

ISSN 0869-6632 (print) ISSN 2542-1905 (online)

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

# Трикладная нелинейная динамика



*Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях*

ИЗДАНИЕ САРАТОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

## ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

*Ю. В. Гуляев*, д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, Институт радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, Москва

## ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

*И. В. Сысоев*, д.ф.-м.н., профессор СГУ имени Н. Г. Чернышевского

*А. Н. Чумаченко*, д. геогр. н., профессор, СГУ имени Н. Г. Чернышевского

## ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

*В. М. Аникин*, д.ф.-м.н., профессор, СГУ имени Н. Г. Чернышевского

*Б. П. Безручко*, д.ф.-м.н., профессор, СГУ имени Н. Г. Чернышевского

*С. В. Гонченко*, д.ф.-м.н., профессор, ННГУ имени Н. И. Лобачевского

*Н. С. Гинзбург*, д.ф.-м.н., профессор, член-корреспондент РАН, Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

*А. С. Дмитриев*, д.ф.-м.н., профессор, Институт радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, Москва

*С. А. Кащенко*, д.ф.-м.н., профессор, ЯрГУ имени П. Г. Демидова

*П. С. Ланда*, д.ф.-м.н., профессор, МГУ имени М. В. Ломоносова

*Г. Г. Малинецкий*, д.ф.-м.н., профессор, Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН, Москва

*В. В. Матросов*, д.ф.-м.н., профессор, ННГУ имени Н. И. Лобачевского

*В. И. Некоркин*, д.ф.-м.н., профессор, Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

*А. В. Порубов*, д.ф.-м.н., Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

*Ю. М. Романовский*, д.ф.-м.н., профессор, МГУ имени М. В. Ломоносова

*В. В. Тучин*, д.ф.-м.н., профессор, член-корреспондент РАН, СГУ имени Н. Г. Чернышевского

*А. М. Фейгин*, д.ф.-м.н., профессор, Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

*В. А. Царёв*, д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю. А., Саратов

*М. В. Шитикова*, д.ф.-м.н., профессор, Воронежский государственный технический университет

*В. Г. Яхно*, д.ф.-м.н., профессор, Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

*S. Boccaletti*, Ph.D. in Physics, Senior Researcher of Institute for Complex Systems of the National Research Council, Sesto Fiorentino, Italy

*A. V. Kraskov*, Ph.D., Principal Investigator, UCL Institute of Neurology, Sobell Department, London, UK

*N. V. Kuznetsov*, Visiting Professor, University of Jyväskylä, Finland

*G. van Luijtelaar*, Ph.D., Professor emeritus, Donders Centre for Cognition, Radboud University Nijmegen, Nijmegen, The Netherlands

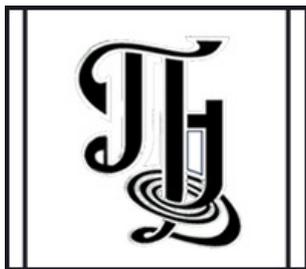
*A. K. Lüttjohann*, Ph.D., Postdoctoral researcher, Institut für Physiologie I, Westfälische Wilhelms-Universität, Münster, Germany

*A. B. Neiman*, Dr. of Science, Physics and Mathematics, Associate professor of Department of Physics and Astronomy, Ohio University, USA

*A. S. Pikovskiy*, Dr. rer. Nat. habil., Professor, Universität Potsdam, Germany

*A. N. Pisarchik*, Ph.D., Professor, Universidad Politecnica de Madrid, Centre for Biomedical Technology, Spain

*V. A. Vakorin*, Ph.D., Data Scientist, NeuroInformatics and NeuroAnalytics Lead, ImageTech Lab, Simon Fraser University, Vancouver, Canada



**Известия высших учебных заведений  
ПРИКЛАДНАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА**

*Научно-технический журнал*

Издается с 1993 года, выходит 6 раз в год

**Учредитель** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»  
Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83; e-mail: rector@sgu.ru

**Издатель** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»  
Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83; e-mail: rector@sgu.ru

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации средства массовой информации № 1492 от 19.12.1991, перерегистрация: № 1492 от 24.08.1998, перерегистрация: ПИ № ФС77-77991 от 20.03.2020

Краткое название: Известия вузов. ПНД

ISSN печатной версии 0869-6632, ISSN online версии 2542-1905

Язык публикаций: русский, английский

Журнал включён как самостоятельное издание в два индекса Web of Science: Emerging Source Citation Index (WoS Core Collection) и Russian Science Citation Index

Журнал включен в библиографическую базу данных SCOPUS (sourceid/21100864538) как самостоятельное издание

Журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук». Научные специальности, по которым присуждаются учёные степени (физико-математические науки): 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела, 1.3.3 – Теоретическая физика, 1.3.4 – Радиофизика, 1.3.5 – Физическая электроника, 1.3.6 – Оптика, 1.3.9 – Физика плазмы, 1.3.11 – Физика полупроводников, 1.3.19 – Лазерная физика, 1.5.2 – Биофизика.

Подписка осуществляется по Объединенному Каталогу «Пресса России» Раздел 30. «Научно-технические издания. Известия РАН. Известия ВУЗов» (подписной индекс 73498) и по Интернет-Каталогу Агентства «Книга-Сервис». Цена свободная.

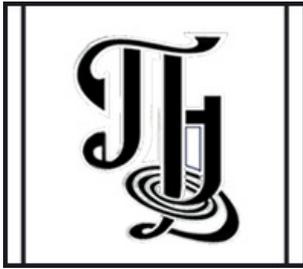
Электронная версия журнала находится в открытом доступе

Зав. редакцией М. В. Сысоева  
Редакторы: Л. А. Сидорова, А. О. Салахова  
Оформление А. А. Токмачевой  
Верстка О. Н. Строгановой

Адрес редакции: Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83. Тел.: +7 (8452) 523864, +7 (909) 3367208, e-mail: andjournal@sgu.ru, сайт: <http://andjournal.sgu.ru>

Подписан в печать 16.05.2022  
Вышел в свет 31.05.2022  
Формат 60x84 1/8. Усл. печ. л. 15.11 (16.3)  
Тираж 100 экз. Заказ № 71-Т

Отпечатан в Типографии Саратовского университета. Адрес типографии: Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83, корп. 8  
Тел.: +7 (8452) 273385, e-mail: [sguprint@bk.ru](mailto:sguprint@bk.ru)



Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy  
**APPLIED NONLINEAR DYNAMICS**

*Scientific-technical journal*

Published since 1993, 6 issues per year

**The journal was founded by** Saratov State University  
83, Astrakhanskaya Str., Saratov 410012, Russia; e-mail: rector@sgu.ru

**The publisher of the journal is** Saratov State University  
83, Astrakhanskaya Str., Saratov 410012, Russia; e-mail: rector@sgu.ru

Registered with the Federal service for supervision of communications, information technology and mass communications. Certificate of mass media registration No 1492 of 19.12.1991, re-registration: No 1492 of 24.08.1998, re-registration: ПИ No ФC77-77991 of 20.03.2020

Abbreviated title: Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics

ISSN print 0869-6632, ISSN online 2542-1905

Languages of publication: Russian and English

The journal is included into Web of Science Core Collection, Emerging Source Citation Index and into Russian Science Citation Index on the Web of Science platform

The journal has been indexed in SCOPUS as an independent source (sourceid/21100864538)

The journal is included in «The LIST of peer-reviewed scientific publications, where the main scientific results of Candidate of Sciences and Doctor of Sciences dissertations have to be published». The following Scientific Specialties in the field of Physics and Mathematical Sciences are presented: 1.1.8 – Mechanics of a deformable solid body, 1.3.3 – Theoretical Physics, 1.3.4 – Radio Physics, 1.3.5 – Physical Electronics, 1.3.6 – Optics, 1.3.9 – Plasma Physics, 1.3.11 – Semiconductor Physics, 1.3.19 – Laser Physics, 1.5.2 – Biophysics.

The journal subscription index is 73498 in the United Catalogue «Pressa Rossii», «The Russian Press», section 30 «Scientific and Technical Journals. Bulletins of the Russian Academy of Sciences. Bulletins of Higher Educational Institutions (Izvestiya VUZ)».

The journal is Open Access

Head of Editorial office M. V. Sysoeva  
Editors: L. A. Sidorova, A. O. Salakhova  
Design of A. A. Tokmacheva  
Layout of O. N. Stroganova

Address of Editorial office: 83, Astrakhanskaya Str.,  
Saratov 410012, Russia. Ph.:+7 (8452) 523864,  
+7 (909) 3367208, e-mail: andjournal@sgu.ru,  
website: <http://andjournal.sgu.ru>

Signed to press 16.05.2022. Published 31.05.2022  
Format 60x84 1/8. Conv.-pr. Sh. of 15.11 (16.3)  
Edition of 100 copies. Order No. 71-T

Printed by Printing House of Saratov State  
University. Address of Printing House:  
83, build. 8, Astrakhanskaya Str., Saratov 410012,  
Russia. Ph.:+7 (8452) 273385, e-mail:sguprint@bk.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ОТ РЕДАКТОРА

*Яхно В. Г., Парин С. Б.* О методологии исследования когнитивных систем ..... 257

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ. НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА  
И ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ

*Крылов А. К.* Порождение бифуркации общественного мнения алгоритмами социальных сетей ..... 261

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА И НЕЙРОНАУКА

*Yusipov I. I., Kozinov E. A., Lapyeva T. V.* Transition from ergodic to many-body localization regimes in open quantum systems in terms of the neural-network ansatz [*Юсипов И. И., Козинов Е. А., Лептева Т. В.* Переход от эргодических режимов к режимам многочастичной локализации в открытых квантовых системах с точки зрения нейросетевого представления] ..... 268

*Кузенков О. А.* Построение функции приспособленности, зависящей от множества конкурирующих стратегий, на основе анализа популяционной динамики ..... 276

*Бахшиев А. В., Демчева А. А.* Сегментная спайковая модель нейрона CSNM ..... 299

*Петухов А. Ю., Полевая С. А.* Измерение когнитивного потенциала на основе выполнения задач различного уровня сложности ..... 311

*Полевая С. А., Халак М. Е., Липатов К. С., Заречнова Н. В., Циркова М. М., Еремин Е. В., Буланов Н. А.* Клинические аспекты нелинейной динамики когнитивных процессов: особенности сенсомоторной активности у пациентов на клинической фазе COVID-19 ..... 322

*Цукерман В. Д.* Нейродинамическая модель творческого познания реляционных сетей с четным циклическим торможением ..... 331

НАУКА – ОБРАЗОВАНИЮ. МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ. ИСТОРИЯ. PERSONALIA

*Александрова Н. Ш.* «Метафора компьютера», межполушарная асимметрия и видовое (спонтанное) знание Homo sapiens ..... 358

*Нуйдель И. В.* К 75-летию Владимира Григорьевича Яхно ..... 373

**C O N T E N T S**

EDITORIAL

*Yakhno V. G., Parin S. B.* About methodology of cognitive systems research..... 257

MODELING OF GLOBAL PROCESSES. NONLINEAR DYNAMICS AND HUMANITIES

*Krylov A. K.* Bifurcation of public opinion created by social media algorithms ..... 261

NONLINEAR DYNAMICS AND NEUROSCIENCE

*Yusipov I. I., Kozinov E. A., Laptyeva T. V.* Transition from ergodic to many-body localization regimes in open quantum systems in terms of the neural-network ansatz ..... 268

*Kuzenkov O. A.* Construction of the fitness function depending on a set of competing strategies based on the analysis of population dynamics..... 276

*Bakhshiev A. V., Demcheva A. A.* Compartmental spiking neuron model CSNM..... 299

*Petukhov A. Y., Poleyaya S. A.* Measuring cognitive potential based on the performance of tasks of various levels of complexity ..... 311

*Poleyaya S. A., Khalak M. E., Lipatov K. S., Zarechnova N. V., Cirkova M. M., Eremin E. V., Bulanov N. A.* Clinical aspects of nonlinear dynamics of cognitive processes: features of sensorimotor activity in patients at the clinical phase of COVID-19 ..... 322

*Tsukerman V. D.* Neurodynamic model for creative cognition of relational networks with even cyclic inhibition ..... 331

SCIENCE FOR EDUCATION. METHODOICAL PAPERS. HISTORY. PERSONALIA

*Alexandrova N. Sh.* “Computer metaphor”, interhemispherical asymmetry and species (spontaneous) knowledge of Homo sapiens ..... 358

*Nuidel I. V.* On the 75th anniversary of Vladimir G. Yakhno..... 373



Редакторская заметка  
DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-3-257-260

## О методологии исследования когнитивных систем

*В. Г. Яхно, С. Б. Парин*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия  
Национальный исследовательский Нижегородский государственный  
университет имени Н. И. Лобачевского, Россия  
E-mail: yakhno@appl.sci-nnov.ru, parins@mail.ru  
*Поступила в редакцию 5.04.2022, опубликована 31.05.2022*

*Для цитирования: Яхно В. Г., Парин С. Б. О методологии исследования когнитивных систем // Известия вузов. ПНД. 2022. Т. 30, № 3. С. 257–260. DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-3-257-260.*

*Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).*

20–24 сентября 2021 года в Институте прикладной физики РАН, Нижний Новгород прошла Седьмая Всероссийская конференция «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях».

Конференция традиционно была посвящена текущему состоянию, перспективам и новым возможностям экспериментальных исследований и формализованного описания когнитивных процессов, а также проблемам, связанным с разработками симуляторов живых систем.

Основное внимание уделялось:

- сохранению и передаче знаний на основе их формализации, в том числе в виде функциональных моделей и баз данных;
- динамическим процессам обработки информации;
- механизмам формирования сложных форм поведения;
- процессам восприятия и осознания сенсорных сигналов;
- использованию симуляторов для регистрации параметров, определяющих функциональное состояние живых систем, предсказанию вариаций их поведения и динамики реагирования в различных ситуациях.

Участникам конференции было предложено представить расширенное изложение их результатов в статьях для возможной публикации в журнале «Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика». Естественность этого предложения основывалась на том, что почти все представленные ими результаты гласно или по умолчанию основаны на рассмотрении нелинейных динамических процессов в живых системах, а каждый из исследователей мотивирован осознанием важности его результатов в прикладных областях.

В связи с этим необходимо рассмотреть некоторые из нелинейных динамических режимов, в которые вовлекаются исследователи — как авторы статей, так и читатели и рецензенты этих



статей. Из всех вариантов коллективной динамики когнитивных агентов нас интересуют режимы, направленные либо на развитие, либо на угнетение творческого потенциала взаимодействующих агентов.

