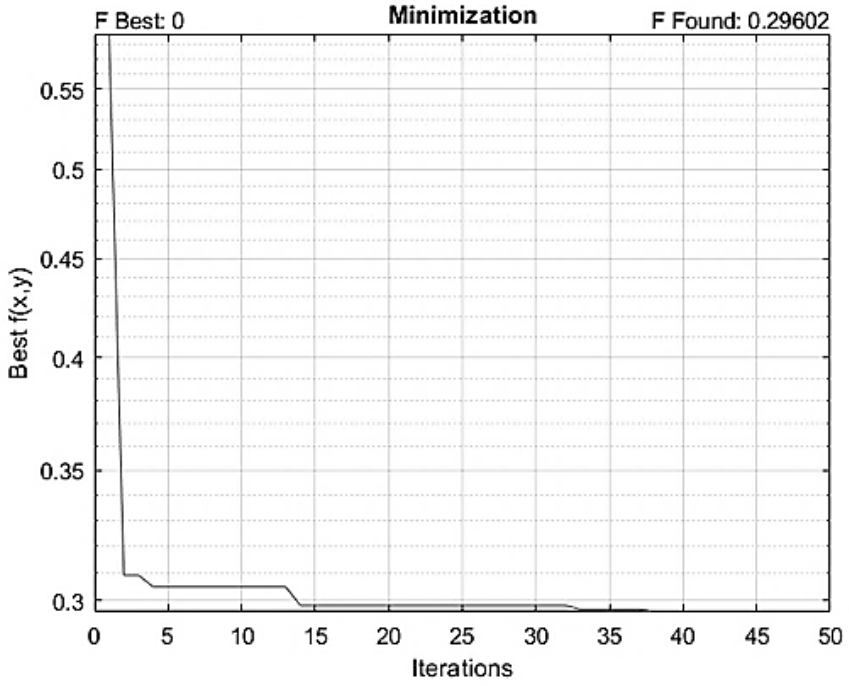
В ходе синтеза регуляторов, для исследования режима стабилизации дистилляционной колонны, были заданы желаемые сигналы чистоты дистиллята (в потоке Distillate равная 0,98), чистота продуктов с нижней части колонны (в потоке Bottoms равная 0,02).

```
x = 1.0753
y = 2.9957
fx = 0.3968
```



а)

```
x = 7
y = 2.9606
fx = 0.2960
```



б)

Рис. 2. Оценка работы алгоритма AIS для первого и второго контуров.

При учете внешних возмущений, были получены результаты моделирования двух контуров с заданными сигналами и случайными воздействиями, которые представлены на рис. 3.

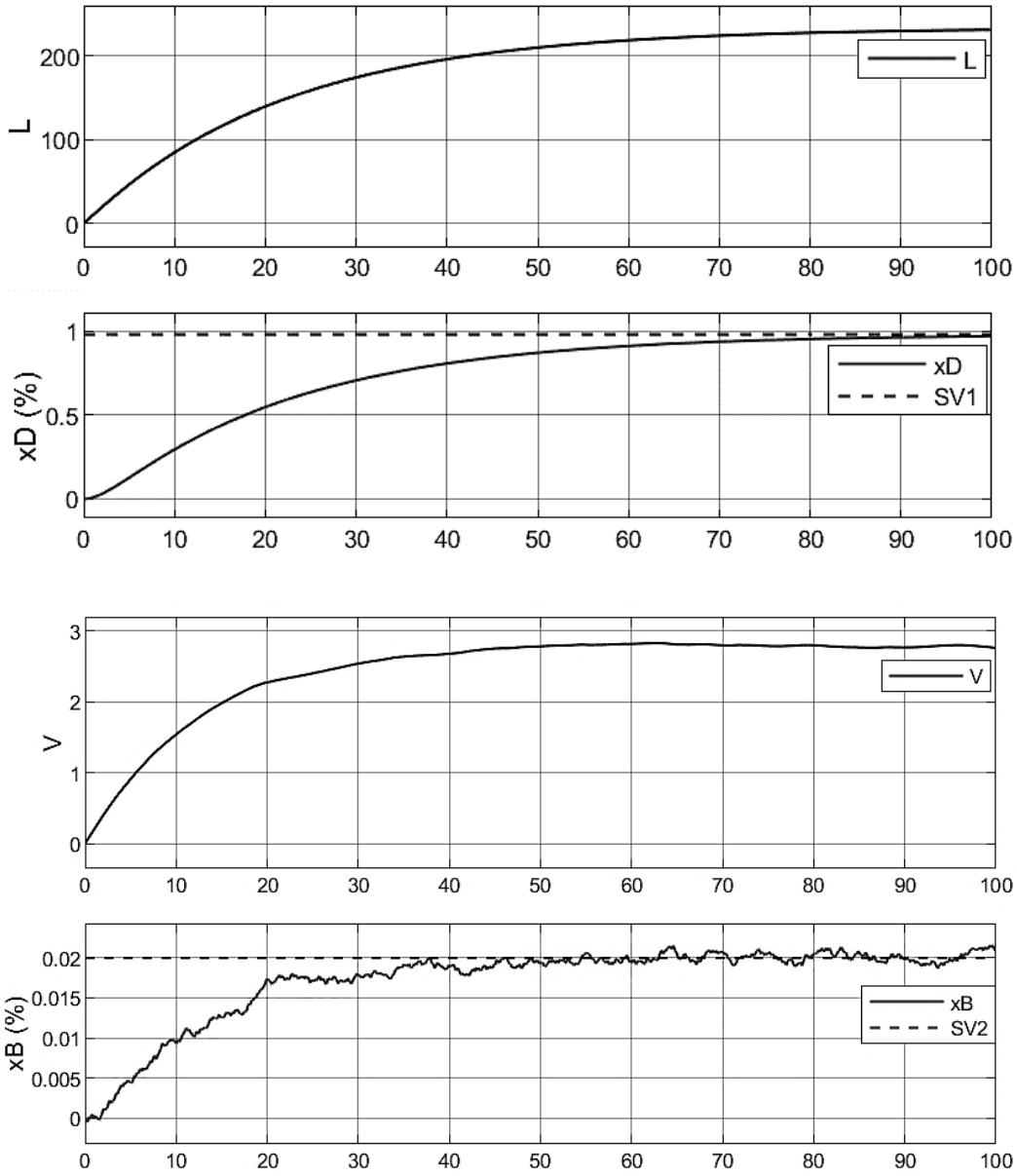


Рис. 3. Результаты моделирования двух контуров управления с заданными сигналами и случайными воздействиями.

Результаты моделирования двух контуров управления, с заданными сигналами и случайными воздействиями, отражают динамику приведения выходных процессов к желаемым режимам.

Заключение. В результате, можно сделать вывод, что была достигнута цель синтеза промышленных регуляторов для системы со случайными возмущениями на основе эффективных модифицированных алгоритмов AIS. Данное устройство включается в общую схему управления многомер-

ным и многосвязным объектом. Решена задача синтеза интеллектуального I-P регулятора для двухконтурной системы управления технологическим процессом очистки природного газа от различных примесей дистилляционной колонны.

Данное исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № AP09258508).

Литература

1. Koroteev, D. Artificial intelligence in oil and gas upstream: Trends, challenges, and scenarios for the future / D. Koroteev, Z. Tekic // Energy and AI. – 2021. – № 3. – 10 p.

2. Malik, H. Applications of Artificial Intelligence Techniques in Engineering. Advances in intelligent systems and computing / H. Malik // Springer Nature Singapore. – 2019. – Vol. 1. – 698 p.

3. Lee, J. Industrial Artificial Intelligence for industry 4.0-based manufacturing systems / J. Lee // Manufacturing Letters. – 2018. – Vol. 18. – P. 20-23.

4. Minh, V.T. Modeling and control of distillation column in a petroleum process / V.T. Minh, A.A Rani// Perak: Hindawi Publishing Corporation, Mathematical Problems in Engineering. – – 2009. – Vol. 2009. – 14 p.

5. Ширяева, О.И. Синтез системы управления с изменяющейся конфигурацией для дистилляционной колонны на основе AIS со структурной пластичностью / О.И. Ширяева // Проблемы автоматики и управления. – 2022. – № 3(45). – С. 5-14.

6. Solodovnikov, V.V. Theory of Automatic Control / V.V. Solodovnikov. – Moscow: Mashinostroenie, 1967. – Vol. 1. – 770 p.

7. Chittineni, S. Design of Fixed and Ladder Mutation Factor-Based Clonal Selection Algorithm for Solving Unimodal and Multimodal Functions / S. Chittineni, A.N. Pradeep, D. Godavarthi, S.C. Satapathy, S.M. Krishna, P. Reddy // Applied Computational Intelligence and Soft Computing. – 2011. – Vol. 2011. – 8 p.

8. Rai, N. Improved Clonal Selection Algorithm (ICLONALG) / N. Rai, A. Singh // International Journal of Current Engineering and Technology. – 2015. – Vol. 5. – No. 4 – 6p.