Хорошо известно, что основные особенности живых систем связаны с большим разнообразием режимов их функционирования. Это объясняется тем, что внешние воздействия, а также внутренние сигналы управления обрабатываются с помощью трех классов алгоритмов, ориентированных на: 1) «образные» представления; 2) «логические, инженерно-ориентированные» описания, технические реализации; 3) широкий спектр конструктов из совместного использования алгоритмов первого и второго классов. При этом динамика преобразований, осуществляемая этими алгоритмами, в свою очередь разделяется, например, на следующие группы восприятий: 1) бессознательные, автоматические реакции; 2) осознанные, настраивающие систему на конкретную обстановку и воздействие, а также использующие внутренние представления о входных сигналах; 3) интуитивные, в которых через запуск неспецифических реакций происходит обращение к внешнему окружению с надеждой на помощь в поиске путей разрешения непреодолимых для системы текущих проблем. Важно отметить, что каждый из этих режимов, кроме наработанных в прошлом опыте правил (для которых некие методики регистрации уже сформированы), существует еще и скрытый, практически непознаваемый пласт механизмов, основанный на конкретном опыте и особенностях развития конкретно изучаемой живой системы.

Именно эти, часто непредсказуемые или непознаваемые для исследователя особенности скрытых механизмов могут переключать режимы функционирования живой системы и затруднять или делать невозможным статистический анализ собираемых данных.

Можно ли преодолеть эти трудности формализованного описания с помощью модельного подхода? В физической методологии исследований принято в каждом корпоративном сообществе договариваться об «общепринятых» наборах аксиом и базовых моделях, использование которых проверяется на некотором образом сформированном стандарте, выбранной репрезентативной базе экспериментальных данных. Заметим только, что в выборе и аксиом, и базовых моделей, и экспериментальных данных присутствует существенная доля субъективных суждений, о которых в процессе множественных повторений методической процедуры (и формирования стереотипов) часто постепенно забывают.

Успехи модельного подхода продемонстрированы, например, при использовании и нейронно-сетевых архитектур, и базовых моделей когнитивных систем, и при построении функции приспособ-

собленности, зависящей от множества конкурирующих стратегий в популяции взаимодействующих когнитивных элементов. Отличительные черты согласования этих моделей с экспериментальными данными выражены в следующем.

В нейронно-сетевом подходе, особенно с применением методик глубокого обучения, приходится использовать очень большой объем экспериментальных данных, чтобы определить адекватные коэффициенты связи для элементов сети в заданной области функционирования. При этом, однако, достигается весьма высокое качество распознавания объектов, иногда превышающее возможности специалистов.

Для базовых моделей когнитивных систем (например, функциональной системы П. К. Анохина и её модификаций) выбранные схемы преобразуются в необходимые разработчику балансные уравнения. Из этих уравнений исследователь на основе своего опыта и соображений здравого смысла выбирает только те решения, которые по качественным или количественным характеристикам лучше всего соответствуют изучаемым динамическим режимам системы в эксперименте. Таким образом, успешный результат получается на основе опыта (а иногда и искусства) самого исследователя. Поэтому малый объем изучаемых данных удается логично интерпретировать на основе ранее полученных знаний и данных, то есть необходимый объем текущих данных заменен теми, которые были получены ранее. Сопутствующим достижением в таком подходе становится возможность формирования элементов научного языка — базовым моделям, спектрам их решений в соответствующих областях параметров, и другим необходимым критериям. Именно такой язык позволяет выявлять области неоднозначных интерпретаций и снижает уровень возможного субъективизма в процессе формализованно-понятного общения между теми, кто этот язык освоил.

Существует также подход, связанный с построением функций приспособленности, зависящих от множества конкурирующих стратегий в популяции взаимодействующих когнитивных элементов. Этот подход расширяет возможности привлечения знаний и данных, полученных исследователем ранее, для обоснования справедливости выводов даже при сравнении с данными лишь единичных экспериментов. Например, с его помощью удается формализовать использование правдоподобных гипотез о мотивациях или целях когнитивной системы. В результате процедура подгонки получаемых из базовых моделей решений к имеющимся экспериментальным данным становится более точной. Собеседник или читатель получает заодно и версию расширенного формализованного обоснования успешности выбранной конструкции модельного описания.

Этот список успешных модельных подходов для формализованного анализа природных сложноорганизованных систем, наверняка может быть продолжен.

При этом складывается представление, что любые адекватные *Природе* аксиомы, схемы и режимы функционирования, которые исследователи рассматривают на формализованных моделях,



могут существовать и в окружающей нас среде. Надо просто определить условия существования, поискать, и процесс может быть зарегистрирован.

Полагаем, что и даже краткое далеко не полное описание дает представление о разнообразии возможных режимов поведения, следующих из формализованных моделей когнитивных систем, и о том, как эти режимы можно прореживать при учете данных экспериментов и опыта исследователя. Конечно, все сразу описать невозможно, поэтому в работах выделяются лишь интересующие исследователя элементы общей иерархической системы.

И вот исследователи, успешно обсудившие свои результаты на конференции, расширили их описание и, исходя из своих наработанных годами стереотипов, радостно направляют свои статьи в профильный, как упоминалось ранее, журнал.

Реакция рецензентов на некоторые статьи нас сначала удивила, особенно утверждения, что предлагаемые результаты не по профилю журнала, но сейчас мы благодарны им за стимулы в постановке новых задач по изучению режимов взаимодействия когнитивных агентов с различающимся прошлым опытом.

Важно выделять образы — признаки, связанные с процессом создания условий для обоюдного творческого развития взаимодействующих когнитивных агентов.

Всё разнообразие режимов функционирования, упомянутое выше в отношении объектов, субъектов изучения, а также и самих исследователей — авторов, несомненно, также применимо и к устоявшемуся кругу рецензентов и читателей журнала «Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика». Мы ценим любые мнения рецензентов и читателей журнала, пусть даже отличающиеся от мнения авторов статей, но нам не по душе возведение барьеров для дискуссий. Как мы понимаем, журнал существует и для обсуждения результатов, достигнутых авторами. О таких дискуссиях мудрые люди оставили нам множество известных «образов»-притч, например, тех, которые приведены ниже.

«Прежде чем осуждать кого-то, возьми его обувь и пройди его путь, Попробуй его слезы, почувствуй его боли, Наткнись на каждый камень, о который он споткнулся, И только после этого говори, что ты знаешь, как правильно жить...» (*Далай-лама XIV*).

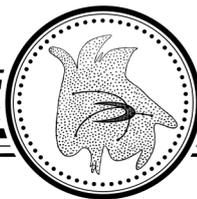
«Пчела, вонзив стальное жало, не знает, что она пропала, так и глупцы, пуская яд, не понимают, что творят...» (*Омар Хайям*).

«Многие вещи нам непонятны не потому, что наши понятия слабы; но потому, что сии вещи не входят в круг наших понятий» (*Козьма Прутков*).

Таким образом, видно, что конфликты мировоззренческих позиций в людских сообществах существовали, существуют и, по-видимому, будут существовать. Понятно, конечно, что честными и отражающими мировоззрения их представителей можно считать обе позиции: запрет мнений, выходящих за стереотипы воспринимающего когнитивного агента; или возможность изложения мнений собеседника агента, даже если оно противоречит устоявшемуся мнению воспринимающего когнитивного агента. Каждый исследователь делает свой выбор. Нам ближе подход, в котором вместо ограничений избирается путь, открывающий новые горизонты исследований и возможности развития. При этом возрастает доля субъективных суждений по поводу устройства Природы. Но для этого и существуют возможности — журнальных площадок, где открыто могут излагаться, а также обсуждаться разные взгляды и мнения. Желаем успехов пытливым исследователям на пути осознания механизмов функционирования живых систем.

В любом случае, в памяти всплывает и такое наблюдение известного ученого: «Обычно новые научные истины побеждают не так, что их противников убеждают и те признают свою неправоту, а большей частью так, что противники эти постепенно вымирают, а подрастающее поколение усваивает истину сразу» (*Макс Планк*).

*Использованы материалы из фотоальбома конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях — 2021» с сайта <https://nd-cogsci.ipfran.ru/2021/index.html>.*



Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2022. Т. 30, № 3  
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2022;30(3)

Краткое сообщение

УДК 004.94

DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-3-261-267

## Порождение бифуркации общественного мнения алгоритмами социальных сетей

*А. К. Крылов*

Институт психологии РАН, Москва, Россия

E-mail: [neuru@mail.ru](mailto:neuru@mail.ru)

Поступила в редакцию 10.11.2021,

принята к публикации 19.01.2022, опубликована 31.05.2022

**Аннотация.** Цель настоящего исследования — рассмотреть возможность нелинейного влияния алгоритмов социальных сетей на мнения пользователей и условия возникновения поляризации мнений в социуме посредством общения в социальной сети. **Методы.** В данной работе используется метод математического моделирования динамики мнений пользователей социальной сети. Рассматривается несколько стратегий отношения пользователей к поступающей информации: стратегия 1 — пользователь положительно относится к информации, близкой его позиции, независимо от направления отличия; стратегия 2 — пользователь положительно относится к той информации, которая выражает его позицию, но более определенно. **Результаты.** Показано, что за счет алгоритма ранжирования информации социальной сетью может происходить поляризация мнений в социуме — формируются два аттрактора. Бифуркация возникает при превышении 40% доли людей, положительно оценивающих позицию, соответствующую их взглядам, но более четкую — доля стратегии 2 в социуме. Если же все пользователи пользуются стратегией 1, то общество приходит к консенсусу — единому среднему мнению, формируется один аттрактор. **Заключение.** Алгоритмы социальной сети могут порождать поляризацию социума или усиливать ее больше, чем при устном общении, без социальной сети интернета. Взаимодействие пользователей в социальной сети существенно нелинейно и алгоритмы социальной сети усиливают нелинейность восприятия информации человеком, создавая односторонний поток поступающей информации.

**Ключевые слова:** моделирование, нелинейность, когнитивная наука, социальные системы, общественное мнение, социальная сеть.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 18-29-22045.

**Для цитирования:** Крылов А. К. Порождение бифуркации общественного мнения алгоритмами социальных сетей // Известия вузов. ПНД. 2022. Т. 30, № 3. С. 261–267. DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-3-261-267

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

## Bifurcation of public opinion created by social media algorithms

A. K. Krylov

Institute of Psychology, Russian Academy of Science, Moscow, Russia  
E-mail: [neuru@mail.ru](mailto:neuru@mail.ru)

Received 10.11.2021, accepted 19.01.2022, published 31.05.2022

**Abstract.** The purpose of this work is to consider the possibility of nonlinear influence of social media algorithms to the users opinions. A social media inherent algorithm of information ranging interacts with the user inherent bias and that increases the positive feedback loop. The result of this interaction is receiving by the user the only one side of an opinion and the user loses the very possibility to receive the opposite information. The conditions for the society polarization by means of a social media are investigated. **Methods.** In this paper, a model of users opinions dynamics was studied. There are two types of user's strategy was considered: strategy 1, when a user puts "like" on information with proximity to his own view, but differed in any direction; strategy 2, when a user puts "like" on information along his own view, but more strict. **Results.** It was shown that for strategy 1 the society comes to a consensus, but for strategy 2 the society polarizes to the two opposite views. Considering the mixed society, where both strategies are used, it was found that the bifurcation to the society polarization appears when there are more than 40% of people using strategy 2. **Conclusion.** The inherent algorithms of social media, which are created to adapt in coming information to the user's interests, creates or amplifies the bias of the user's opinion and locks the user in an information chamber of only one type. That effect is substantially created by the social media algorithm itself. Thus interaction of users within a social media may increase the polarization of a society more than if they would communicate offline.

**Keywords:** cognitive science, opinion dynamics, nonlinearity, nonlinear systems, social science.

**Acknowledgements.** This work was supported by Russian Foundation for Basic Research, grant No. 18-29-22045.

**For citation:** Krylov AK. Bifurcation of public opinion created by social media algorithms. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics.* 2022;30(3):261–267. DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-3-261-267

*This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).*

### Введение

Активное использование социальных интернет-сетей (ВКонтакте, Facebook, Youtube, Twitter) увеличивает влияние информации, получаемой из соцсетей, по сравнению с информацией, получаемой из других источников (живое общение, книги, телевидение), что повышает актуальность исследований влияния социальных сетей на формирование мнений в обществе с помощью моделирования (см. обзор моделей в [1]). Влияние социальной сети на мнение людей нелинейно. С одной стороны, пользователи сами определяют, из каких источников получать информацию в соответствии со своими взглядами — устанавливая связи в соцсети с теми, кто разделяет их взгляды [2]. С другой стороны, существует поляризация мнений в обществе, и эти полюсы, как источники информации, способствуют формированию аттракторов мнений с соответствующей нелинейной динамикой, в ряде случаев имеющую фрактальные признаки [3]. Само взаимодействие человека с получаемой из соцсети информацией также нелинейно — информация воспринимается через призму эмоций [4], и получение информации, противоположной мнению человека, может вызывать усугубление его собственной позиции [5].

Содержание информации, получаемой из социальных сетей интернета, зависит не только от выбора человеком постов для прочтения и видео для просмотра, но, в значительной степени, от предлагаемых социальной сетью (в «ленте» от «друзей», в «рекомендованных видео»). Социальная сеть имеет встроенный «алгоритм ранжирования» постов и видео, который определяет, какая информация будет предложена конкретному пользователю. Алгоритмы ранжирования являются коммерческой тайной, но общие принципы наблюдаемы и известны специалистам по

продвижению постов в социальной сети. Постановка «лайка» пользователем приводит к тому, что ему далее с большей вероятностью предлагается: 1) информация от того же автора, которому он поставил «лайк»; 2) источники, которые были положительно оценены теми людьми, которые тоже поставили «лайк» на этот пост — происходит канализация подачи информации и вписывание человека в определенную аудиторию социальной сетью. Это означает, что человек, положительно оценивший некоторую информацию, с большей вероятностью будет получать информацию с аналогичным содержанием, и не будет получать противоположную информацию по этой теме. Таким образом может возникать положительная обратная связь, порожденная алгоритмом социальной сети. Такой алгоритм работы соцсети может способствовать усугублению мнения человека, снижая шансы на изменение мнения. В связи с этим возможны нелинейные эффекты влияния алгоритмов социальной сети на мнения людей. Для проверки этой гипотезы нами проведено модельное исследование.