9. Liu, J. A novel hybrid immune clonal selection algorithm for the constrained corridor allocation problem / J. Liu, Z. Zhang, F. Chen, S. Liu // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2022. – Volume 33. – P. 953–972.

10. Rokicki, L. Optimization of the Configuration and Operating States of Hybrid AC/DC Low Voltage Microgrid Using a Clonal Selection Algorithm with a Modified Hypermutation Operator / L. Rokicki // Energies. – 2021. – Vol 14. – № 19. – P. 6351.

11. Gao S., Dai H., Yang G., Tang Z. A novel clonal selection algorithm and its application to travelling salesman problem // IEICE Trans. Fundamentals. – 2007. – Vol. E90-A. – P. 2318-2325.

БИОНИКА БУДУЩЕГО

УДК 57.089

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ГЕЙМИФИКАЦИИ В ПРОЦЕССЕ РЕАБИЛИТАЦИИ

Г.Р. Арзуманов,
МБОУ «Лицей № 4 имени профессора Е.А. Котенко»,
г. Ейск, Краснодарский край, Россия,
e-mail: georgy.arzumanov@icloud.com

Аннотация. *В статье приведено описание созданного устройства, позволяющего управлять устройствами, работающими на iOS (iPhone, iPad, AppleTV), силой мышц без непосредственного контакта. Подобное устройство позволяет привнести элементы геймификации в процесс реабилитации больных, превратить его в игру.*

Проведен анализ возможности использования электрических сигналов, производимых телом при напряжении мышц, для управления компьютерной игрой. С этой целью были применены эмпирические методы исследования (конструирование, моделирование, эксперимент). В результате создана компьютерная игра с человеко-машинным интерфейсом.

Кроме этого, проведен анализ возможных способов управления устройствами на iOS без физического контакта с человеком. Для анализа использовались теоретический метод исследования для выбора компонентов, из которых строился макет, а также эмпирические методы для проверки работоспособности макета и выявления его плюсов и минусов. В результате созданы макеты для управления с помощью физического воздействия на устройство, а также управляющие по протоколам Bluetooth. Также определены достоинства и недостатки каждого из макетов, проведено сравнение и выбран наиболее подходящий способ взаимодействия для созданного устройства.

Ключевые слова: *нейротехнологии, геймификация, реабилитация, биологически обратная связь, электромиограмма.*

USE OF NEUROTECHNOLOGIES FOR GAMIFICATION IN THE PROCESS OF PHYSICAL REHABILITATION TREATMENT

G.R. Arzumanov,
School-lyceum № 4 named after Professor E.A. Kotenko,
Yeysk, Krasnodar Krai, Russian Federation

Abstract. *The article provides a description of the created device that allows you to control iOS devices (iPhone, iPad, AppleTV) by muscle contractions without direct contact. Such a device will allow you to bring elements of gamification into the process of rehabilitation of patients by turning it into a game.*

Keywords: *neurotechnology, gamification, rehabilitation, biofeedback, electromyogram.*

Введение. Лежащий в основе данной работы метод биологической обратной связи (БОС) является одним из наиболее быстро развивающихся направлений современной медицины. Лидером данного направления являются США.

Основной отличительной особенностью данного метода является то, что в процессе реабилитации пациенту мгновенно и непрерывно предоставляется информация о физиологических показателях деятельности его организма.

Устройства, поддерживающие данный метод, можно классифицировать по различным параметрам управления: БОС по электромиограмме (ЭМГ-БОС); БОС по электроэнцефалограмме (ЭЭГ-БОС); БОС по частоте сердечных сокращений (ЧСС-БОС); БОС по кожно-гальванической реакции (КГР-БОС); БОС по температуре (ТЕМП-БОС) и др. Данная работа ограничивается только ЭМГ-БОС. Несмотря на это ограничение, полученное устройство может быть полезно для широкого круга пациентов (двигательные нарушения, головные боли, астмы, паркинсонизм, параличи, парезы, нарушение глотательных движений, лечение недержания мочи и кала, и т.д.).

Полученные результаты в дальнейшем могут использоваться и для других типов БОС.

Несмотря на то, что первые упоминания ЭМГ-БОС датируются 1920 годом (Эдмунд Джекобсон «Методика прогрессивной релаксации» [9]), данное направление не потеряло актуальности и сейчас.

Решения на основе подхода геймификации позволяют по-новому организовать взаимодействие с пациентом. Подход позволяет значительно повысить эффективность методов БОС за счет большей вовлеченности пациентов. Особенно это перспективно при лечении детей, которые воспринимают процесс лечения как игру.

Геймификация сегодня проникла во все сферы нашей жизни – магазины, банки, образование и активно используется в медицине.

Новизна проведенного исследования заключается в том, что в нем предложено совместить геймификацию с нейротехнологиями.

Целью исследования является анализ возможностей использования нейротехнологий для геймификации в процессе реабилитации.

1. Основные понятия. Геймификация – это использование игровых элементов и методов игрового дизайна в неигровом контексте. Неигровой контекст – это игра не ради игры, а ради того, чтобы достичь какой-то цели вне игры. Например, похудеть, научиться бегать, тренировать мышцы, похудеть, тренировать мышцы. Геймификация обеспечивает большую вовлеченность пользователей во всех сферах, где она применяется [4].

Электромиография – метод исследования биоэлектрических потенциалов, возникающих в скелетных мышцах человека и животных при возбуждении мышечных волокон. При возбуждении возникает разброс потенциалов.

Возбудимость – это способность генерировать электрические импульсы спонтанно или в ответ на действие раздражителя [5].

Свойством возбудимости обладает нервная, железистая, мышечная ткань. Клетки этих тканей могут переходить из состояния покоя в состояние возбудимости (рис. 1).

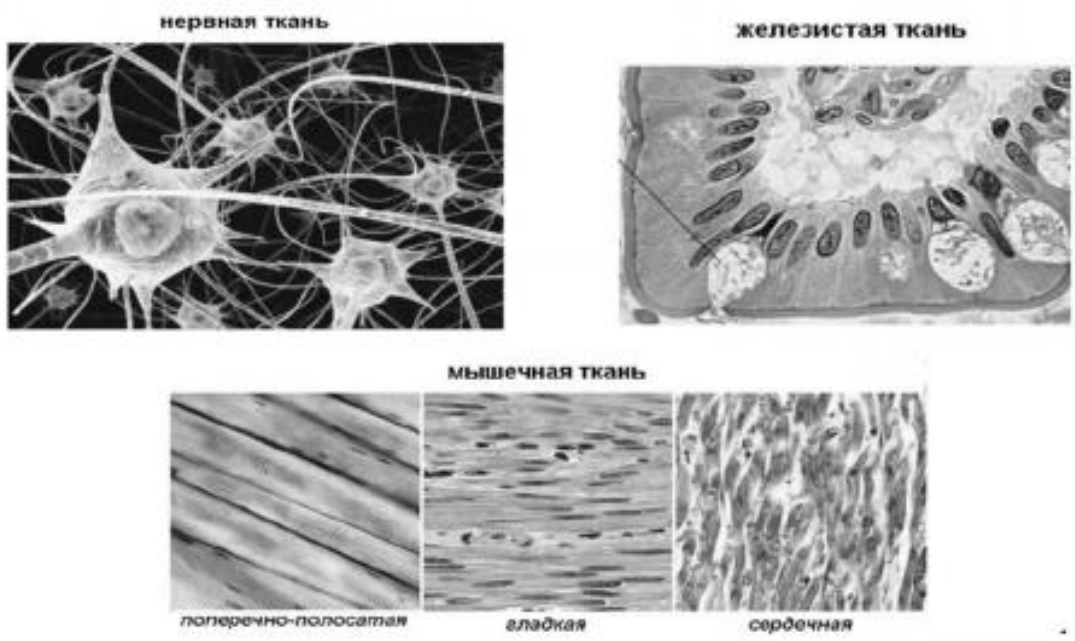


Рис. 1. Возбудимые ткани.

Мембранный потенциал – разность электрических потенциалов между растворами электролитов, разделенных проницаемой мембраной [6] (рис. 2).

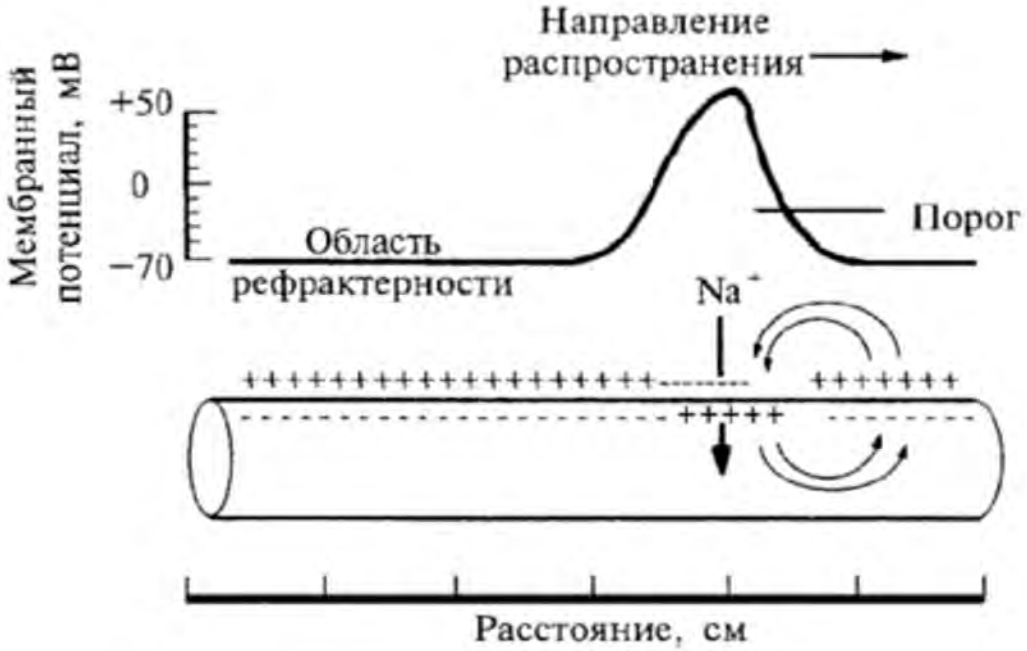


Рис. 2. Мембранный потенциал.

В емкостных сенсорных экранах необходимо эмулировать емкость, для нажатия. По углам экрана расположены электроды, которые подают постоянный слабый ток на панель. Также по краям находятся датчики, которые регистрируют утечки токов, если к экрану прикасается что-то с большей емкостью, чем сама сенсорная панель. Чем ближе к месту утечки датчик, тем больше ток утечки (рис. 3).

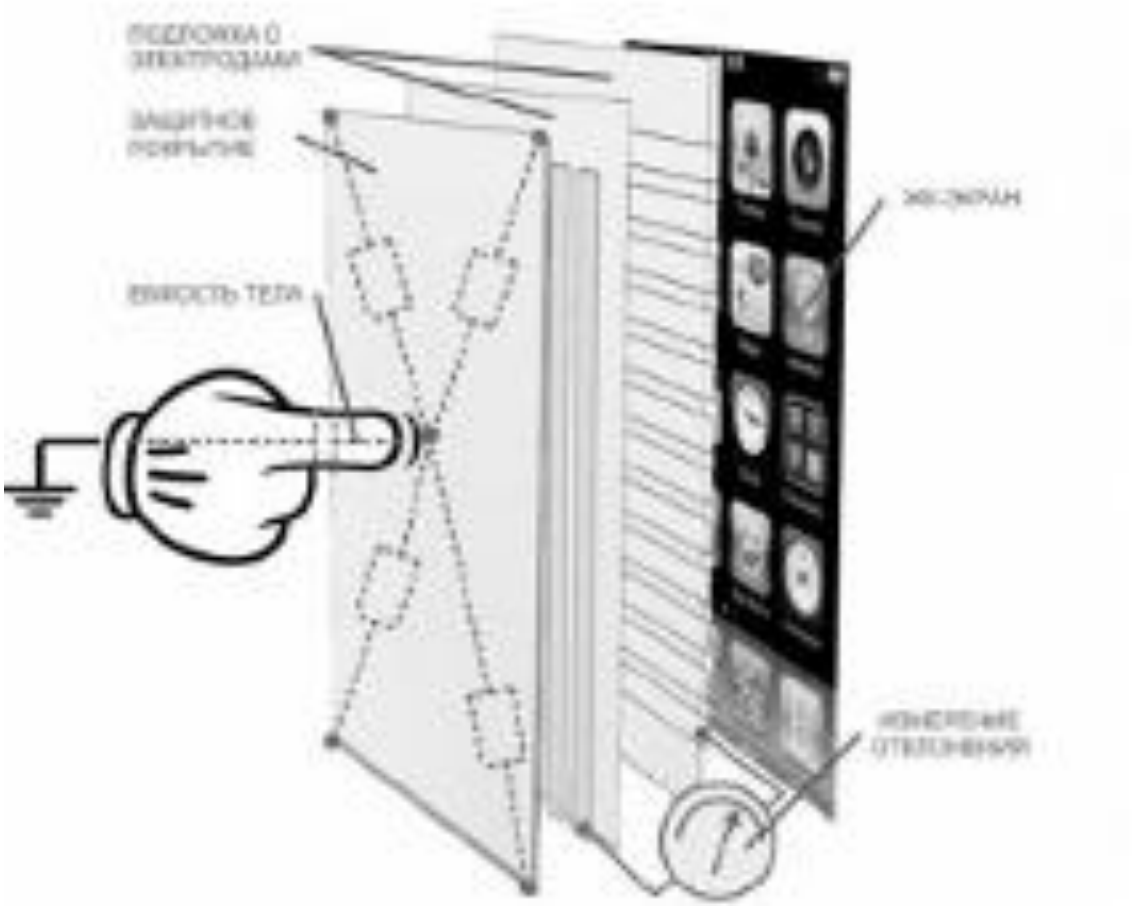


Рис. 3. Структура емкостного экрана [7].

2. Гипотезы. В рамках поставленной цели выдвигаются две гипотезы, для проверки которых определены следующие задачи.

Гипотеза I	Уровень развития и доступности современных нейротехнологий позволяют создать устройство для управления с помощью сигналов, порождаемых при сокращении мышц.
ЗАДАЧИ	- Разработать компьютерную игру с простым управлением. - Сконструировать устройство, реализующее управление разработанной игрой на основании мышечной активности. - На основании проведенного эксперимента дать заключение о применимости подобного устройства и сформулировать его ограничения.

Гипотеза II	Возможности для лиц с ограниченными возможностями, предоставляемые современными устройствами, позволяют реализовать устройство для управления с помощью сигналов, порождаемых при сокращении мышц.
ЗАДАЧИ	- На основании анализа определить возможные способы (не менее трех) передачи управляющих сигналов на устройства, работающие под управлением iOS. - Для каждого способа передачи сконструировать устройство, его реализующее. - Для каждого способа передачи на основании проведенного эксперимента дать заключение о применимости подобного подхода и сформулировать его плюсы и минусы. - На основании сравнения плюсов и минусов каждого из способов передачи управляющих сигналов, определить наиболее предпочтительный.

Для проверки гипотезы I разработана игра и сконструировано устройство, позволяющее управлять аватаром в игре с помощью импульсов, которые выдают мышцы при сокращении, получаемых с датчиков ЭМГ российского производства компании Bitronics. Устройством могут пользоваться даже дети. Для фиксации возбуждения мышечных волокон выбрана аппаратная платформа Arduino (рис. 4).

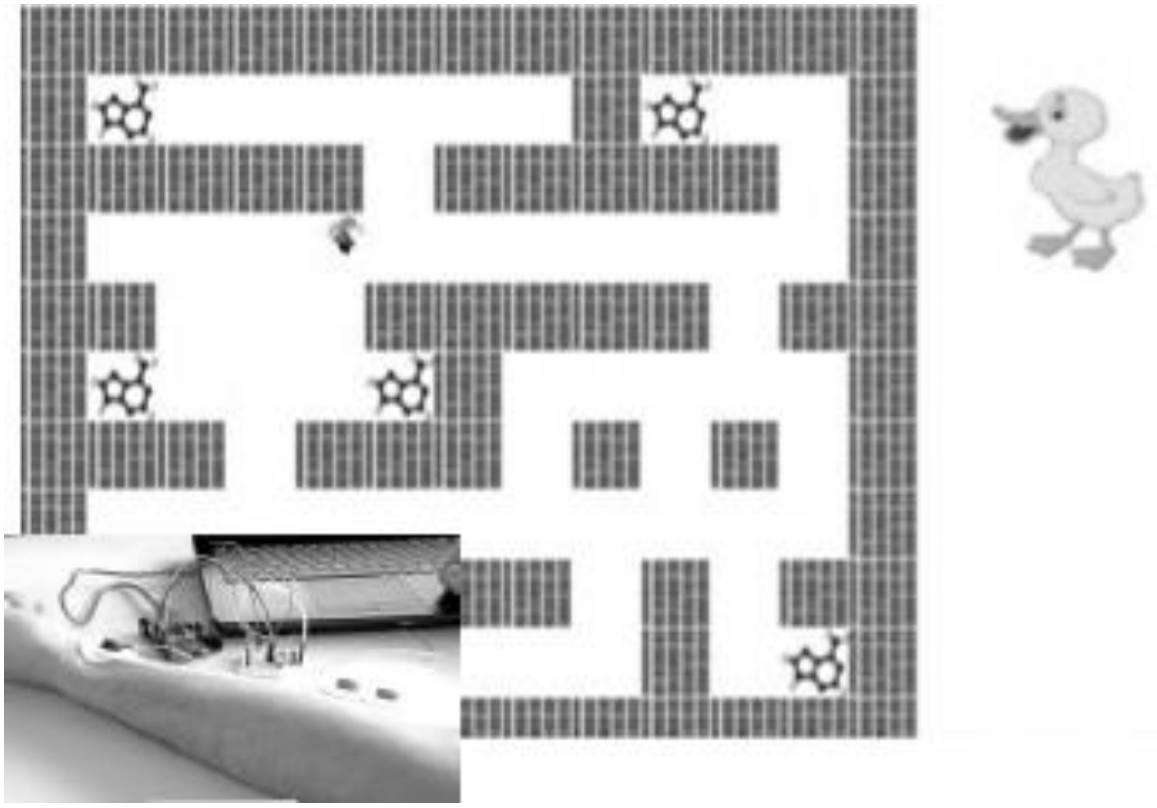


Рис. 4. Схема управления аватаром.