## 1. Методика

Рассмотрим некоторую тему, в которой каждый человек может придерживаться некоторой позиции между двумя крайними значениями. Это могут быть взгляды на моральные дилеммы (например, отношение к абортам — разрешать или запрещать) или отношение к политическим партиям — много исследований посвящено анализу динамики мнений жителей США к выборам между республиканцами и демократами, или между консерваторами и либералами. Обозначим крайние позиции как 1 («да», «за») и 0 («нет», «против»). Кроме собственной позиции, человек имеет связи в социальной сети с другими пользователями, которые транслируют свои взгляды. Связь с источником информации можно описать числом от 0 (не воспринимает этот источник, нет входящей связи) до 1 (постоянно воспринимает этот источник информации) — получим для группы пользователей матрицу  $W$  связей между ними. Будем использовать модель [6], основанную на теории Дюркгейма — мнение человека смещается к воспринимаемой информации:

$$Opi_n(t+1) = Opi_n(t) + a \left( \frac{\sum_{k=1}^N W_{n,k} * Opi_k(t)}{\sum_{k=1}^N W_{n,k}} - Opi_n(t) \right), \quad (1)$$

Здесь  $Opi_n$  — мнение человека  $n$  по данной теме (вещественное число от 0 — «нет/против», до 1 — «да/за»).  $N$  — количество людей в социуме, они же источники и реципиенты информации. Информационные связи  $W_{n,k}$  с другими пользователями соцсети или информационными каналами социальной сети определяют, чью информацию человек получает. Формула означает, что мнение человека постепенно приближается к мнению тех, с кем он связан в соцсети (кого он читает), и скорость изменения мнения определяется параметром  $a$ .

**1.1. Стратегия 1.** В модели [6], основанной на теории Дюркгейма, предполагается, что человек усиливает свои входящие социально-информационные связи с теми, кто близок к его позиции (стратегия 1):

$$W_{n,k}(t+1) = W_{n,k}(t) + b \left( e^{-c*|Opi_n(t)-Opi_k(t)|} - W_{n,k}(t) \right), \quad (2)$$

где параметр  $b$  определяет скорость изменения связей, коэффициент  $c = 10$ .

В такой модели значима абсолютная близость мнений — например, кто «немного за» ( $Opi_n = 0.6$ ) больше усилит связь с тем, кто «немного против» ( $Opi_k = 0.4$ ; разница 0.2), чем с тем, кто четко «за» ( $Opi_k = 1$ ; разница 0.4), что представляется неправдоподобным, поскольку предполагает, что человек легко меняет свои взгляды.

**1.2. Стратегия 2.** Можно предположить и другую стратегию, в которой человек склонен выбирать тех, кто усиливает его текущее мнение (стратегия 2):

$$W_{n,k}(t+1) = W_{n,k}(t) + b(d - W_{n,k}(t)), \quad (3)$$

В стратегии 2:  $d = 1$  если  $Opi_k(t) > Opi_n(t) > 0.5$  или  $Opi_k(t) < Opi_n(t) < 0.5$ ; иначе  $d = 0$ . Рассмотрим социум, в котором есть люди, использующие стратегии 1 и 2 и проанализируем, как влияет рост количества людей, пользующихся стратегией 2, на динамику мнений в контексте возможного конфликта мнений. Обозначим  $N_2$  процент людей использующих стратегию 2 (остальные — стратегию 1). При  $N_2 = 0$  имеем классический вариант рассмотрения по Дюркгейму.

**1.3. Стратегия 3.** Можно рассмотреть и более мягкую стратегию 3: имея определенную интенцию «за» ( $Opi_n > 0.5$ ) или «против» ( $Opi_n < 0.5$ ) человек предпочитает ставить «лайки» на информацию, которая находится в этом же русле ( $Opi_k < 0.5$  или  $Opi_k > 0.5$ , соответственно), и снижает связь с источниками противоположных взглядов (3). В стратегии 3:  $d = 1$ , если  $Opi_k(t), Opi_n(t) > 0.5$  или  $Opi_k(t), Opi_n(t) < 0.5$ ; иначе  $d = 0$ .

**1.4. Параметры метода.** Расчет итоговой гистограммы результатов моделирования проводился усреднением по 50 итерациям, в каждой по 100 шагов обмена мнениями и изменения связей. Начальное распределение мнений  $Opi_n(1)$  случайное (рис. 1, а). Рассматривался социум из 100 человек ( $N = 100$ ). Скорость изменения мнений  $a = 0.1$ . Динамика модели изучалась при варьировании параметра  $b$  от 0.1 до 0.9.

## 2. Результаты

**2.1. Итоговые распределения мнений.** Модель по стратегии 1 показывает, что для любых значений  $a$  и  $b$  социум усредняет свои стартовые расхождения (см. рис. 1, а) во мнениях, приходя к единому среднему консенсусу (рис. 1, б). В случае стратегии 2 происходит поляризация мнений (рис. 1, в) и она тем сильнее выражена, чем больше параметр  $b$ , который отражает влияние алгоритма соцсети. Аналогично, в стратегии 3 также происходит разделение социума на два лагеря, но менее сильное (рис. 1, д).

**2.2. Динамика формирования мнений.** Далее отдельно представлены результаты для  $b = 0.5$ . В этом случае скорость изменения связей лишь в 5 раз выше, чем скорость изменения мнений  $b = 0.1$ . Это представляется довольно «мягким» вариантом, поскольку скорость изменения связей в социальной сети очень большая — достаточно посмотреть одно видео или поставить «лайк» и алгоритм ранжирования сам вписывает человека в определенную аудиторию, независимо от того, успел ли человек изменить свою позицию. Поэтому навязываемая социальной сетью скорость изменения связей  $b$  можно предполагать еще большей относительно скорости изменения мнений  $a$ . Отметим, что рассматриваем именно начало знакомства пользователя с определенной темой — когда алгоритм социальной сети еще не обнаружил взгляды пользователя и еще не определил, в какую именно аудиторию его включить по его отношению к данной теме. В противном случае, когда пользователь уже имеет опыт взаимодействия в социальной сети с контентом по этой теме, он уже вписан в определенную аудиторию относительно этой темы, поэтому его одиночные оценки уже не имеют такого значения и в этом проявляется нелинейность — первые действия пользователя при восприятии контента имеют больший вес, чем последующие.

Примеры динамики формирования мнений в смешанном социуме показаны на рис. 2. Если все используют только стратегию 1 ( $N_2 = 0\%$ ), то социум приходит к единому среднему консенсусу (рис. 2, слева). В случае, если в социуме 40% людей используют стратегию 2 ( $N_2 = 40\%$ ), и только 60% стратегию 1, результаты получаются иные — социум разбивается на две группы людей, склонных к противоположным взглядам (рис. 2, справа).

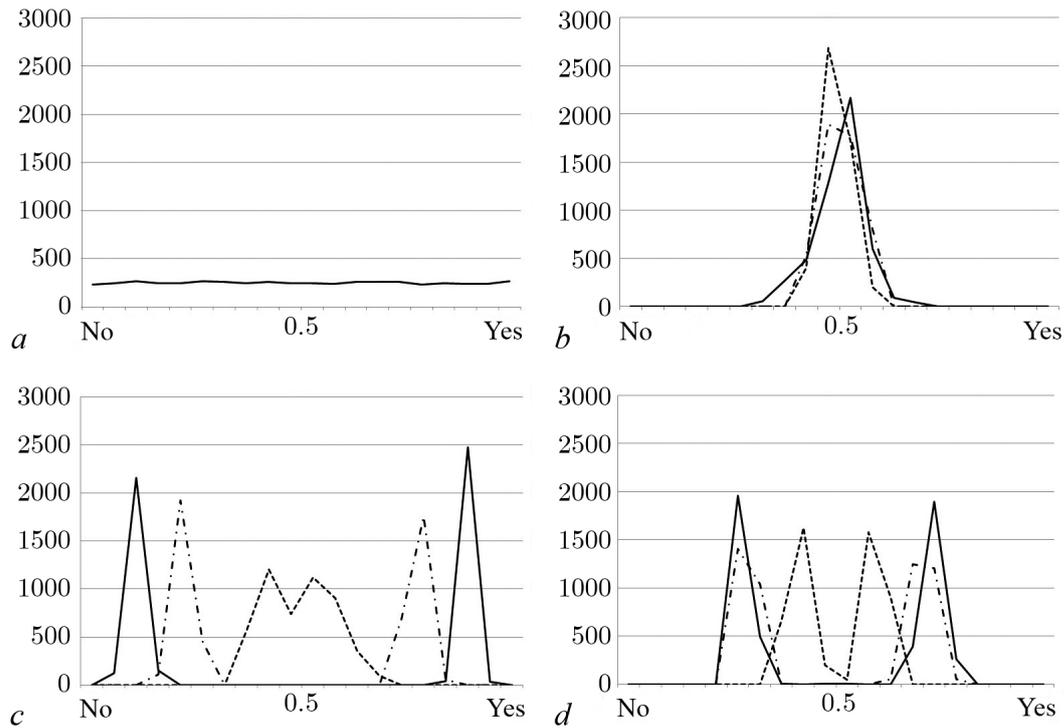


Рис. 1. Гистограммы мнений. По вертикали — количество человек, имеющих данную позицию. Горизонтальная ось представляет мнения от 0 (слева — четкое «нет») до 1 (справа — четкое «да»). *a* — Стартовое распределение. *b* — Результат по стратегии 1. *c* — Результат по стратегии 2. *d* — Результат по стратегии 3. Видно, что поляризация мнений увеличивается с ростом параметра  $b$ :  $b = 0.9$  — сплошная линия,  $b = 0.5$  — штрихпунктирная,  $b = 0.1$  — пунктирная

Fig. 1. Opinions histograms obtained in the model. An opinion is shown on the horizontal axis (“yes” towards right side, “no” towards left side). The vertical axis represents the number of user having that opinion. *a* — Start distribution. *b* — Result of the strategy 1. *c* — Result of the strategy 2. *d* — Result of the strategy 3. The polarization of opinions is increasing with parameter  $b$ :  $b = 0.9$  — solid line,  $b = 0.5$  — dashed-dotted line,  $b = 0.1$  — dotted line

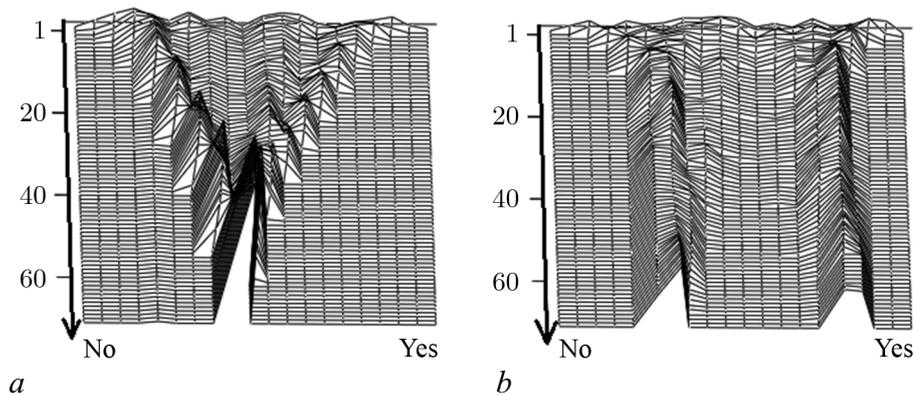


Рис. 2. Динамика мнений в модели. Горизонтальная ось представляет мнения от 0 (слева — четкое «нет») до 1 (справа — четкое «да»). Высота столбца представляет количество людей, придерживающихся этого мнения. Вертикальная ось представляет временные шаги модели (увеличивающиеся вниз). *a* — Стратегия 1,  $N_2 = 0\%$ . Общество приходит к консенсусу. *b* —  $N_2 = 40\%$ . Там появляется поляризация

Fig. 2. Dynamics of opinions in the model. Horizontal axis represents opinions (“yes” towards right side, “no” towards left side). A column height represents the number of people having this opinion. Vertical axis represents the model time steps (increasing down). *a* — Strategy 1,  $N_2 = 0\%$ . The society comes to a consensus. *b* —  $N_2 = 40\%$ . There a polarization appears

**2.3. Смешанный социум.** Результаты для разных значений  $N_2$  (пропорция людей, использующих стратегию 2) показаны на рис. 3. При низких значениях  $N_2$  (от 0% до 10%) социум приходит к консенсусу, далее, с ростом  $N_2$  до 35% консенсус распадается и социум имеет широкое разнообразие взглядов, а при дальнейшем увеличении  $N_2$  от 40% и более — социум разбивается на две четкие группы, имеющие разные позиции.

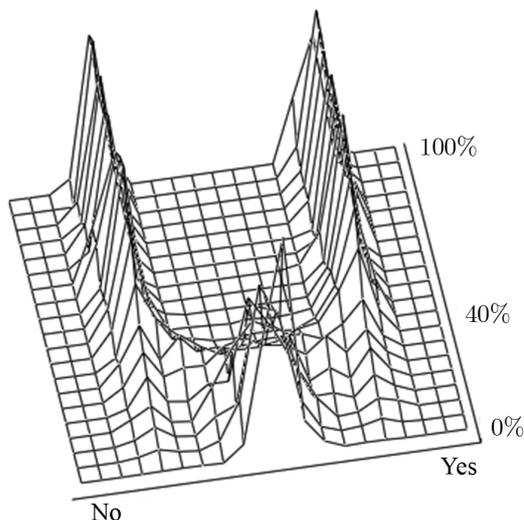


Рис. 3. Статистика результатов для разной величины  $N_2$  (вертикальная ось). По горизонтали — позиция, измеряемая от 0 — четкое «нет», до 1 — четкое «да». Высота столбцов отражает количество человек, придерживающихся данного мнения после 100 шагов обмена мнениями. Видно, что с увеличением доли людей, использующих стратегию 2 от 0% до 35% социум перестает иметь консенсус, а при значениях от 40% и более — социум разбивается на две четкие группы с разными взглядами

Fig. 3. Opinions histograms obtained in the model depending on the percentage of people having strategy 2 (vertical axis on the right). Horizontal axis represents opinions (“yes” towards right side, “no” towards left side). A column height represents the number of people having this opinion. When the percent of people using strategy 2 increases above 40% the socium divides to two groups with opposite views

### Заключение

Влияние современных алгоритмов социальной сети на получение информации пользователями может приводить к разбиению социума на два лагеря и способствовать созданию социального конфликта мнений. Такой конфликт возникает, если в социуме большой процент людей, склонных положительно оценивать информацию, соответствующую их взглядам. В рассмотренной модели получено, что при увеличении доли таких людей от 40% и более происходит бифуркация — социум разбивается на две четкие группы, имеющие противоположные позиции, при том, что изначально социум имеет равномерное распределение мнений. Полученные результаты показывают, что алгоритмы соцсетей могут усиливать поляризацию мнений в обществе, поскольку жестко канализируют получаемую человеком информацию на основе его текущего мнения. Этот феномен усиливается социальной сетью ввиду того, что скорость изменений информационных связей ( $b$  в модели) в соцсети существенно превышает скорость изменения мнения ( $a$  в модели). Таким образом, рост популярности социальных сетей, в которых владельцами встроены алгоритмы ранжирования информации на основе интересов пользователей, способствует усилению положительной обратной связи и порождает существенную нелинейную динамику в позициях социума, формируя даже из равномерного распределения поляризацию общества на две части.