В ходе экспериментов определено, что полученное устройство работоспособно и им с интересом могут пользоваться и взрослые, и дети. Для управления аватаром сконструировано устройство, которое крепилось датчиками на руки игрока, и в зависимости от силы напряжения мышц аватар прыгал или двигался в соответствующую сторону. Использование нескольких пороговых значений наложило ограничения, усложнило процесс тренировки и управления. На этом основании этот режим был исключен из рассмотрения. Созданное устройство подтвердило гипотезу I.

Для проверки гипотезы II стало понятно, что нет смысла писать свою игру, а можно воспользоваться огромным разнообразием существующих игр. Для геймификации не обязательно разрабатывать специальные игры. Достаточно создать человеко-машинный интерфейс. Проверенные виды взаимодействия с устройствами iOS приведены на рис. 5.

Рис. 5. Виды взаимодействия, проверенные с устройствами iOS.

Первый и самый очевидный способ реализации передачи управляющего сигнала – это эмуляция нажатия на экран техническим устройством - автокликером. После изучения принципов работы сенсорных экранов было сконструировано устройство, эмулирующее физическое касание экрана пальцем человека (рис. 6).

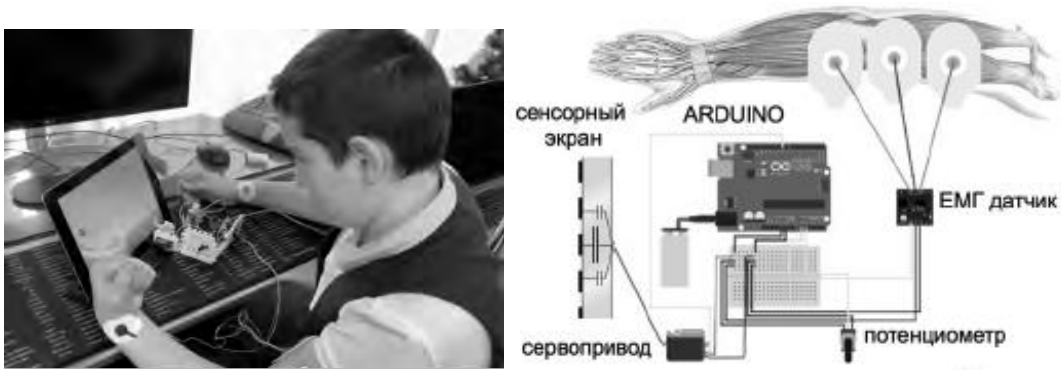


Рис. 6. Автокликер.

В ходе экспериментов по эксплуатации Автокликера выявлены следующие ограничения:

– большая задержка по времени при эмуляции нажатия;

– конструктивно устройство неразделимо с телефоном планшетом;

– устройство недолговечно, так как содержит трущиеся части.

Кроме этого, его нельзя использовать для работы с AppleTV, т.к. приставка не имеет экрана.

При изучении документации по реализации Switch Control (рис. 7) выявилось, что устройство должно эмулировать работу HID-keyboard, т.е. подключаться по протоколу BLE (Bluetooth low energy), использовать механизмы HID (Human Interface Devices). Анализ интернет-ресурсов производителей оборудования для платформы Arduino показал, что только один производитель заявляет поддержку этих протоколов и предоставляет необходимые библиотеки и примеры – это линейка устройств Bluefruit производителя Adafruit. Для проекта был выбран Adafruit Feather 32u4 Bluefruit.

На данной платформе создано устройство, которое фиксирует сокращение мышц с помощью датчика ЭМГ, аналогично первому устройству и передает определенную команду по протоколу BLE (рис. 8).

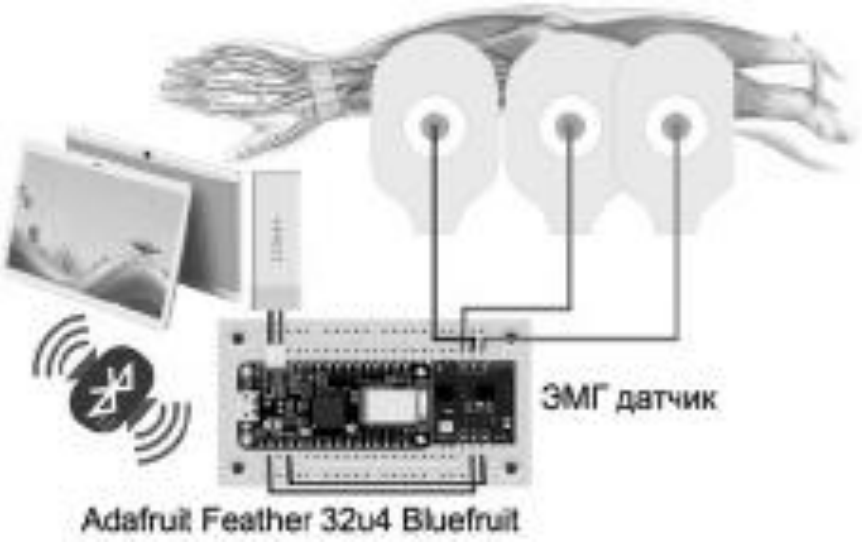


Рис. 7. Виртуальный контроллер (Switch Control).

В ходе экспериментов обнаружилось, что при использовании данного подхода отсутствует возможность управлять длительностью нажатия. Попытка обойти данное ограничение с помощью последовательности команд не помогла, поскольку между выполнением команд имеется пауза. Единственный выход – сделать несколько команд разной длительности в зависимости от силы сокращения мышцы. Также к минусам можно отнести наличие задержек между поступлением команды и ее выполнением. К плюсам можно отнести беспроводное взаимодействие и поддержку всех типов устройств, на которые ориентируется данная работа.

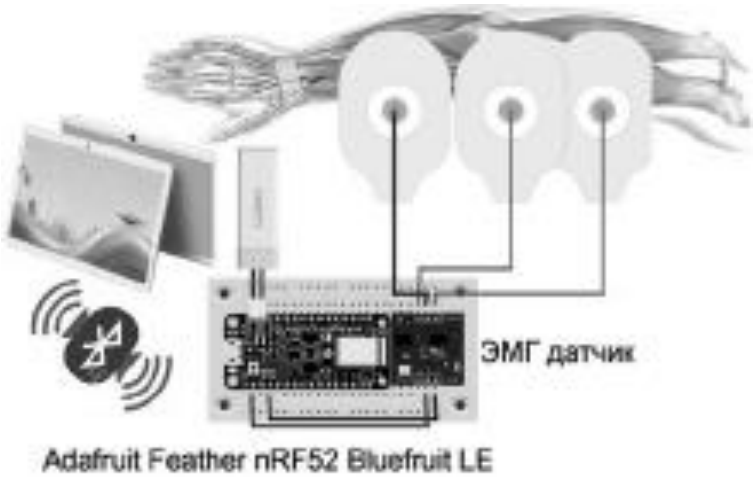


Рис. 8. Функция касание (AssistiveTouch).

Третье сконструированное устройство технологически идентично второму, только эмулирует HID-Mouse. К сожалению, в ходе экспериментов было выявлено, что реализация HID-Mouse на платформе Adafruit Feather 32u4 Bluefruit несовместима с iOS устройствами. Было принято решение провести эксперимент с Adafruit Feather nRF52 Bluefruit LE. Данная плата работает на чипсете nRF52 в отличие от Adafruit Feather 32u4 Bluefruit, которая работает на nRF51.

Созданное на этой платформе устройство оказалось совместимо со всеми устройствами, работающими на iOS, не имеет заметных задержек и может вызывать клики разной длительности, так как в реализации HID-Mouse есть разные команды для нажатия и отжатия кнопки мыши.

Созданное устройство, реализующее взаимодействие по протоколу BLE через функцию AssistiveTouch, оказалось совместимо со всеми устройствами, работающими на iOS, не имеет заметных задержек и может вызывать клики разной длительности. Данная схема взаимодействия идеально подходит для создания устройства (таблица 1).

Таблица 1. Сравнение способов взаимодействия с устройствами на iOS.

	Механическое взаимодействие Автокликер	Использование механизмов HID	
		Виртуальный контроллер Switch Control	Подключение через AssistiveTouch
Время реакции	-+	-	+
Удобство соединения с устройством iOS	-	+	+
Надежность соединения (трущиеся части)	-	+	+
Поддержка всех устройств iOS	-	+	+
Управление длительностью нажатия	+	-	+

Заключение. В ходе проведенного исследования проведен анализ возможностей использования нейротехнологий для геймификации в процессе реабилитации. Цель работы достигнута. Все выдвинутые гипотезы подтверждены. В ходе работы над задачами по проверке гипотез получены следующие результаты.

– Определен состав необходимых компонентов, библиотек, и создан программный код для реализации человеко-машинного интерфейса, работающего на основе обработки сигналов, порождаемых при сокращении мышц.

– Определен состав необходимых компонентов, библиотек, и создан программный код для реализации удаленного управления устройствами, работающими на iOS.

– Сконструирован макет устройства, комбинирующего элементы геймификации и современные нейротехнологии, который позволяет проводить процесс тренировки и реабилитации в игровой форме.

Видеоматериалы, демонстрирующие полученные в процессе работы над проектом результаты, а также создаваемые макеты можно посмотреть на youtube канале, посвященном проекту:

https://youtube.com/playlist?list=PLEiwsDJH8ELwnBXDH1YkK2WoRNsVOk2GM

Практическая значимость данного исследования заключается в том, что полученные результаты могут быть использованы при создании полноценного проекта для реабилитации.

Литература

1. Блум, Дж. Изучаем ARDUNO: инструменты и методы технического волшебства. 2-е изд. – Спб.:БХВ-Петербург, 2020. – 400 с.
2. Ярнольд, Ст. Arduino для начинающих. Самый простой пошаговый самоучитель. – М.: Эксмо-пресс, 2017. – 256 с.
3. Уроки Ардуино – учимся программировать Arduino. [Электронный ресурс]. – https://alexgyver.ru/arduino_lessons/
4. Геймификация [Электронный ресурс]. – https://trends.rbc.ru/trends/education/605c6f2f9a79473a61646994
5. Курс лекций по физиологии возбудимых тканей [Электронный ресурс]. – http://elibrary.sgu.ru/uch_lit/2405.pdf
6. Мембранный_потенциал [Электронный ресурс]. – https://science.fandom.com/ru/wiki/Мембранный_потенциал
7. Сенсорные экраны [Электронный ресурс]. – https://principraboty.ru/principraboty-sensornogo-ekrana
8. Коллективная монография под ред. Ю. Е. Шелепина и В. Н. Чихмана «НЕЙРОТЕХНОЛОГИИ» СПб.: Изд-во ВВМ, 2018. – 397 с.
9. Сборник статей «Общие вопросы применения метода БОС» – СПб.: ЗАО «Биосвязь», 2008. – 102 с.
10. Описание подключаемых устройств и работа с ними. [Электронный ресурс]. – http://amperka.ru
11. Что такое Figma и как ей пользоваться. [Электронный ресурс]. https://timeweb.com/ru/community/articles/chto-takoe-figma-i-kak-ey-polzovatsya
12. Википедия. [Электронный ресурс]. https://ru.wikipedia.org/wiki/Miro_(RealtimeBoard).
13. Википедия. [Электронный ресурс]. https://ru.wikipedia.org/wiki/Arduino_IDE
14. NeuroNode [Электронный ресурс]. System https://www.controlbionics.com

УДК 623.746.4-519

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТУРБИНА ДЛЯ МАЛЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В.И. Дубровин,
МОУ «Средняя образовательная школа № 82 им. Ф.И. Дубовицкого»,
г. Черноголовка, Московская область, Россия,
e-mail: foxy9855@gmail.com

Аннотация. *В настоящее время в различных сферах жизни все чаще применяются беспилотные летательные аппараты, и большинство из них стоят слишком дорого по причине отсутствия доступных и недорогих двигателей. Цель работы состоит в разработке и изготовлении прототипа многоступенчатого импеллерного двигателя с отклоняемым соплом для беспилотных летательных аппаратов.*
Ключевые слова: *беспилотный летательный аппарат, электрическая турбина импеллерный двигатель, аэродинамический анализ, прочностной анализ.*

ELECTRIC TURBINE FOR SMALL UNMANNED AERIAL VEHICLES

V.I. Dubrovin,
School No. 82 in the city of Chernogolovka,
Moscow region, Russian Federation

Abstract. *Currently, unmanned aerial vehicles are increasingly being used in various spheres of life and most of them are too expensive due to the lack of affordable and inexpensive engines. The aim of the work is to develop and manufacture a prototype of a multi-stage impeller motor with a deflected nozzle for unmanned aerial vehicles.*
Keywords: *unmanned aerial vehicle, electric turbine impeller motor, aerodynamic analysis, strength analysis.*

Был проведен поиск двигателей для беспилотных летательных аппаратов (БЛА) или их комплектующих для самостоятельного изготовления. Анализ показал, что существует достаточно большое количество двигателей, но большинство из них или дорогие, или слишком низкого качества и не отвечают современным требованиям. Таким образом, следует вывод, что на российском рынке отсутствуют недорогие двигатели для беспилотных летательных аппаратов.

На данный момент существует множество доступных для изготовления двигателей, но для разработки был выбран многоступенчатый импеллерный двигатель. Этот тип двигателей используется на большинстве БЛА, как некоммерческого, так и промышленного сегмента, обладая незначительной ценой относительно других видов двигателей. Импеллерный двигатель способен развивать высокую скорость и работать в различных условиях.

С помощью программных комплексов ASCON KOMPAS, SpaceClaim и FlowVision были разработаны основные модули и проведен аэродинамический и прочностной анализ подвижных компонентов, после чего был изготовлен прототип (рис. 1, 2).

Изготовлен прототип турбины, состоящий из корпуса, вала с крыльчатками, воздухозаборника и двигателя. Турбина обладает относительно высокой отказоустойчивостью и возможностью длительной работы на повышенных оборотах, требует только электрическую энергию для работы, что исключает необходимость распределения топлива в баках перед каждым полетом.

После изготовления движущихся компонентов методом 3D печати была проведена центровка деталей (рис. 3).

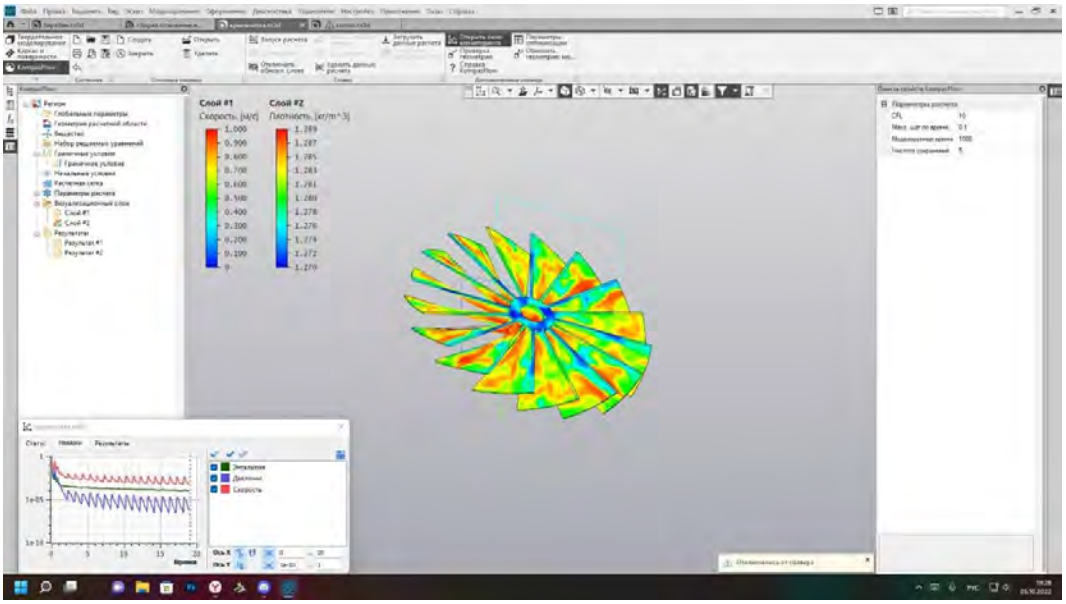


Рис. 1. Прочностной анализ крыльчатки.