### Список литературы

1. Prasetya H. A., Murata T. A model of opinion and propagation structure polarization in social media // *Comput. Soc. Netw.* 2020. Vol. 7, no. 1. P. 2. DOI: 10.1186/s40649-019-0076-z.
2. Bakshy E., Messing S., Adamic L. A. Exposure to ideologically diverse news and opinion on Facebook // *Science.* 2015. Vol. 348, no. 6239. P. 1130–1132. DOI: 10.1126/science.aaa1160.
3. Xiong F., Liu Y. Opinion formation on social media: An empirical approach // *Chaos.* 2014. Vol. 24, no. 1. P. 013130. DOI: 10.1063/1.4866011.

4. *Törnberg P., Andersson C., Lindgren K., Banisch S.* Modeling the emergence of affective polarization in the social media society // PLoS ONE. 2021. Vol. 16, no. 10. P. e0258259. DOI: 10.1371/journal.pone.0258259.
5. *Bail C. A., Argyle L. P., Brown T. W., Bumpus J. P., Chen H., Hunzaker M. B. F., Lee J., Mann M., Merhout F., Volfovsky A.* Exposure to opposing views on social media can increase political polarization // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2018. Vol. 115, no. 37. P. 9216–9221. DOI: 10.1073/pnas.1804840115.
6. *Mäs M., Flache A., Helbing D.* Individualization as driving force of clustering phenomena in humans // PLoS Comput. Biol. 2010. Vol. 6, no. 10. P. e1000959. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1000959.

## References

1. Prasetya HA, Murata T. A model of opinion and propagation structure polarization in social media. *Comput. Soc. Netw.* 2020;7(1):2. DOI: 10.1186/s40649-019-0076-z.
2. Bakshy E, Messing S, Adamic LA. Exposure to ideologically diverse news and opinion on Facebook. *Science.* 2015;348(6239):1130–1132. DOI: 10.1126/science.aaa1160.
3. Xiong F, Liu Y. Opinion formation on social media: An empirical approach. *Chaos.* 2014;24(1):013130. DOI: 10.1063/1.4866011.
4. Törnberg P, Andersson C, Lindgren K, Banisch S. Modeling the emergence of affective polarization in the social media society. *PLoS ONE.* 2021;16(10):e0258259. DOI: 10.1371/journal.pone.0258259.
5. Bail CA, Argyle LP, Brown TW, Bumpus JP, Chen H, Hunzaker MBF, Lee J, Mann M, Merhout F, Volfovsky A. Exposure to opposing views on social media can increase political polarization. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2018;115(37):9216–9221. DOI: 10.1073/pnas.1804840115.
6. Mäs M, Flache A, Helbing D. Individualization as driving force of clustering phenomena in humans. *PLoS Comput. Biol.* 2010;6(10):e1000959. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1000959.



*Крылов Андрей Константинович* — родился в Москве (1975). Окончил факультет ВМК МГУ по направлению «Прикладная математика» (1996). Защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата психологических наук по специальности «Психофизиология» (2007, Институт психологии РАН). С 2003 года работает в Институте психологии РАН, старший научный сотрудник. Научные интересы — математическое моделирование, нейронаука, когнитивные исследования. Опубликовал более 60 научных работ по указанным направлениям.

Россия, 129366 Москва, ул. Ярославская, 13  
 Институт психологии РАН  
 E-mail: [neuru@mail.ru](mailto:neuru@mail.ru)  
 ORCID: 0000-0002-7845-231X  
 AuthorID (eLibrary.Ru): 184860



Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2022. Т. 30, № 3  
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2022;30(3)

Short communication

DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-3-268-275

## Transition from ergodic to many-body localization regimes in open quantum systems in terms of the neural-network ansatz

*I. I. Yusipov<sup>✉</sup>, E. A. Kozinov, T. V. Laptyeva*

National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Russia

E-mail: ✉yusipov.igor@gmail.com, evgeny.kozinov@itmm.unn.ru,  
tatyana.lapteva@itmm.unn.ru

*Received 28.10.2021, accepted 23.12.2021, published 31.05.2022*

**Abstract.** The *purpose* of our work is to investigate asymptotic stationary states of an open disordered many-body quantum model which is characterized by an ergodic – many-body localization (MBL) phase transition. To find these states, we use the neural-network ansatz, a new *method* of modeling complex many-body quantum states discussed in the recent literature. Our main *result* is that the ergodic phase – MBL transition is detectable in the performance of the neural network that is trained to reproduce the asymptotic states of the model. While the network is able to reproduce, with a relatively high accuracy, ergodic states, it fails to do so when the model system enters the MBL phase. We *conclude* that MBL features of the model translate into the cost function landscape which becomes corrugated and acquires many local minima.

**Keywords:** many-body localization, open quantum systems, neural networks.

**Acknowledgements.** This work was supported by Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Nizhni Novgorod region of the Russian Federation, grant No. 18-41-520004.

**For citation:** Yusipov II, Kozinov EA, Laptyeva TV. Transition from ergodic to many-body localization regimes in open quantum systems in terms of the neural-network ansatz. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2022;30(3):268–275. DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-3-268-275

*This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).*

## Переход от эргодических режимов к режимам многочастичной локализации в открытых квантовых системах с точки зрения нейросетевого представления

И. И. Юсипов✉, Е. А. Козинов, Т. В. Лантева

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
имени Н. И. Лобачевского, Россия

E-mail: ✉yusipov.igor@gmail.com, evgeny.kozinov@itmm.unn.ru, tatyana.lapteva@itmm.unn.ru  
Поступила в редакцию 28.10.2021, принята к публикации 23.12.2021, опубликована 31.05.2022

**Аннотация.** Целью нашей работы является исследование асимптотических стационарных состояний открытой неупорядоченной многочастичной квантовой модели, которая характеризуется переходом эргодическая фаза — многочастичная локализация (МЧЛ). Чтобы найти эти состояния, мы используем нейросетевой анзац, новый метод моделирования сложных квантовых состояний многих тел, предложенный и обсуждаемый в недавних публикациях. Наш главный результат состоит в том, что переход эргодическая фаза — многочастичная локализация обнаруживается в работе нейронной сети, которая обучена воспроизводить асимптотические состояния модели. Хотя сеть способна воспроизводить с относительно высокой точностью эргодические состояния, она не может этого сделать, когда модельная система входит в МЧЛ-фазу. Мы заключаем, что особенности МЧЛ-режима трансформируются в ландшафт функции стоимости, который становится сильно неравномерным и приобретает множество локальных минимумов.

**Ключевые слова:** многочастичная локализация, открытые квантовые системы, нейронные сети.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке РФФИ и Правительства Нижегородской области, грант № 18-41-520004.

**Для цитирования:** Юсипов И. И., Козинов Е. А., Лантева Т. В. Переход от эргодических режимов к режимам многочастичной локализации в открытых квантовых системах с точки зрения нейросетевого представления // Известия вузов. ПНД. 2022. Т. 30, № 3. С. 268–275. DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-3-268-275

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

### Introduction

The computational many-body quantum physics is one of the research fields that is severely subjected to the “Curse of Dimensionality” [1]. The complexity of the description of a state of a many-body system grows exponentially with the number  $N$  of system’s components, e.g., spin or qubits, so that the corresponding model becomes intractable already for relatively small values of  $N$ . The development of the computational many-body physics is the story of a constant search for new methods to compactify the description of quantum states at the price of restricting them to a subset which is constrained by some conditions [2], f.e., by area laws [3,4].

The rise of machine learning (ML) techniques has inspired physicists to design new methods of modeling complex quantum states. One of the recent breakthroughs is the idea to use neural networks to encode many-body states, in order to benefit from the ability of the networks to compactify descriptions of complex objects and sets; see, e.g., Refs. [5,6]. In particular, the so-called Neural Network States (NNS) [5], based on the restricted Boltzmann machines (RBMs) [7], turned out to be able to reproduce the ground states of large quantum many-body Hamiltonians [5,8], even in the case when these ground states are characterized by long-range entanglement [9].

Open many-body open quantum systems are especially challenging to deal with computationally. Due to the growth of the number of parameters (needed to describe the state of an open system) as the square of the corresponding Hilbert space dimension, description of open quantum states by density matrices requires substantially more computational resource as compared to the states of Hamiltonian systems [2].

Numerical solution of the Lindblad master equation [10], commonly used to model evolution of open quantum systems, becomes a challenge already for  $N = 10$  spins/qubits. Equally, the exact diagonalization of the Lindblad equation in order to find its stationary state – and thus to compute the asymptotic state of the corresponding model – becomes a problem starting  $N = 8$  spins (if no further constraints are imposed so that the dimension of the Hilbert space can be reduced) [2]. It therefore would be beneficial to implement the machine learning techniques to model open quantum many-body states.

A progress in this direction has been made very recently [11, 12]. In particular, the fact that any mixed quantum states can be purified by using ancillary degrees of freedom, was used in the recent work by Vicentini et al. [11]. By performing the purification, mixed states can be expressed as an NNS in the extended Hilbert space [13]. The asymptotic states of the model Lindbladian can then be found by performing variational minimization of a cost function associated to the master equation. It was demonstrated that by using Markov chain Monte Carlo sampling of the gradient, it is possible to approximate the asymptotic state of the dissipative quantum transverse Ising model with high accuracy [11].

From another perspective, asymptotic states of disordered open many body-system models can be continuously tuned from the ergodic phase, characterized by long-range entanglement (and therefore similar to the state addressed in Ref. [11, 14]) to MBL states, characterized short-ranged entanglement [15]. It is interesting to study the validity of the variational neural-network ansatz for the two types of states as well as to explore the transition between these types through the prism of neural network training. This is the main motivation of our work.

## 1. Model

We use an open disordered many-body model proposed in Ref. [15]. It was shown that, by tuning the strength of the disorder, it is possible to change the asymptotic states of the model from ergodic to the ones bearing the footprints of MBL. Below we briefly outline the model.

We consider an open-ended chain of  $N$  (an even number) sites occupied by  $N/2$  spinless fermions. The fermions interact only when occupying neighboring sites and are additionally subjected to random on-site potentials  $h_l$ ,  $l = 1, \dots, L$ . The model Hamiltonian is

$$H = -J \sum_{l=1}^L (c_l^\dagger c_{l+1} + c_{l+1}^\dagger c_l) + U \sum_{l=1}^L n_l n_{l+1} + \sum_{l=1}^L h_l n_l, \quad (1)$$

where  $c_l^\dagger$  ( $c_l$ ) creates (annihilates) a fermion at site  $l$ , and  $n_l = c_l^\dagger c_l$  is the local particle number operator. Values  $h_l$  are drawn from an uncorrelated uniform distribution on the interval  $[-h, h]$ . For  $J = U = 1$  (our choice here) this system undergoes a many-body localization transition when  $h > h_{\text{MBL}} \simeq 3.6$  [16]. By using the Jordan–Wigner transformation, the system can be mapped onto a model of  $L$  spins confined to the manifold  $S^z = \sum_{l=1}^L s_l^z = 0$ . This relation allows us to implement the time-evolving block decimation (TEBD) scheme generalized to matrix product operators [4] and propagate the model system to its steady state. As the initial state we use  $\rho(0) = |\psi_0\rangle\langle\psi_0|$ ,  $|\psi_0\rangle = |1010\dots10\rangle$ .

The dissipation is captured with the Lindblad master equation,

$$\dot{\rho}(t) = \mathcal{L}\rho(t) = -i[H, \rho(t)] + \sum_{s=1}^L \gamma_s \left[ A_s \rho(t) A_s^\dagger - \frac{1}{2} \{A_s^\dagger A_s, \rho(t)\} \right],$$

where  $\rho(t)$  is the system density operator, and  $A_s$  is the jump operator mimicking the  $s$ -th dissipative channel of the environment, with rate  $\gamma_s$ . The non-local dissipative operators act on a pair of neighboring sites,

$$A_l = (c_l^\dagger + c_{l+1}^\dagger)(c_l - c_{l+1}), \quad \forall \gamma_l = \gamma. \quad (2)$$

In Ref. [15] it was demonstrated that, by increasing disorder strength  $h$ , we can detect ergodic – MBL transition at  $h \approx 7$ . This transition can be detected by using several quantifiers, including the spectral statistics and structure of the density matrices describing to the asymptotic states. We will use this type of quantifiers here.

## 2. Neural-network ansatz

Here we briefly outline the idea of the ansatz presented in Ref. [11].

By using some basis in the system's Hilbert space,  $\{|\boldsymbol{\sigma}\rangle = |\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N\rangle\}$  (which is the Fock basis in the case of our model), the density operator can be represented as matrix  $\rho_v(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\sigma}')$ ,

$$\hat{\rho}(v) = \sum_{\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\sigma}'} \rho_v(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\sigma}') |\boldsymbol{\sigma}\rangle \langle \boldsymbol{\sigma}'|. \quad (3)$$

In order to use the NNS representation, this density matrix has to be represented as a partial trace over a pure state living in a higher dimensional Hilbert space,  $\mathcal{H} = \mathcal{H}_S \otimes \mathcal{H}_A$  where  $\mathcal{H}_{S,A}$  are the system and ancillary Hilbert spaces, respectively. The extended space is spanned by basis  $\{|\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{a}\rangle\}$  where  $\mathbf{a} = (a_1, a_2, \dots, a_{N_a})$  labels the ancillary degrees of freedom. The density matrix of the original system  $S$  is obtained by tracing out the ancillary degrees freedom [13],

$$\rho_v(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\sigma}') = \sum_{\mathbf{a}} \psi_v(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{a}) \psi_v^*(\boldsymbol{\sigma}', \mathbf{a}). \quad (4)$$

State  $\psi_v(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{a})$  can be encoded via a neural network ansatz [13],

$$\psi_v(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{a}) = \sqrt{\mathcal{P}_{v_A}(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{a})} \exp[-1/2 \log(\mathcal{P}_{v_\theta}(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{a}))]. \quad (5)$$

Amplitude  $\mathcal{P}_{v_A}(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{a})$  and phase function  $\mathcal{P}_{v_\theta}(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{a})$  are given by  $\mathcal{P}_v(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{a}) = \sum_{\mathbf{h}} \exp[-E_v(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{a}, \mathbf{h})]$  (with  $v \in \{v_A, v_\theta\}$ ), where the energy functional is defined as

$$E_v(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{a}, \mathbf{h}) = \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{b}_v^{(\sigma)} + \mathbf{a} \cdot \mathbf{b}_v^{(a)} + \mathbf{h} \cdot \mathbf{b}_v^{(h)} + \boldsymbol{\sigma}^T \mathbf{W}_v \mathbf{h} + \boldsymbol{\sigma}^T \mathbf{U}_v \mathbf{a}. \quad (6)$$

The ansatz parameters are  $\mathbf{v} = (v_A, v_\theta)$  where  $v_v = (\mathbf{b}_v^{(\sigma)}, \mathbf{b}_v^{(a)}, \mathbf{b}_v^{(h)}, \mathbf{W}_v, \mathbf{U}_v)$ . The rectangular matrix  $\mathbf{W}_v$  weighs the connections between the system variables (visible layer) to the auxiliary variables (hidden layer), while the weight matrix  $\mathbf{U}_v$  quantifies the connection between the system variables and the ancillary ones (ancillary layer). Such neural-network ansatz is represented by a tri-partite Restricted Boltzmann Machine depicted in Fig. 1. In other words, there are two independent artificial neural networks, one for the amplitude ( $v = A$ ) and one for the phase ( $v = \theta$ ).