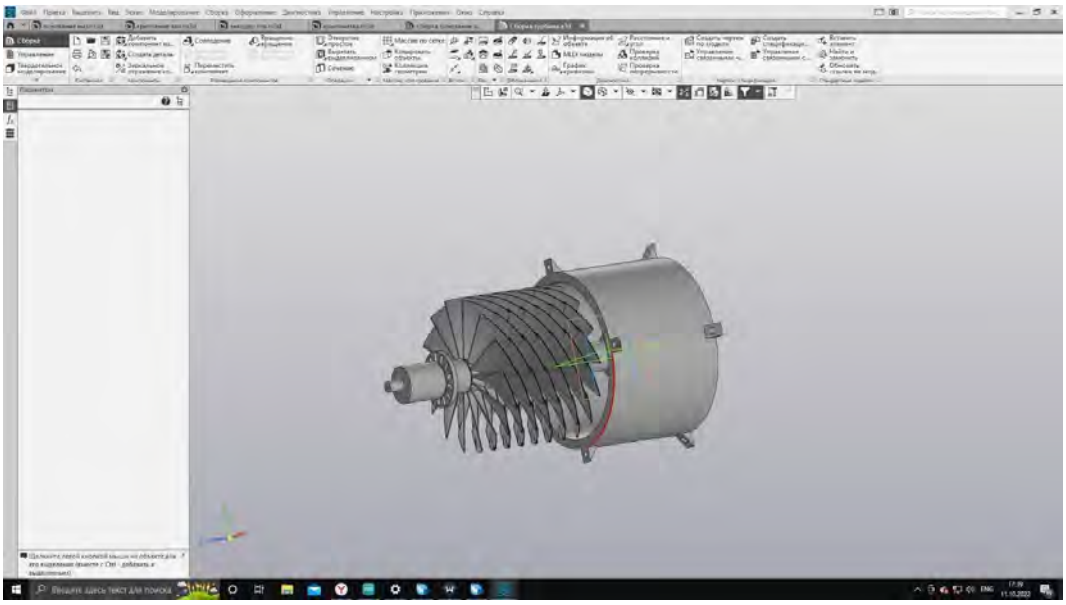


Рис. 2. Основание в сборе (3D модель).

Для управления частотой оборотов двигателя применяется высокоскоростной энкодер, диск которого был разработан специально для этой турбины, но первый вариант был изготовлен из прозрачного пластика, что сказалось на работоспособности – световой луч проходил через стенки диска, в результате чего система работала нестабильно (рис. 4).

Рис. 3. Процесс центровки пропеллеров.

Рис. 4. Изготовление энкодера.

Поскольку полностью собранный вал был слишком тяжелым и из-за высокой частоты оборотов двигателя прогибался, был применен высокоскоростной высокопрочный подшипник, для которого разработан узел крепления и самоцентровки. Планируется использовать систему магнитного центрирования вала для улучшения характеристик двигателя и возможности использования при высоких перегрузках (рис. 5).

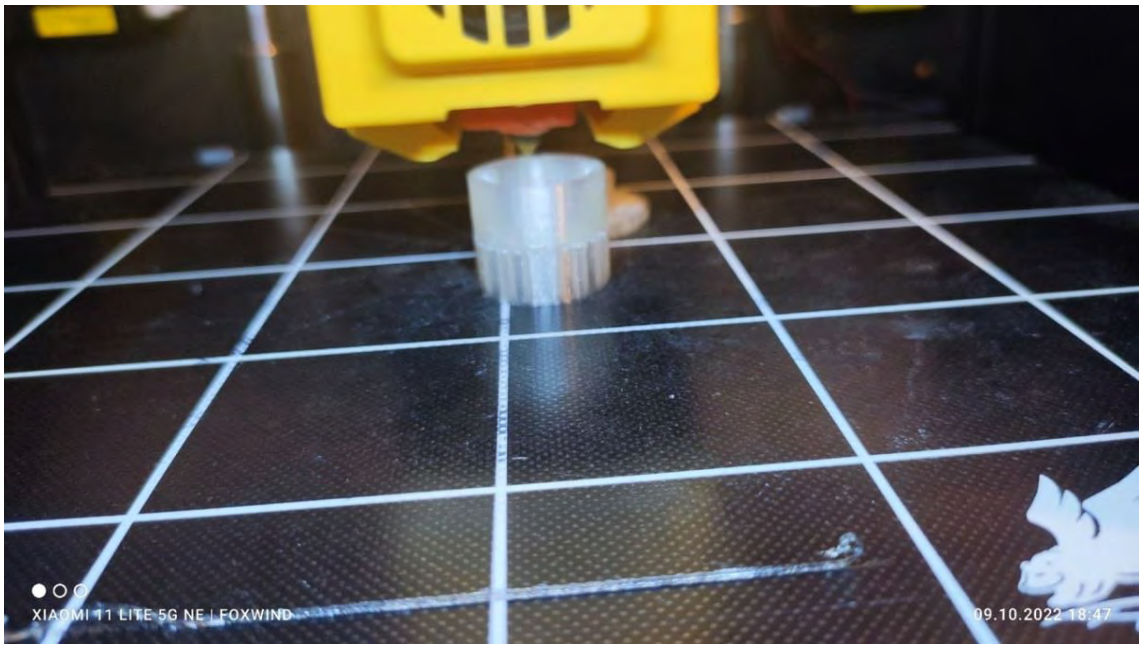


Рис. 5. Изготовление крепления подшипника.

После сборки двигателя была выполнена центровка вала относительно двигателя для уменьшения биения и вибраций. Центровка выполнена с помощью регулировочных винтов в основании воздухозаборника (рис. 6).

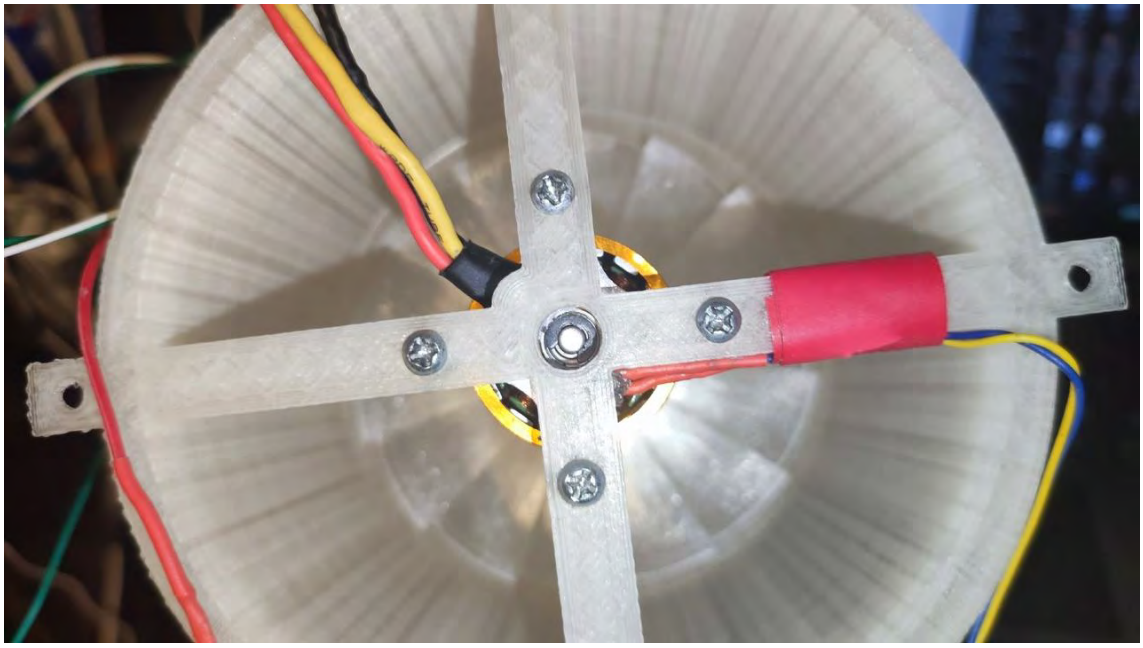


Рис. 6. Регулировочные винты в основании воздухозаборника.

Был также разработан фиксатор подшипника с креплением для датчика температуры (рис. 7).

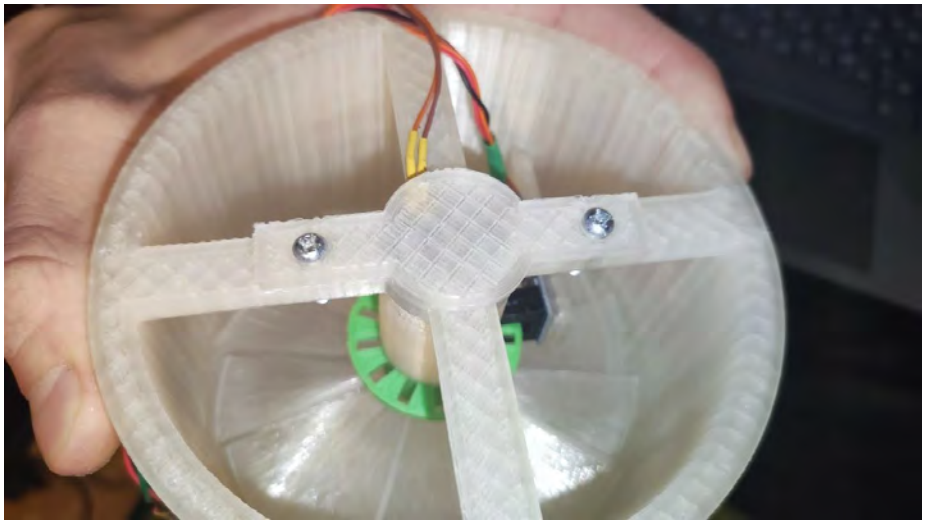


Рис. 7. Фиксатор подшипника.

После изготовления прототипа была начата разработка контроллера, в качестве процессора выступил микроконтроллер Atmega 328p (Рис. 8).

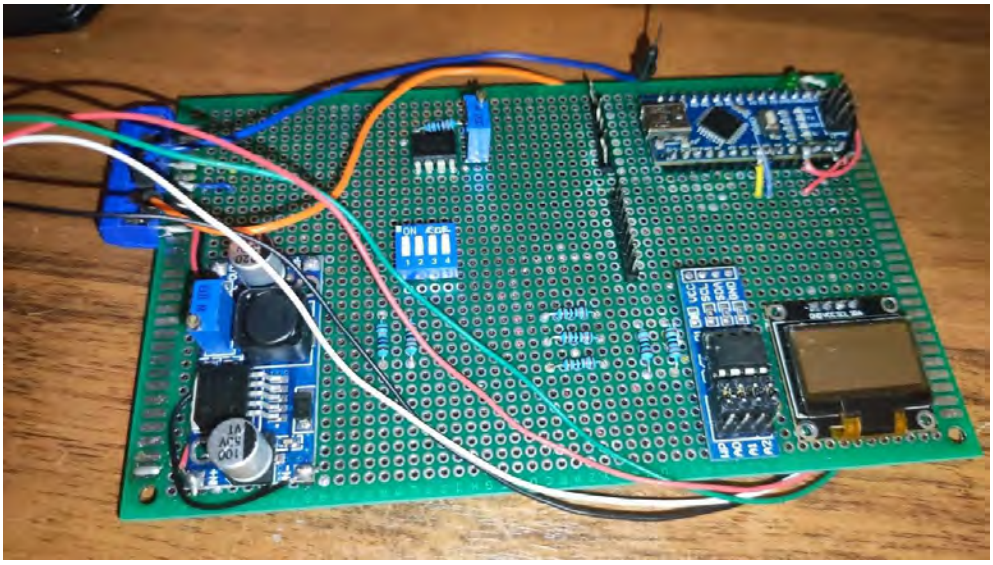


Рис. 8. Контроллер двигателя.

На макетной плате размещены стабилизатор питания, дисплей для отладки, модуль EEPROM для записи данных и контактная группа для подключения датчиков.

В настоящее время ведется разработка отклоняемого лепесткового сопла, с помощью которого можно достичь более высокой эффективности и маневренности БЛА.

Основные примененные операции изготовления: проектирование турбины и подготовка чертежей ее узлов, печать деталей (основание, воздухозаборники, крыльчатки и другие) и их монтаж, балансировка вала.

Для изготовления использовались следующие операции: FDM печать, шлифование, пайка и сверление. На изготовление двигателя потребовалось около 50 часов, из которых более 20 часов приходится на печать составных частей турбины.

Двигатель разработан с учетом возможности масштабирования, что снижает трудозатраты на разработку реального прототипа.

Себестоимость изготовления макета составила около 2400 рублей, из них на пластик приходится 540 рублей. Наибольшей стоимостью обладает контроллер бесщеточного двигателя, выдерживающего необходимые токи.

Литература

1. Фалалеев, С.В. Современные проблемы создания двигателей летательных аппаратов [Электронный ресурс]: Самара. 2012. Ссылка: https://vk.com/wall-45775860_2602
2. Павлов, Ю.И. и др. Проектирование испытательных стендов для авиационных двигателей / Ю.И. Павлов. Ю.Я. Шайн, Б.И. Абрамов. – М.: Машиностроение. 1979. – 152 с. Ссылка: https://vk.com/wall-45775860_2612
3. Когге, Ю.К. Майский, Р.А. Основы надежности авиационной техники: Учебник для студентов авиационных техникумов. – М: Машиностроение, 1993. – 176 с: Ссылка: https://vk.com/wall-45775860_2656
4. Старцев, Н.И., Фалалеев, С.В. Конструкция углов авиационных двигателей: компрессор: электронный курс лекций / Н.И. Старцев. С.В. Фалалеев. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм, ун-та, 2006. –112 с. Ссылка: https://vk.com/wall-45775860_2713
5. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия / под общ. ред. Е.Н. Каблова. – 2-е изд. – М.: Наука, 2006. – 632 с. Ссылка: https://vk.com/wall-45775860_2797
6. Колодочник, В.П. Воздушно-реактивные двигатели сверхзвуковых многорежимных самолетов. – М.: «Машиностроение». – 132 с.
Ссылка: https://vk.com/wall-45775860_2982
7. Проектирование авиационных газотурбинных двигателей: Учебник для вузов / Под ред. профессора А.М. Ахмедзянова. – Москва: Машиностроение, 2000. – 454 с. Ссылка: https://vk.com/wall-45775860_3052

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Бабомурадов Озод Жураевич	–	Executive Director of the Branch of Kazan Federal University in the city of Jizzakh, bobomujradov@gmail.com
Бринзей Николай	–	Associate professor, PhD, Research Center for Automatic Control of Nancy, CRAN University of Lorraine, nicolae.brinzei@univ-lorraine.fr
Арзуманов Георгий Романович	–	ученик 8 класса МБОУ Лицей № 4 имени профессора Е.А. Котенко г. Ейск, Ейский район, Краснодарский край, georgy.arzumanov@icloud.com
Асатов Тимур Нурмухамматович	–	Head of the Department of Affairs of the Branch of the Kazan Federal University in the city of Jizzakh, astim_n@mail.ru
Бабицкий Леонид Федорович	–	доктор технических наук, профессор кафедры технических систем в агробизнесе КФУ им. В.И. Вернадского, kaf-meh@rambler.ru
Бурцев Михаил Сергеевич	–	кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией нейронных систем и глубокого обучения МФТИ, burtsev.m@gmail.com
Бушуев Николай Николаевич	–	кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии и промышленной безопасности МГТУ им. Н.Э. Баумана, bnn@bmstu.ru
Бушуева Валентина Викторовна	–	кандидат философских наук, доцент кафедры философии МГТУ им. Н.Э. Баумана, vvb@bmstu.ru
Буянкин Виктор Михайлович	–	кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электроники МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, Viktor-Buyankin@yandex.ru
Гапанюк Юрий Евгеньевич	–	кандидат технических наук, доцент кафедры систем обработки информации и управления МГТУ им. Н.Э. Баумана, gapyu@bmstu.ru

Дубровин Владислав Иванович	–	школьник 10-го класса МОУ «СОШ № 82 им. Ф.И. Дубовицкого», г. Черноголовка, Московская область
Каганов Юрий Тихонович	–	кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической информации и компьютерных технологий МГТУ им. Н.Э. Баумана, yurijkaganov@gmail.com
Кан Лян	–	доктор наук, ассоциированный профессор Шанхайского политехнического университета, Китай, kangliang@sspu.edu.cn
Карпенко Анатолий Павлович	–	доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой систем автоматизированного проектирования МГТУ им. Н.Э. Баумана, apkarpenko@mail.ru
Кахаров Шукрулло Садуллаевич	–	кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИИ развития цифровых технологий и искусственного интеллекта, г. Ташкент, Республика Узбекистан, sh.kaxarov93@gmail.com
Козлов Дмитрий Юрьевич	–	кандидат искусствоведения, ведущий научный сотрудник НИИТИАГ – филиала ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России», kozlov.dmitri@gmail.com
Котин Владимир Владимирович	–	кандидат физико-математических наук, доцент кафедры медико-технических информационных технологий МГТУ им. Н.Э. Баумана, v.kotin@gmail.com
Кузьмина Маргарита Георгиевна	–	кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН, mg.kuzmina@gmail.com
Лысенко Анастасия Владимировна	–	студентка магистратуры кафедры теоретической информации и компьютерных технологий МГТУ им. Н.Э. Баумана, lysenkoanastasia09@gmail.com
Маилов Сергей Арменакович	–	кандидат архитектуры, старший научный сотрудник НИИТИАГ, филиал ФГБУ ЦНИИП Минстроя России, s_mailov@mail.ru

Малинецкий Георгий Геннадьевич	–	доктор физико-математических наук, заведующий отделом математического моделирования нелинейных процессов ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, gmalin@keldysh.ru
Матчонов Шахрух Мухаммаддиерович	–	Secretary of the council Branch of Kazan Federal University in the city of Jizzakh, shohruhmatchonov@gmail.com
Мирзаев Номаз Мирзаевич	–	доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник НИИ развития цифровых технологий и искусственного интеллекта, г. Ташкент, Республика Узбекистан, nomaz.mirza@rambler.ru
Москалевич Вадим Юрьевич	–	кандидат технических наук, доцент кафедры технических систем в агробизнесе КФУ им. В.И. Вернадского, v_moskalevich@mail.ru
Никольский Антон Анатольеивич	–	кандидат технических наук, доцент кафедры экономики и менеджмента РГУ им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), nikae@mail.ru
Никольский Анатолий Евгеньевич	–	кандидат технических наук, доцент кафедры цифровых технологий и кибербезопасности МГГЭУ, nikae1936@yandex.ru
Никольский Тимофей Евгеньевич	–	студент МГТУ им. Н.Э. Баумана, timkratos956@gmail.com
Оселедчик Михаил Борисович	–	доктор философских наук, профессор кафедры философии МГТУ им. Н.Э. Баумана, Balu13@yandex.ru
Подопросветов Алексей Валерьевич	–	научный сотрудник Института прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН, llecxis@gmail.com
Редько Владимир Георгиевич	–	доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник НИИ системных исследований РАН, vgredko@gmail.com