By substituting above expressions into Eq. (4) and performing tracing over the ancillary degrees of freedom, we obtain the expressions for the elements of the density matrix\*:

$$\rho_v(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\sigma}') = \exp[\Gamma_v^-(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\sigma}') + \Gamma_v^+(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\sigma}') + \Pi_v(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\sigma}')]. \quad (7)$$

The descriptive power of the neural-network ansatz can be improved by increasing the density of the hidden ( $\alpha = N_h/N$ ) and ancillary ( $\beta = N_a/N$ ) layers.

The search for the asymptotic state can be recast into a minimization problem for a cost function,

$$\mathcal{C}(v) = \frac{\|d\hat{\rho}_v/dt\|_2^2}{\|\hat{\rho}_v\|_2^2} = \frac{\text{Tr}[\hat{\rho}_v^\dagger \mathcal{L}^\dagger \mathcal{L} \hat{\rho}_v]}{\text{Tr}[\hat{\rho}_v^\dagger \hat{\rho}_v]}, \quad (8)$$

\*The expression of  $\Gamma^{+/-}$  and  $\Pi$  can be found in the Supplemental Material of [11].

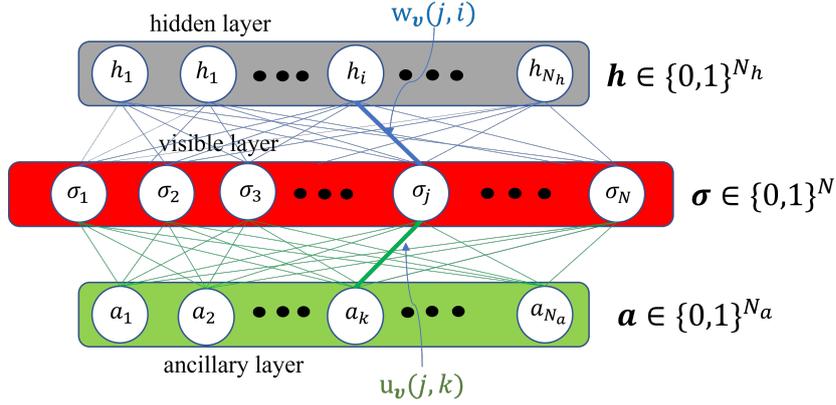


Fig. 1. The neural network used for the ansatz. The vector  $\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N)$  contains the variables of the system (visible layer, in red on the plot). The vector  $\boldsymbol{a} = (a_1, a_2, \dots, a_{N_a})$  contains the ancillary degrees of freedom of the extended Hilbert space (ancilla layer, green). The vector  $\boldsymbol{h} = (h_1, h_2, \dots, h_{N_h})$  contains variables of auxiliary nodes (hidden layer, grey). The network is specified with the set of parameters  $\boldsymbol{v} = (\mathbf{b}_v^{(\sigma)}, \mathbf{b}_v^{(a)}, \mathbf{b}_v^{(h)}, \mathbf{W}_v, \mathbf{U}_v)$ . Local biases,  $\mathbf{b}_v^{(h)}$ ,  $\mathbf{W}_v$ ,  $\mathbf{U}_v$ , acts on the neurons of the hidden, visible, and auxiliary layers, respectively. Another network, with the same structure is used to represent the phase ( $\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}_\theta$ ), Eq. (5) (color online)

It is known that, because of the absence of the normalization in density matrices obtained using the purification technique [13], it is not possible to base the optimization procedure on the elements of the density matrices encoded in the network. It was proposed to use Markov Chain Monte Carlo [17] with Metropolis update rules, and, at every sampling step, a new configuration  $(\boldsymbol{\sigma}, \tilde{\boldsymbol{\sigma}}) \rightarrow (\boldsymbol{\sigma}', \tilde{\boldsymbol{\sigma}}')$  is created by switching a random number of spins and it is accepted with probability  $\min(\exp[p_v(\boldsymbol{\sigma}, \tilde{\boldsymbol{\sigma}})/p_v(\boldsymbol{\sigma}', \tilde{\boldsymbol{\sigma}}')], 1)$ .

Finally, on every step of the optimization procedure, physical observables of interest are sampled through another Markov chain,

$$\langle \hat{\Theta} \rangle = \frac{\text{Tr}[\hat{\rho} \hat{\Theta}]}{\text{Tr}[\hat{\rho}]} = \sum_{\boldsymbol{\sigma}} p_v^{\text{obs}}(\boldsymbol{\sigma}) \sum_{\tilde{\boldsymbol{\sigma}}} \frac{\rho_v(\boldsymbol{\sigma}, \tilde{\boldsymbol{\sigma}}) \Theta(\tilde{\boldsymbol{\sigma}}, \boldsymbol{\sigma})}{\rho_v(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\sigma})}, \quad (9)$$

where  $p_v^{\text{obs}}(\boldsymbol{\sigma}) = \rho_v(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\sigma}) / \text{Tr}[\hat{\rho}]$ .

### 3. Results

In order to approximate the asymptotic states of the model (1)–(2), we use the *NetKet* [18] package developed by the authors of Ref. [11]. We have modified the original code in order to take the symmetry of the model system into account and thus to reduce the dimension of the Fock space to  $N = \binom{L}{L/2}$ , where  $L$  is the number of the lattice sites. Finally, we keep fixed the density of neurons in the hidden  $\alpha = N_h/N$ , and ancillary layer,  $\beta = N_a/N$ , fixed,  $\alpha = \beta = 2$ .

In order to measure the distance between the density matrix  $\rho_{\text{exact}}$ , obtained with the exact diagonalization of  $\mathcal{L}$ , Eq. (2), and the density matrix obtained with the neural-network ansatz,  $\rho_{\text{NNA}}$ , we use the standard fidelity measure,  $d(\rho_{\text{exact}}, \rho_{\text{NNA}}) = 1 - F(\rho_{\text{exact}}, \rho_{\text{NNA}})$ , where  $F(\rho, \sigma) = (\text{tr} \sqrt{\sqrt{\rho} \sigma \sqrt{\rho}})^2$ .

The results for the two extreme cases,  $h = 0$  and  $h = 10$ , corresponding to the ergodic and deep MBL phases, respectively, are presented in Fig. 2. While in the first case the distance drops to a relatively low value and then slowly tends to zero upon the increase of the number of iterations, in the second case the distance drops to a value which more or less corresponds to a distance between two randomly-chosen states and does not decrease further.

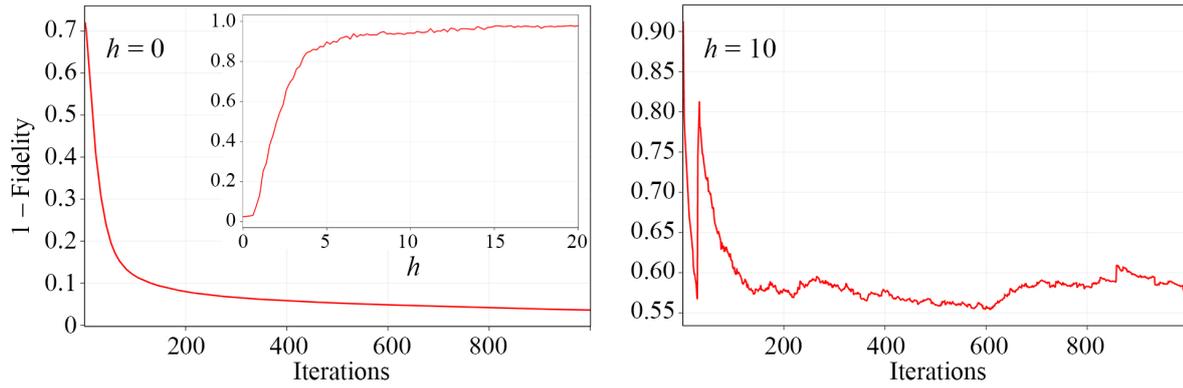


Fig. 2. Distance between the density matrices describing the asymptotic states of the model (1)–(3),  $1 - F(\rho_{\text{exact}}, \rho_{\text{NNA}})$  as a function of the number of iterations, for  $h = 0$  (left panel) and one particular realization of the disorder,  $h = 10$  (right panel).  $\rho_{\text{exact}}$  is obtained with the diagonalization of the Lindblad superoperator  $\mathcal{L}$ , while  $\rho_{\text{NNA}}$  is obtained with neural-network ansatz (see text for more details). Inset: The distance between the density matrices averaged over  $10^4$  realizations of disorder as a function of the disorder strength. The number of iterations in all cases was  $10^3$ . Parameters of the model are  $\gamma = 0.1$ ,  $U = J = 1$ , and  $L = 8$

We inspect structures of the density matrices corresponding to the asymptotic states of two particular realizations of the disorder in the ergodic phase,  $h = 0$  and  $h = 1$ . Following the ideas of Ref. [15], we plot the absolute value of the matrix elements. We find a good agreement between the patterns produced by  $\rho_{\text{exact}}$  and  $\rho_{\text{NNA}}$ ; see Fig. 3. Namely, both density matrices, exact and NNA ones, when expressed in the standard lexicographically ordered Fock, exhibit similar fine-structured pattern typical to ergodic states found in Ref. [15].

In the case of MBL regimes, the difference between the structures is distinctive. However, it is not random: While the pattern produced by  $\rho_{\text{exact}}$  is dominantly diagonal, with several 'hot spots' along

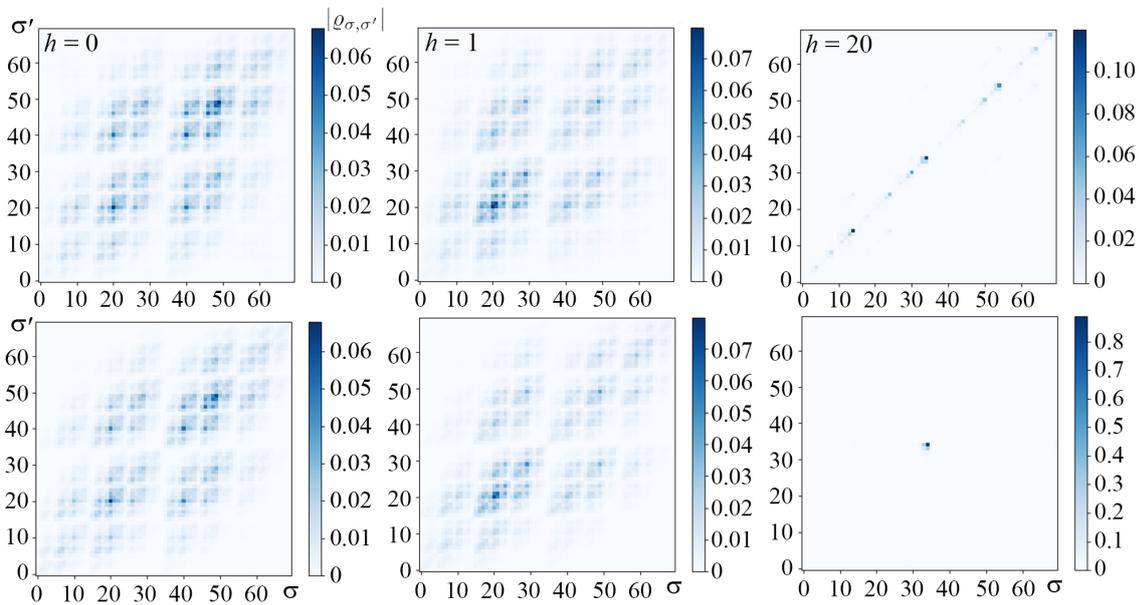


Fig. 3. Absolute values of the elements of the asymptotic density matrix for a single disorder realization and three different values of  $h$ . Upper panel: Density matrices  $\rho_{\text{exact}}$  obtained with the diagonalization of the Lindblad superoperator  $\mathcal{L}$ . Lower panel: Density matrices  $\rho_{\text{NNA}}$  obtained with the neural-network ansatz. Other parameters are the same as in Fig. 2

the main diagonal (this pattern is typical to the MBL states [15]),  $\rho_{\text{NNA}}$  is able to reproduce only one of these spots. By launching the neural network from a randomly chosen initial configuration, we can obtain another density matrix, which reproduces another hot spot.

## Conclusions

By using the variations neural-network ansatz proposed in Ref. [11], we analyzed the asymptotic states of the model exhibiting transition between the many-body ergodic and MBL phases.

We found that the performance of the neural network is very different in the two phases. Our conclusion is that many-body localization is somehow imprinted in the cost function landscape which becomes rough upon the increase of the disorder strength and acquires many local minima. Each local minimum corresponds to a single localization hot spot, that is a very localized probability distribution concentrated around single Fock state. The overall MBL density matrix can be represented as a weakly entangled combination of single-hot-spot density matrices. We guess that deep in the MBL state, the exact density matrix can be represented, as a convex combination of single-hot-spot density matrices,  $\rho_{\text{exact}} \approx \sum_{s=1}^M p_s \rho_{\text{NNA}}^s$ , where  $M$  is the number of localization spots in the Fock basis. Probabilities  $p_s$  can be estimated by performing statistical sampling and launching the network from random initial configurations. We plan to move further in this direction; in case this hypothesis is collaborated with numerical results, the link between a genuine quantum phenomena, MBL, and a famous problem of machine learning such as corrugated cost landscape with many local minima, will be established.