Рябчикова Наталия Афанасьевна	–	доктор биологических наук, руководитель отдела научных исследований Сколково, старший научный сотрудник МГУ им. М.В.Ломоносова (2019г.), nat@guesstest.ru
Самигулин Тимур Ильдусович	–	PhD, ассистент профессора, Институт информационных и вычислительных технологий МОН РК, г. Алматы, Казахстан, timur.samigulin@yandex.kz
Сапрыкина Наталия Алексеевна	–	член-корреспондент РААСН, доктор архитектуры, профессор, заведующая кафедрой основ архитектурного проектирования МАРХИ (государственной академии), заслуженный архитектор РФ, nas@markhi.ru
Серова Мария Николаевна	–	студентка МГТУ им. Н.Э. Баумана, serovamn@student.bmstu.ru
Синицын Игорь Николаевич	–	доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ФИЦ ИУ РАН, профессор каф. № 802 МАИ sinitsin@dol.ru
Скобцов Юрий Александрович	–	доктор технических наук, профессор кафедры компьютерных технологий и программной инженерии ГУАП, ya_skobtsov@list.ru
Смолин Владимир Сергеевич	–	научный сотрудник сектора робототехники Института прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН, smolin@keldysh.ru
Строганов Юрий Владимирович	–	старший преподаватель кафедры программного обеспечения ЭВМ и информационных технологий МГТУ им. Н.Э. Баумана, stroganovyv@bmstu.ru
Тарасова Александра Дмитриевна	–	студентка магистратуры кафедры теоретической информатики и компьютерных технологий МГТУ им. Н.Э. Баумана, atarasova413@yandex.ru
Титов Юрий Павлович	–	кандидат технических наук, научный сотрудник ФИЦ ИУ РАН, доцент каф. №304 МАИ kalengul@mail.ru

Утепбергенов
Ирбулат Туремуратович – доктор технических наук, профессор, Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, Республика Казахстан, i.utepbergenov@aues.kz

Фазылов
Шавкат Хайруллаевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник НИИ развития цифровых технологий и искусственного интеллекта, г. Ташкент, Республика Узбекистан, sh.fazilov@mail.ru

Фетцов
Всеволод Игоревич – докторант, Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, Республика Казахстан, v.fettsov@aues.kz

Ширяева
Ольга Ивановна – доктор технических наук, ассоциированный профессор, Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, г. Алматы, Республика Казахстан, oshiryayeva@gmail.com

Шлыгин
Виктор Викторович – кандидат физико-математических наук, научный консультант, Институт проблем информатики РАН, vvshly@jandex.ru

СОДЕРЖАНИЕ

стр.

Предисловие…….. 3

Пленарные доклады……. 5

Г.Г. Малинецкий,
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН
Экобионика – ключ к прогнозу динамики техносферы,
систем вооружения, научного пространства…….. 5

В.Г. Редько,
НИИ системных исследований РАН,
М.С. Бурцев,
МФТИ
Эффекты взаимодействия между обучением и эволюцией
при формировании функциональных систем…….. 24

Н.А. Сапрыкина
МАРХИ (государственная академия)
Приемы корректировки нестабильности физической
окружающей среды на основе бионических подходов……... 31

Теоретическая бионика…… 43

А.П. Карпенко,
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Бионические подходы к синтезу алгоритмов оптимизации…… 43

А.А. Никольский,
РГУ им. А.Н. Косыгина,
А.Е. Никольский,
МГГЭУ,
Т.Е. Никольский,
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Модель интеллектуальной цифровой платформы «умной»
биологической жизни растений, животного мира, человека……. 52

М.Б. Оселедчик,
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Знание как бионический концепт……. 65

Ю.А. Скобцов,
ГУАП
Биоэвристики и параллелизм…… 73

стр.

В.В. Шлыгин,
Институт проблем информатики РАН
Моделирование решения некоторых задач биохимии…… 85

Протобионика…… 89

Н.А. Рябчикова,
Инновационный центр «Сколково»,
МГУ им. М.В. Ломоносова
Особенности пространственно-временной синхронизации биопотенциалов головного мозга в прогностической деятельности человека…… 89

М.Н. Серова, Ю.В. Строганов,
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Задача факторизации движений пальцев кисти руки……. 99

Экобионика…… 107

Л.Ф. Бабицкий, В.Ю. Москалевич,
КФУ им. В.И. Вернадского
Основы энергетического подхода в бионической системе земледельческой механики и механике грунтов……. 107

Н.Н. Бушуев,
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Перспективы использования экобионических подходов в агроценозах и городских экосистемах……... 118

С.А. Маилов,
НИИТИАГ филиал ФГБУ ЦНИИП Минстроя России
Особенности архитектурной бионики Ю.С. Лебедева…… 127

Гуманитарная бионика…… 133

В.В. Бушуева, Н.Н. Бушуев,
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Основные методологические принципы технического творчества и их значение в бионике…… 133

В.С. Смолин,
ФИЦ ИПМ им. М.В. Келдыша РАН
Бионические пути к формированию сбалансированного конкурентного пространства устойчивого развития мира…… 139

стр.

Техническая бионика…….. 151

О.Ж. Бабомурадов, Т.Н. Асатов, Ш.М. Матчонов,
Филиал Казанского федерального университета в городе Джизаке
Роль BI-систем в управлении малым и средним бизнесом…… 151

В.М. Буянкин,
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Метод подчиненно-нейронного управления цифровыми
следящими приводами…… 161

Кан Лян,
Шанхайский политехнический университет (SSPU),
А.П. Карпенко,
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Квантово-генетический алгоритм глобальной оптимизации……. 170

Д.Ю. Козлов,
НИИТИАГ филиал ФГБУ ЦНИИП Минстроя России
Адаптивные каркасные конструкции ассиметричных
многофокусных оболочек…….. 182

В.В. Котин,
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Сложные сети в моделях эпидемий…….. 193

М.Г. Кузьмина, А.В. Подопросветов,
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,
Ю.Е. Гапанюк, Ю.Т. Каганов,
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Бионический подход к построению систем обработки
гиперспектральных изображений……. 204

А.В. Лысенко,
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Автоматизированная система распознавания объектов
при недостатке обучающих данных……. 213

И.Н. Синицын, Ю.П. Титов,
МАИ (НИУ), ФИЦ ИУ РАН
Применение метода муравьиных колоний для оптимизации
порядка следования гиперпараметров вычислительного кластера….. 222

стр.

А.Д. Тарасова, Ю.Т. Каганов,
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Моделирование «искусственной жизни» на основе
многоагентного подхода и обучения с подкреплением…….. 231

И.Т. Утепбергенов, В.И. Фетцов,
Алматинский университет энергетики и связи
имени Гумарбека Даукеева,
Н. Бринзей,
Кранский университет Лотарингии, Франция
Обеспечение надежности логики приема-передачи сигналов
при производстве радиофармпрепарата…… 238

Ш.Х. Фазылов, Н.М. Мирзаев, Ш.С. Кахаров,
НИИ развития цифровых технологий и искусственного интеллекта
Локальный классификатор покомпонентного распознавания лица….. 246

О.И. Ширяева, Т.И. Самигулин,
Казахский национальный исследовательский технический
университет имени К.И. Сатпаева,
Институт информационных и вычислительных технологий МОН РК
Оценка эффективности оптимизационных модифицированных
алгоритмов искусственных иммунных систем…… 252

Бионика будущего…… 261

Г.Р. Арзуманов,
МБОУ «Лицей № 4 имени профессора Е.А. Котенко»,
г. Ейск, Краснодарский край
Использование нейротехнологий для геймификации
в процессе реабилитации…… 261

В.И. Дубровин,
МОУ «Средняя образовательная школа № 82 им. Ф.И. Дубовицкого»,
г. Черноголовка, Московская область
Электрическая турбина для малых беспилотных 270
летательных аппаратов……..

Сведения об авторах…… 276

Научное издание

Бионика – 2022

Сборник статей Второй Международной научно-практической конференции

23-24 декабря 2022 года, г. Москва

Под редакцией А.П. Карпенко

Ответственный за выпуск: В.К. Балтян

Допечатная подготовка: В.А. Гарцев, А.С. Друкаренко, А.С. Петраков

Секция «Бионика» Научного совета РАН
по методологии искусственного интеллекта и когнитивных исследований

Дирекция Ассоциации технических университетов

Межотраслевой учебно-научный центр
технологического развития и евразийской интеграции
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Подписано в печать 19.06.2023.
Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 19,43
Уч.-изд. л. 16,53. Тираж 150 экз.

Отпечатано в типографии ООО «Белый Ветер»
115054, Москва, ул. Щипок, д. 28, тел. (495) 651-84-56
wwprint.ru

Для заметок