## References

1. Bellman RE. Dynamic Programming. Princeton: Princeton University Press; 1957. 365 p.
2. Meyerov I, Liniov A, Ivanchenko M, Denisov S. Simulating quantum dynamics: Evolution of algorithms in the HPC context. Lobachevskii Journal of Mathematics. 2020;41(8):1509–1520. DOI: 10.1134/S1995080220080120.
3. Eisert J, Cramer M, Plenio MB. Colloquium: Area laws for the entanglement entropy. Rev. Mod. Phys. 2010;82(1):277–306. DOI: 10.1103/RevModPhys.82.277.
4. Vidal G. Efficient classical simulation of slightly entangled quantum computations. Phys. Rev. Lett. 2003;91(14):147902. DOI: 10.1103/PhysRevLett.91.147902.
5. Carleo G, Troyer M. Solving the quantum many-body problem with artificial neural networks. Science. 2017;355(6325):602–606. DOI: 10.1126/science.aag2302.
6. Levine Y, Sharir O, Cohen N, Shashua A. Quantum entanglement in deep learning architectures. Phys. Rev. Lett. 2019;122(6):065301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.065301.
7. Goodfellow I, Bengio Y, Courville A. Deep Learning. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press; 2016. 800 p.
8. Melko RG, Carleo G, Carrasquilla J, Cirac JI. Restricted Boltzmann machines in quantum physics. Nature Physics. 2019;15(9):887–892. DOI: 10.1038/s41567-019-0545-1.
9. Deng DL, Li X, Das Sarma S. Quantum entanglement in neural network states. Phys. Rev. X. 2017;7(2):021021. DOI: 10.1103/PhysRevX.7.021021.
10. Lindblad G. On the generators of quantum dynamical semigroups. Commun. Math. Phys. 1976;48(2):119–130. DOI: 10.1007/BF01608499.
11. Vicentini F, Biella A, Regnault N, Ciuti C. Variational neural-network ansatz for steady states in open quantum systems. Phys. Rev. Lett. 2019;122(25):250503. DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.250503.
12. Hartmann MJ, Carleo G. Neural-network approach to dissipative quantum many-body dynamics. Phys. Rev. Lett. 2019;122(25):250502. DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.250502.
13. Torlai G, Melko RG. Latent space purification via neural density operators. Phys. Rev. Lett. 2018;120(24):240503. DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.240503.

14. Yoshioka N, Hamazaki R. Constructing neural stationary states for open quantum many-body systems. *Phys. Rev. B.* 2019;99(21):214306. DOI: 10.1103/PhysRevB.99.214306.
15. Vakulchyk I, Yusipov I, Ivanchenko M, Flach S, Denisov S. Signatures of many-body localization in steady states of open quantum systems. *Phys. Rev. B.* 2018;98(2):020202. DOI: 10.1103/PhysRevB.98.020202.
16. Pal A, Huse DA. Many-body localization phase transition. *Phys. Rev. B.* 2010;82(17):174411. DOI: 10.1103/PhysRevB.82.174411.
17. *Becca F, Sorella S.* Quantum Monte Carlo Approaches for Correlated Systems. Cambridge: Cambridge University Press; 2017. 274 p. DOI: 10.1017/9781316417041.
18. NetKet [Electronic resource]. Available from: <https://www.netket.org>.



*Юсипов Игорь Ильясович* — родился в 1993 году. Окончил Институт информационных технологий, математики и механики Нижегородского государственного университета имени Н. И. Лобачевского (2016). В настоящее время является младшим научным сотрудником кафедры прикладной математики ИИТММ ННГУ. Область научных интересов — открытые квантовые системы, машинное обучение.

Россия, 603950 Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23  
 Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского  
 E-mail: [yusipov.igor@itmm.unn.ru](mailto:yusipov.igor@itmm.unn.ru)  
 ORCID: 0000-0002-0540-9281  
 AuthorID: 979973



*Козинев Евгений Александрович* — родился в 1984 году. Окончил факультет Вычислительной математики и кибернетики ННГУ имени Н. И. Лобачевского, получил степень магистра (2007). Защитил кандидатскую диссертацию на тему «Модели и методы решения информационно-связных задач многокритериальной оптимизации» (2020). Доцент кафедры математического обеспечения и суперкомпьютерных технологий ИИТММ ННГУ. Область научных интересов — методы и программные средства глобальной оптимизации, высокопроизводительные вычисления, параллельное программирование. Опубликовал свыше 40 научных статей по указанным направлениям.

Россия, 603950 Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23  
 Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского  
 E-mail: [evgeny.kozinov@itmm.unn.ru](mailto:evgeny.kozinov@itmm.unn.ru)  
 ORCID: 0000-0001-6776-0096  
 AuthorID: 798759



*Лаптева Татьяна Владимировна* — родилась в 1982 году. Получила степень магистра физики в Луганском национальном университете (Украина, 2005) и степень Dr. rer. nat. в Техническом университете Дрездена (Германия, 2013). Доцент кафедры теории управления и динамики систем ННГУ имени Н. И. Лобачевского. Научные интересы — андерсоновская локализация, делокализация взаимодействующих квантовых частиц в пространственно-неоднородных потенциалах, хаос в гамильтоновых системах высокой размерности, синтетические генные сети, отыскание хаоса, симплектические интеграторы, интегрирование дифференциальных уравнений в частных производных. Опубликовала свыше 40 научных статей по указанным направлениям.

Россия, 603950 Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23  
 Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского  
 E-mail: [tatyana.lapteva@itmm.unn.ru](mailto:tatyana.lapteva@itmm.unn.ru)  
 ORCID: 0000-0002-9172-9424  
 AuthorID: 726354



Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2022. Т. 30, № 3  
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2022;30(3)

Научная статья  
УДК 51-76  
DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-3-276-298

### Построение функции приспособленности, зависящей от множества конкурирующих стратегий, на основе анализа популяционной динамики

О. А. Кузенков

Национальный исследовательский Нижегородский государственный  
университет имени Н. И. Лобачевского, Россия

E-mail: kuzenkov\_o@mail.ru

Поступила в редакцию 8.11.2021, принята к публикации 4.04.2022,  
опубликована 31.05.2022

**Аннотация.** Цель настоящей работы состоит в построении функции приспособленности, зависящей от множества сосуществующих конкурирующих наследственных элементов, на основе популяционной динамики в модели «хищник–жертва» с логистическим ростом жертв. **Материалы и методы.** В работе используется обобщенная модель Вольтерры. Роль хищника играет планктоноядная рыба. В качестве жертв рассматривается множество различных видов зоопланктона, которые отличаются друг от друга наследственными стратегиями ежедневных вертикальных миграций. Модель учитывает внутривидовую конкуренцию жертв. Особенность модели состоит в наличии пар наследственных стратегий, в которых носители первой могут вытеснять носителей второй и наоборот — носители второй вытесняют носителей первой, в зависимости от того, в каком множестве конкурирующих стратегий они сосуществуют. Для восстановления функции приспособленности применяется метод ранжирования, который сводится к классификации упорядоченных пар наследственных стратегий по двум классам «первая стратегия вытесняет вторую» и «вторая вытесняет первую». **Результаты.** В статье представлена новая методика построения функции приспособленности. Методика предполагает два этапа. Сначала восстанавливается функция приспособленности для некоторого конечного подмножества элементов на основе обработки данных долгосрочной динамики их численностей и сравнения их конкурентных преимуществ. На втором этапе выводится форма функции приспособленности для произвольного множества элементов. Здесь используются особенности межвидового взаимодействия, отраженные в модели. С помощью построенной функции приспособленности моделируется эволюционно устойчивый режим суточных вертикальных миграций зоопланктона путем численного решения минимаксной задачи. **Заключение.** Предложенная методика построения функции приспособленности, зависящей от множества конкурирующих стратегий, является достаточно общей и вполне может быть применена для широкого круга моделей популяционной динамики. Построенная в результате моделирования стратегия суточных вертикальных миграций зоопланктона хорошо согласуется с эмпирическими данными.

**Ключевые слова:** функция приспособленности, порядок предпочтительности, ранжирование, модель «хищник–жертва», зоопланктон, ежедневные вертикальные миграции, выживающая стратегия, оптимизация.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 075-15-2021-634).

**Для цитирования:** Кузенков О. А. Построение функции приспособленности, зависящей от множества конкурирующих стратегий, на основе анализа популяционной динамики // Известия вузов. ПНД. 2022. Т. 30, № 3. С. 276–298. DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-3-276-298

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

## Construction of the fitness function depending on a set of competing strategies based on the analysis of population dynamics

O. A. Kuzenkov

National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Russia

E-mail: kuzenkov\_o@mail.ru

Received 8.11.2021, accepted 4.04.2022, published 31.05.2022

**Abstract.** The *purpose* of this work is to construct a fitness function that depends on the set of coexisting competing hereditary elements based on population dynamics in the “predator–prey” model with the logistic growth of prey. *Materials and methods.* The work uses the generalized Volterra model. The planktivorous fish plays the role of a predator. Many different species of zooplankton are considered as prey, which differ from each other in the hereditary strategies of daily vertical migrations. The model takes into account the intraspecific competition of prey. The peculiarity of the model consists of the presence of pairs of hereditary strategies in which the carriers of the first can displace the carriers of the second and vice versa — the carriers of the second can displace the carriers of the first, depending on the set of competing strategies in which they coexist. To restore the fitness function, the ranking method is used, which is reduced to the classification of ordered pairs of hereditary strategies into two classes “the first strategy displaces the second” and “the second displaces the first”. *Results.* The article presents a new methodology for constructing the fitness function. The technique involves two stages. First, the fitness function is reconstructed for a certain finite subset of elements on the basis of processing data on the long-term dynamics and comparing their competitive advantages. At the second stage, the form of the fitness function is derived for an arbitrary set of elements. It uses the features of interspecies interaction reflected in the model. With the help of the constructed fitness function, an evolutionarily stable regime of daily vertical migrations of zooplankton is modeled by numerically solving the minimax problem. *Conclusion.* The proposed method for constructing a fitness function that depends on a set of competing strategies is quite general and can be applied to a wide range of models of population dynamics. The strategy of diel vertical migrations of zooplankton constructed as a result of modeling is in good agreement with empirical data.

**Keywords:** fitness function, order, ranking, predator–prey model, zooplankton, daily vertical migrations, survival strategy, optimization.

**Acknowledgements.** The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 075-15-2021-634).

**For citation:** Kuzenkov OA. Construction of the fitness function depending on a set of competing strategies based on the analysis of population dynamics. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics.* 2022;30(3):276–298.

DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-3-276-298

*This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).*

### Введение

В настоящее время методы математического моделирования широко используются для изучения биологических систем и процессов [1–4]. Математическое исследование сложной динамики наряду со средствами интеллектуального анализа данных позволяет находить объяснение наблюдаемым феноменам, предсказывать поведение реальной системы, осуществлять на нее целенаправленное воздействие [5–9].

Современные подходы к эволюционному моделированию в биологии часто опираются на максимизацию определенного критерия, отражающего конкурентные преимущества наследственных элементов в биологическом сообществе (например, генотипов, поведенческих стратегий и т. п.) [10–12]. Эта методология является математической реализацией фундаментальной дарвиновской идеи «выживания наиболее приспособленных» [13]. Соответствующий критерий называется функцией приспособленности. Сравнимая приспособленность разных наследственных

единиц, можно прогнозировать результаты эволюции, исследовать направленность изменения экологических систем. Максимизация функции приспособленности дает возможность выявлять эволюционно устойчивые наследственные стратегии поведения, то есть стратегии, которые сохраняются в сообществе неограниченно долго на фоне появления возможных мутаций [14].

Однако существует проблема математической формализации функции приспособленности в виде некоторого математического выражения. Разные авторы предлагают различное понимание функции приспособленности, например, ожидаемое индивидуальное репродуктивное значение, обобщенная энтропия, некоторый аналог функции Ляпунова и т. д. [15–19]. Разные определения функции приспособленности порой приводят к противоречивым предсказаниям эволюционных результатов [12, 16].

Один из наиболее общих подходов к формализации функции приспособленности был предложен А. Горбанем, который определил ее в уравнениях динамики мер с наследованием как среднее временное значение удельной скорости воспроизводства [20–22]. Использование такого определения позволило решить ряд задач, в частности, в общей терапии рака [23]. Этот подход позже был развит в работах [24–26], где предложены аналитические алгоритмы вывода функции приспособленности для широких классов моделей. Однако нередко параметры и коэффициенты, фигурирующие в модели, не могут быть измерены эмпирически, и сами по себе предполагают идентификацию, что затрудняет восстановление функции приспособленности. Поэтому представляется интересным построение функции приспособленности непосредственно на основании известной популяционной динамики.

Если приспособленность понимается как среднее временное значение удельной скорости воспроизводства, то ее можно формально рассчитать для каждого наследственного элемента по результатам долгосрочной динамики популяции. Но в этом случае прогностический эффект функции приспособленности будет невелик, поскольку она будет отражать уже известные результаты эволюции. Кроме того, получить данные долгосрочного изменения численности для всех возможных наследственных элементов априори практически невозможно, в действительности можно располагать информацией о численностях лишь для некоторого конечного подмножества таких элементов. Поэтому более содержательной представляется задача восстановления функции приспособленности для интересующего множества элементов на основе популяционной динамики в некотором подмножестве элементов.

Такая постановка проблемы является частным случаем задачи ранжирования, которая, в общем случае, заключается в следующем [27, 28]. задается конечное подмножество элементов из компактного метрического пространства, на нем некоторым образом определяется порядок предпочтительности. Цель состоит в том, чтобы продолжить введенный порядок на все пространство. Порядок может определяться путем задания функции сравнения  $J$ , большие значения которой соответствуют лучшим элементам (то есть  $J(v) > J(w)$  тогда и только тогда, когда  $v$  лучше  $w$ ). В этом случае решение задачи ранжирования сводится к идентификации функции сравнения  $J$ .

В настоящее время существует широкий набор различных алгоритмов ранжирования на основе методов машинного обучения [29–31]. Одним из наиболее популярных является попарный подход, который состоит в сведении задачи ранжирования к классификации упорядоченных пар наследственных элементов «первый, второй» по двум классам: «первый элемент лучше второго» и «второй элемент лучше первого» [32, 33].

Было показано, что такие алгоритмы можно успешно применять для реконструкции функции биологической приспособленности по наблюдаемой популяционной динамике для конечного подмножества конкурирующих элементов [34]. Эти элементы ранжируются в соответствии с их конкурентными преимуществами [25]. Функция приспособленности вводится как функция сравнения, отражающая установленный порядок конкурентных преимуществ.

Отметим, что задача ранжирования наследственных элементов решалась ранее при существенном предположении о том, что приспособленность не зависит ни от начального состояния популяции, ни от избранного множества конкурирующих элементов [34]. Однако, в общем случае, конкурентные преимущества и, соответственно, функция приспособленности, могут зависеть как от того, так и от другого. Например, возможна ситуация, когда в одной и той же паре наследственных элементов первый элемент может быть как лучше второго, так и хуже второго в зависимости от того, в каком множестве конкурирующих элементов они сосуществуют. Такая ситуация имеет место в модели «хищник — жертва» с логистическим ростом жертв [35]. Может происходить циклическое изменение порядка предпочтительности при соответствующем изменении множеств конкурирующих элементов [24, 26, 36]. Очевидно, что непосредственное применение технологий машинного обучения для решения задачи ранжирования в таких случаях невозможно, поскольку порядок конкурентных преимуществ, установленный для обучающей выборки, может не сохраняться при переходе к популяции с более богатым множеством наследственных элементов. Для установления зависимости порядка конкурентных преимуществ от множества сосуществующих элементов приходится учитывать особенности межвидового взаимодействия, которые отражаются в уравнениях математической модели.

Цель настоящей работы состоит в построении функции приспособленности, зависящей от множества сосуществующих конкурирующих наследственных элементов, на основе популяционной динамики и с учетом гипотез межвидового взаимодействия в модели «хищник–жертва» с логистическим ростом жертв. Разработанная методика применяется для моделирования эволюционно устойчивых стратегий суточных вертикальных миграций (СВМ) зоопланктона.

Феномен суточных вертикальных миграций (СВМ) водных организмов был открыт двести лет назад [15]. Было установлено, что большое количество видов зоопланктона ежедневно перемещается вверх и вниз между глубинными и приповерхностными слоями воды [37–39]. СВМ зоопланктона играет важную роль в динамике органического вещества океана. Этот феномен считается наиболее значимым синхронным движением биомассы на Земле, вносит существенный вклад в углеродный обмен и потенциально может влиять на климат в планетарном масштабе [40–45]. Выявление причин и механизмов СВМ зоопланктона является важной проблемой в современной экологии, однако многие аспекты СВМ до сих пор еще не поняты. Изучению особенностей наследственного поведения зоопланктона посвящено большое количество исследований [13, 46–54]. Привлечение концепции приспособленности позволяет объяснить ряд важных особенностей, в частности, зависимость поведения от возраста организма [55, 56]. Таким образом, задача построения функции приспособленности приобретает все большее значение для моделирования суточных вертикальных миграций.

## 1. Материалы и методы

**1.1. Математическая модель.** В настоящей работе закономерности СВМ зоопланктона исследованы в рамках обобщенной модели Вольтерры «хищник–жертва» с несколькими видами жертв и одним хищником [57]. Здесь роль хищника играет планктоноядная рыба. В качестве жертв рассматривается множество  $n$  различных видов зоопланктона, которые отличаются друг от друга наследственными стратегиями вертикальных миграций  $v_i, i = 1, \dots, n$ ;  $Q$  — соответствующее множество различных наследственных стратегий. Каждая стратегия  $v_i$  представляет собой режим периодического изменения вертикальной координаты  $x$  положения зоопланктона в течение суток, то есть функцию  $x(\tau)$ , где  $\tau = 0$  соответствует 12 часам дня,  $\tau = 0.5$  соответствует 24:00, а  $\tau = 1$  соответствует 12 часам следующего дня;  $x$  — глубина миграции, измеренная в метрах, уровень  $x = 0$  соответствует поверхности воды. Мы предполагаем, что  $x(\tau)$  — непрерывно дифференцируемая функция на отрезке  $[0, 1]$ , удовлетворяющая условиям  $x(0) = x(1)$ .

Обозначим  $n$  — количество различных видов зоопланктона в сообществе, реализующих различные наследственные стратегии поведения;  $\rho = \rho_i(t)$  — численность субпопуляции зоопланктона, реализующего стратегию  $v_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ ;  $F(t)$  — численность популяции хищника,  $t$  — время динамики популяции. Рассматривается модель в виде следующей системы обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \rho'_i(t) &= r_i \rho_i(t) - c_i \rho_i(t) F(t) - \rho_i(t) \sum_{j=1}^n \rho_j(t), \quad i = 1, \dots, n \\ F' &= F(t) \sum_{j=1}^n c_j \rho_j(t) - F(t). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $r_i$  — коэффициент размножения  $i$ -го вида жертвы в благоприятных условиях при отсутствии хищника и конкуренции,  $c_i$  — скорость атак хищников на  $i$ -й вид жертвы; последнее слагаемое в первом уравнении отражает конкуренцию зоопланктона. Здесь предполагается, что лимитирование роста сообщества зоопланктона подчиняется гипотезе Ферхюльста, согласно которой дополнительная смертность в результате конкуренции пропорциональна общей численности сообщества. Эта численность математически представляет собой сумму численностей субпопуляций жертв, где переменной суммирования служит номер соответствующей стратегии. Соответственно все коэффициенты конкуренции жертв (как внутривидовой, так и межвидовой) полагаются равными единице. Для простоты смертность хищника и коэффициент конверсии пищи в потомство хищника устанавливаются равными единице. Исследование популяционной динамики для модели «хищник — две жертвы» проводилось в [57]. Однако случай равенства коэффициентов конкуренции отдельно не рассматривался. В работе [58] было проведено более подробное исследование в том числе и этого случая. Было установлено, что в зависимости от соотношений коэффициентов модели могут наблюдаться различные качественные режимы поведения: выживание только одной жертвы из двух или неограниченно долгое сосуществование двух жертв. Аналогичные результаты будут справедливы и при большем количестве жертв. Чтобы установить, какая именно жертва или пара жертв будет выживать, нужно найти состояния равновесия системы и исследовать их устойчивость. В общем случае нужно исследовать устойчивость  $n + C_n^2 = n + n(n-1)/2$  состояний равновесия. При достаточно большом значении  $n$  решение этой задачи становится достаточно громоздким. Кроме того существует вторая, более важная, трудность. Дело в том, что непосредственно эмпирически измерить значения коэффициентов модели  $r_i$  и  $c_i$  практически невозможно. Эти характеристики являются следствиями реализации наследственных поведенческих стратегий. В связи с этим здесь развивается другой подход к исследованию предельного поведения модели, основанный на использовании функции приспособленности. Подробно теоретические основы для построения функции приспособленности описаны в [26]. Приведем здесь основные моменты, необходимые для дальнейшего исследования.

**1.2. Построение функции приспособленности.** Основная гипотеза сравнения приспособленности состоит в следующем. Вид  $i$  (и, соответственно, наследственная стратегия  $v_i$ ) считается более приспособленным, чем вид  $j$  (стратегия  $v_j$ ), если отношение  $\rho_j(t)/\rho_i(t)$  стремится к нулю с течением времени, то есть

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \rho_j(t)/\rho_i(t) = 0. \quad (2)$$

Преимущество такого подхода заключается в возможности эмпирического сравнения приспособленностей на основе наблюдаемой динамики численностей. В случае сообщества ограниченной численности (что в действительности всегда имеет место) из (2) следует, что численность  $j$ -го (худшего) вида будет стремиться к нулю, то есть худший вид будет вытесняться из сообщества.

Действительно, из соотношения (2) и ограниченности величины  $\rho_i(t)$  следует справедливость предельного перехода

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \rho_j(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \rho_i(t) \rho_j(t) / \rho_i(t) = 0. \quad (3)$$

Таким образом, субпопуляция, реализующая стратегию  $v_i$  будет вытеснять субпопуляцию, реализующую стратегию  $v_j$  [26].

Обратим внимание, что установленный порядок существенно зависит от множества  $Q$ : в одной и той же паре стратегий он может поменяться на противоположный при изменении множества  $Q$  [36].

В [26] было показано, что если существуют средние временные удельные скорости роста численности

$$J(v_i) \equiv \langle \rho'_i / \rho_i \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{t_0}^T \rho'_i(t) / \rho_i(t) dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\ln(\rho_i(T))}{T} \quad (4)$$

и  $J(v_i) > J(v_j)$ , то  $i$ -й вид будет лучше  $j$ -го. В самом деле, пусть

$$\langle \rho'_i / \rho_i \rangle - \langle \rho'_j / \rho_j \rangle > 0. \quad (5)$$

Неравенство (5) с учетом (4) можно переписать в виде

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\ln(\rho_i(T)) - \ln(\rho_j(T))}{T} > 0. \quad (6)$$

Из (6) следует, что

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \ln(\rho_i(T) / \rho_j(T)) = +\infty, \quad (7)$$

откуда, согласно определению (2), вытекает, что  $i$ -й вид лучше  $j$ -го. Таким образом, функция  $J(v_i)$  играет роль функции сравнения или функции приспособленности: сравнивая значения этой функции для разных видов, можно узнать, какой вид будет более приспособленным.

Из уравнений модели (1) легко получить выражение для средней по времени удельной скорости роста численности жертвы  $\langle \rho'_i(t) / \rho_i(t) \rangle$ . Обратим внимание, что добавление одной и той же константы к функции приспособленности не меняет отражаемый ею порядок конкурентной предпочтительности. Соответственно, измененная таким образом функция будет сохранять свойства той же самой функции сравнения. Вследствие этого из полученного выражения можно исключить общее для всех видов среднее временное значение суммы численностей видов и использовать в дальнейшем более простое выражение для функции приспособленности

$$J(v_i, Q) = r_i - \langle F(t, Q) \rangle c_i. \quad (8)$$

Здесь  $\langle F(t, Q) \rangle$  обозначает среднее по времени значение численности хищника. Дальнейшее исследование проводится в предположении существования временного среднего  $\langle F(t, Q) \rangle$ . Если существует предел функции  $F(t)$  при  $t$ , стремящемся к бесконечности, то ее временное среднее  $\langle F(t, Q) \rangle$  совпадает с этим пределом. Этот предел легко найти, вычислив координаты устойчивого состояния равновесия модели. Обратим внимание, что  $\langle F(t, Q) \rangle$  определяется, исходя из выживающего вида жертвы, который в свою очередь определяется множеством  $Q$  конкурирующих стратегий. Если множество  $Q$  изменится, то лучшая (выживающая) стратегия, вообще говоря, будет другой, и это изменит как функцию приспособленности (1), так и задаваемый ею порядок конкурентной предпочтительности.

Эмпирические данные свидетельствуют о том, что СВМ зоопланктона в основном определяются следующими факторами окружающей среды: распределением пищи (фитопланктона)  $E(x)$

по глубине  $x$ , плотностью распределения хищников  $S_x(x)$ , распределением неблагоприятных факторов обитания (температуры и сероводорода)  $G(x)$ , а также суточной активностью хищника  $S_\tau(\tau)$  [15, 16]. Все эти факторы можно рассматривать как непрерывные функции вертикальной координаты  $x$  или времени суток  $\tau$ . Соответственно, следующие четыре макропараметра оказывают наибольшее влияние на выживание субпопуляции зоопланктона [55, 56].

$$\begin{aligned} M_1(v_i) &= \int_0^1 E(x(\tau)) d\tau, & M_2(v_i) &= - \int_0^1 S_x(x(\tau)) S_\tau(\tau) d\tau, \\ M_3(v_i) &= - \int_0^1 (\dot{x}(\tau))^2 d\tau, & M_4(v_i) &= - \int_0^1 G(x(\tau)) d\tau. \end{aligned} \quad (9)$$

Приведенные выше параметры имеют следующий биологический смысл:  $M_1$  — количество потребляемой пищи (фитопланктона) в сутки;  $M_2$  — суточная смертность от хищничества;  $M_3$  — метаболические затраты на осуществление вертикальных миграций (мы предполагаем, что они пропорциональны кинетической энергии движения);  $M_4$  — потери зоопланктона при входе в приповерхностные или глубинные воды, которые характеризуется неблагоприятными температурными и сероводородными условиями.

Коэффициенты модели  $r_i$  и  $c_i$  определяются этими параметрами. Будем использовать простейшие линейные аппроксимации коэффициентов  $c_i$  и  $r_i$

$$r_i = \lambda_1 M_1 + \lambda_3 M_3 + \lambda_4 M_4, \quad c_i = -\gamma M_2, \quad (10)$$

где весовые коэффициенты  $\lambda_k, \gamma$  отражают влияние каждого ключевого фактора и не зависят от стратегии  $v_i$  и множества  $Q$ .

В этом случае функция приспособленности имеет вид

$$J(v, \rho_0) = \lambda_1 M_1 + \lambda_3 M_3 + \lambda_4 M_4 + \langle F(Q) \rangle \gamma M_2 \quad (11)$$

или, если ввести обозначение  $\lambda_2 = \langle F(Q) \rangle \gamma$ , — вид линейной свертки вектора ключевых параметров  $M = (M_1, \dots, M_4)$ :

$$J(M, Q) = \sum_{k=1}^4 \lambda_k M_k. \quad (12)$$

Тогда задача идентификации функции приспособленности (11) при фиксированном множестве конкурирующих стратегий  $Q$  сводится к определению значений коэффициентов свертки (12). Эта задача может быть решена на основе данных наблюдений.

**1.3. Идентификация коэффициентов функции приспособленности.** Пусть имеются долгосрочные данные о поведении экосистемы «рыба–зоопланктон» с некоторым известным конечным множеством наследственных стратегий  $Q_0 = \{v_1, \dots, v_m\}$ , то есть данные о динамике численностей  $\rho_1(t), \dots, \rho_m(t)$  и  $F(t)$ . Кроме того, пусть известны функции внешней среды  $E(x)$ ,  $S_\tau(\tau)$ ,  $S_x(x)$ ,  $G(x)$ . Тогда можно найти значения ключевых параметров  $M(v_i)$  для всех стратегий. Далее, по этим данным можно оценить пределы отношений  $\rho_j(t)/\rho_i(t)$  для всех пар  $(v_j, v_i)$  и упорядочить стратегии в соответствии с их конкурентными преимуществами в рамках данного множества  $Q_0$ . В случае, когда  $v_i$  лучше чем  $v_j$ , должно выполняться неравенство  $J(M(v_i), Q_0) > J(M(v_j), Q_0)$ , соответственно коэффициенты  $\lambda_k$  должны удовлетворять неравенству

$$\sum_{k=1}^4 \lambda_k M_k(v_i) > \sum_{k=1}^4 \lambda_k M_k(v_j). \quad (13)$$

Каждая пара стратегий будет давать неравенство, аналогичное (13). Теперь можно оценить коэффициенты функции приспособленности, решая полученную систему линейных неравенств

относительно коэффициентов  $\lambda$ . После этого, зная предельное значение численности хищника, можно восстановить коэффициент  $\gamma$  по коэффициенту  $\lambda_2$ .

Для решения системы линейных неравенств вида (13) можно использовать методы линейного программирования [35]. Однако классические методы чрезвычайно чувствительны к точности значений ключевых параметров. Небольшая погрешность в ключевых параметрах, неизбежно возникающая из-за неточности измерений, может привести к несовместности системы линейных неравенств.

Здесь для устранения указанных трудностей мы используем попарный подход ранжирования для нахождения коэффициентов с помощью современных методов распознавания образов [59]. Поставим в соответствие паре  $(v_i, v_j)$  точку  $(M(v_i), M(v_j))$ , и паре  $(v_j, v_i)$  — точку  $(M(v_j), M(v_i))$  в четырехмерном пространстве параметров. Тогда гиперплоскость

$$\sum_{k=1}^4 \lambda_k M_k = 0 \quad (14)$$

должна отделять эти точки друг от друга. Рассмотрев всевозможные пары стратегий из множества  $Q_0$ , получаем два множества точек в четырехмерном пространстве, которые должны лежать по разные стороны от гиперплоскости (14). Таким образом, задача определения коэффициентов  $\lambda$  функции приспособленности сводится к нахождению компонент нормали гиперплоскости, разделяющей два множества точек в четырехмерном пространстве. Эта типичная задача бинарной классификации может быть решена с помощью хорошо зарекомендовавших себя методов [59]. В частности, могут быть применены технологии, использующие нейронные сети [34].

Предложенная методика позволяет восстановить функцию приспособленности для множества  $Q_0$ . Однако она не дает возможности продолжить эту функцию за пределы указанного множества. Известно, что в рамках рассматриваемой модели порядок конкурентных преимуществ может измениться при изменении множества конкурирующих стратегий  $Q$ . Таким образом, остается открытым вопрос о построении единой функции, которая выражала бы порядок конкурентной предпочтительности для любого множества сосуществующих конкурирующих стратегий  $Q$ . Построив такую функцию, можно находить выживающую, эволюционно устойчивую стратегию путем максимизации этой функции на множестве  $Q$ .

## 2. Результаты

**2.1. Восстановление функции приспособленности для фиксированного множества стратегий.** Решение задачи идентификации функции приспособленности для SVM зоопланктона было проведено на основе эмпирических данных, собранных в результате многолетних наблюдений (июль 2011, июль 2014, октябрь 2016, ноябрь 2019) за поведением зоопланктона (*Calanus euxinus*, *Pseudocalanus elongatus* и др.) в акватории Черного моря. Обзоры данных приведены в источниках [38, 55, 60]. Для сравнения также использовались данные, представленные в [61]. Для пополнения обучающей выборки наследственных стратегий использовалась также методика, описанная в [34], в соответствии с которой генерировались дополнительные заведомо неоптимальные стратегии.

Кроме того, привлекались данные по поведению планктоноядных рыб (*Sprattus sprattus* и др.), данные по распределению фитопланктона и температурному распределению в слоях воды, уровням концентрации сероводорода [15, 16, 55]. Применялись два вида аппроксимаций функций внешних факторов  $E$ ,  $S_x$  и  $G$ . Самыми простыми являются линейные и квадратичные аппроксимации:  $E = \sigma_1(x + D)$ ,  $S_x = \sigma_2(x + D)$ ,  $-D < x < 0$ ;  $G = (x + D_0)^2$ . Здесь  $D$  — максимальная

глубина погружения, определяемая уровнем сероводородного слоя, на которой нет ни хищников, ни пищи;  $D_0$  — наиболее благоприятная глубина для существования зоопланктона, определяемая температурой и концентрацией сероводорода;  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  — константы, соответствующие скорости убывания количества пищи и хищников при увеличении глубины. Из эмпирических данных были найдены значения соответствующих констант:  $D = 140$  м,  $D_0 = 80$  м,  $\sigma_1 = 0.367$ ,  $\sigma_2 = 0.833$ .

Более точными являются аппроксимации гиперболическими функциями

$$E(x) = \sigma_1(\tanh(\xi_1(x + D_1)) + 1), \quad S_x(x) = \sigma_2(\tanh(\xi_2(x + D_1)) + 1), \\ G(x) = \cosh(\xi_3(x + D_0)).$$

Здесь  $D_1, D_0$  — характерные глубины,  $\sigma_1, \sigma_2, \xi_1, \xi_2, \xi_3$  — константы. Были использованы следующие значения параметров:  $D_0 = 80$  м,  $D_1 = 40$  м,  $\sigma_1 = 0.25$ ,  $\sigma_2 = 0.003$ ,  $\xi_1 = \xi_2 = 0.025$  1/м и  $\xi_3 = 0.2$  1/м.

В обоих случаях использовалась аппроксимация функции  $S_\tau(\tau)$  в виде синусоидальной зависимости:  $S_\tau(\tau) = \cos(2\pi\tau) + 1$ ,  $0 < \tau < 1$ .

Для решения задачи идентификации функции приспособленности был построен однослойный перцептрон [34]. При создании и работе с сетью использовалось следующее программное обеспечение: библиотека машинного обучения Scikit-learn для Python; библиотека Pandas (для обработки и анализа данных) и библиотека Numpy (для работы с большими многомерными массивами).

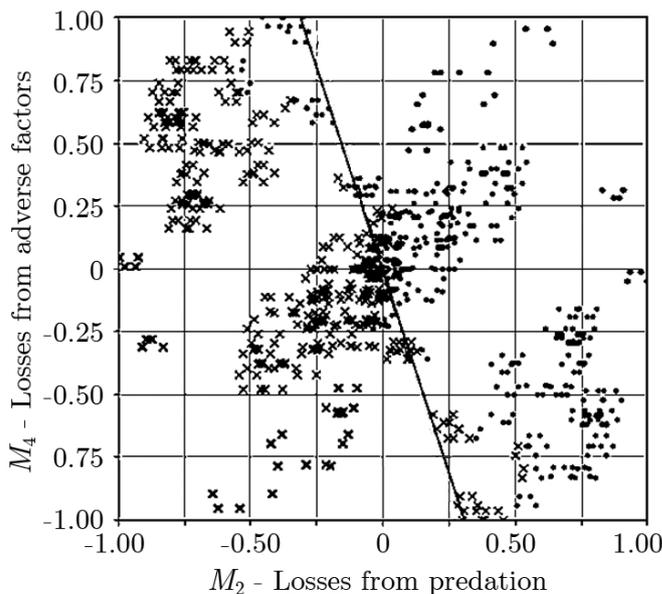


Рис. 1. Проекция точек обучающей выборки на плоскость переменных  $M_2, M_4$ . Крестиками отмечены точки, соответствующие упорядоченным парам стратегий, в которых первая стратегия  $v$  лучше второй  $w$ , черными кружками — пары, в которых вторая стратегия лучше первой. Прямая линия соответствует пересечению построенной классификатором разделяющей гиперплоскости и данной плоскости переменных  $M_2, M_4$

Fig. 1. Projections of the points of the training sample on the plane  $M_2, M_4$ . The crosses mark the points corresponding to the pairs  $(v, w)$  for which  $v$  is better than  $w$ ; the black circles mark the points for which  $v$  is worse than  $w$ . The straight line corresponds to the intersection of the separating hyperplane and the plane of parameters  $M_2$  and  $M_4$

Обучающая выборка содержала 202 различные стратегии. Рассматриваемая выборка была разделена на обучающую часть (70%) и часть, используемую для тестирования (30%), с помощью модуля `train_test` из библиотеки `sklearn.modelselection`. Для оценки эффективности обучения использовался модуль `Logloss`, который показал хороший результат (`logloss = 0.01701`). Использовался также другой способ проверки эффективности обучения с помощью модуля `sklearn.model`. В этом случае успешность обнаружения объекта 99.89%.

На рис. 1 проиллюстрирована процедура восстановления коэффициентов функции приспособленности путем решения задачи классификации. Здесь представлена построенная бинарным классификатором разделяющая гиперплоскость для двух классов пар стратегий. Коэффициенты этой гиперплоскости являются искомыми коэффициентами функции приспособленности.

Реализация искусственных нейронных сетей для линейно-квадратичной аппроксимации внешних факторов пара-

метризации дает следующие значения коэффициентов:  $\lambda_1 = 3$ ,  $\gamma = 0.0017$ ,  $\lambda_3 = 2.5e-5$ ,  $\lambda_4 = 0.01$ ; для гиперболической аппроксимации — следующие значения:  $\lambda_1 = 3$ ,  $\gamma = 1.2$ ,  $\lambda_3 = 7.5e-8$ ,  $\lambda_4 = 0.1e-4$ .

Обратим внимание, что хотя задача идентификации функции приспособленности решалась с помощью нейронной сети для фиксированного множества  $Q_0$  (обучающей выборки), полученные коэффициенты  $\lambda_1$ ,  $\gamma$ ,  $\lambda_3$ ,  $\lambda_4$  не зависят от этого множества. Их значения не изменятся при переходе к любому другому интересующему нас множеству стратегий  $Q$ . Покажем, как на основе полученной информации об идентифицированных коэффициентах можно предсказать лучшую стратегию  $v_0$  для любого множества  $Q$  конкурирующих стратегий. Заметим, что каждая стратегия  $v$  из  $Q$  характеризуется значениями двух коэффициентов  $r_v$  и  $c_v$ . Геометрически это соответствует точке на плоскости переменных  $r$  и  $c$ . Множеству стратегий  $Q$  будет соответствовать множество точек  $W$  на этой плоскости. При этом может иметь место случай, когда нескольким стратегиям из  $Q$  соответствует одна и та же точка в  $W$ . Функционал  $J$ , задаваемый формулой (8), можно рассматривать как линейную функцию двух переменных  $c$  и  $r$ , заданную в области  $W$ ; коэффициент  $\langle F \rangle$  этой линейной функции зависит от области  $W$ .

**2.2. Восстановление функции приспособленности в случае единственной выживающей стратегии.** Рассмотрим ситуацию, когда существует единственная точка  $(c_0, r_0)$  в  $W$ , соответствующая выживающим стратегиям  $v_0$ . Находя координаты единственного устойчивого состояния равновесия модели (1), получаем выражение для предельного значения количества хищника

$$\langle F(Q) \rangle = \frac{r_0}{c_0} - \frac{1}{c_0^2}. \quad (15)$$

Стратегия  $v_0$  будет лучшей в  $Q$  относительно другой стратегии  $w$  с соответствующими коэффициентами  $c_w, r_w$ , если выполняется неравенство  $J(w, Q) < J(v_0, Q)$ , то есть

$$r_w - c_w \left( \frac{r_{v_0}}{c_{v_0}} - \frac{1}{c_{v_0}^2} \right) < r_{v_0} - c_{v_0} \left( \frac{r_{v_0}}{c_{v_0}} - \frac{1}{c_{v_0}^2} \right) = \frac{1}{c_{v_0}}. \quad (16)$$

Из (16) следует, что для наилучшей стратегии  $v_0$  будет справедливо соотношение

$$\min_{w \in Q} \left( \frac{1}{c_{v_0}} - r_w + c_w \left( \frac{r_{v_0}}{c_{v_0}} - \frac{1}{c_{v_0}^2} \right) \right) = 0. \quad (17)$$

Если стратегия  $v$  не является наилучшей для множества  $Q$ , то найдется хотя бы одна стратегия  $w$  из  $Q$ , для которой выполнится неравенство

$$r_w - c_w \left( \frac{r_v}{c_v} - \frac{1}{c_v^2} \right) > \frac{1}{c_v}. \quad (18)$$

Неравенство (18) в свою очередь влечет справедливость следующего соотношения

$$\min_{w \in Q} \left( \frac{1}{c_v} - r_w + c_w \left( \frac{r_v}{c_v} - \frac{1}{c_v^2} \right) \right) < 0. \quad (19)$$

Объединяя (17) и (19), получаем, что для нахождения выживающей стратегии  $v_0$  в  $Q$ , нужно максимизировать выражение

$$J_0(v) = \min_{w \in Q} \left( \frac{1}{c_v} - r_w + c_w \left( \frac{r_v}{c_v} - \frac{1}{c_v^2} \right) \right) \quad (20)$$

по всем стратегиям  $v$  во множестве  $Q$ . Выражение (20) можно рассматривать как обобщенную функцию приспособленности для множества  $Q$ . Учитывая линейную зависимость коэффициентов  $c$  и  $r$  от ключевых параметров, можно выразить функцию (20) через них

$$J_0(v) = \min_{w \in Q} \left( \frac{1}{\gamma M_2(v)} - (\lambda_1 M_1(w) + \lambda_3 M_3(w) + \lambda_4 M_4(w)) + \right. \\ \left. + \gamma M_2(w) \left( \frac{\lambda_1 M_1(v) + \lambda_3 M_3(v) + \lambda_4 M_4(v)}{\gamma M_2(v)} - \frac{1}{(\gamma M_2(v))^2} \right) \right). \quad (21)$$

Очевидно, что обобщенная функция приспособленности будет меняться при изменении множества  $Q$ , но значения коэффициентов, фигурирующих в ее выражении, меняться не будут. Для нахождения эволюционно устойчивой стратегии, соответствующей выбранному множеству конкурирующих стратегий, нужно решить оптимизационную максиминную задачу.

Необходимо подчеркнуть еще одну очень важную особенность обобщенной функции приспособленности  $J_0$ : на выживающей стратегии ее значение равно нулю. Соответственно для всех неоптимальных стратегий ее значение отрицательно. Если при решении задачи максимизации обобщенной функции приспособленности получен ответ с отрицательным наибольшим значением, то это говорит о том, что единственной точки во множестве  $W$ , соответствующей выживающим

стратегиям, не существует. В Таблице приведен пример множества из четырех конкурирующих стратегий с соответствующими значениями  $c$  и  $r$ . Для каждой стратегии рассчитано значение функции  $J_0$  по формуле (20). Отсюда видно, что ни на одной стратегии эта функция не принимает нулевого значения. В этом случае есть, по крайней мере, две различные точки в  $W$ , соответствующие различным выживающим стратегиям. Найти их путем оптимизации функционала  $J_0$  невозможно. Этот случай требует отдельного исследования.

Таблица. Пример системы с двумя выживающими стратегиями  
Table. Example of the system with two surviving strategies

	$c$	$r$	$J_0$	$J_2$
$v_1$	2	2	-0.125	0
$v_2$	4.5	4	-0.104	0
$v_3$	3	2.5	-0.433	0.3
$v_4$	5	4	-0.380	0.4

**2.3. Восстановление функции приспособленности в случае пары выживающих стратегий.** Пусть существуют, по крайней мере, две различные выживающие стратегии  $v_0$  и  $v^*$ , которым соответствуют две различные точки  $(c_0, r_0)$  и  $(c^*, r^*)$  во множестве  $W$ , и которые, тем не менее, имеют равные значения приспособленности, то есть

$$r^* - \langle F(Q) \rangle c^* = r_0 - \langle F(Q) \rangle c_0. \quad (22)$$

Из равенства (22) можно получить выражение для предельного значения количества хищника

$$\langle F(Q) \rangle = \frac{r^* - r_0}{c^* - c_0}. \quad (23)$$

Аналогично случаю выживания одной стратегии показывается, что для любой наилучшей стратегии  $v_0$  (или  $v^*$ ) будет справедливо соотношение

$$\min_{w \in Q} J_2(v_0, v^*, w) = \min_{w \in Q} \left( \frac{r_0 c^* - r^* c_0}{c^* - c_0} - r_w + \frac{r^* - r_0}{c^* - c_0} c_w \right) = 0. \quad (24)$$

Если пара стратегий  $v, u$  с соответствующими коэффициентами  $(c_v, r_v), (c_u, r_u)$  не является наилучшей для множества  $Q$ , то для нее будет справедливо следующее соотношение:

$$\min_{w \in Q} J_2(v, u, w) = \min_{w \in Q} \left( \frac{r_v c_u - r_u c_v}{c_u - c_v} - r_w + \frac{r_u - r_v}{c_u - c_v} c_w \right) < 0. \quad (25)$$

Сопоставляя (24) и (25), приходим к выводу, что для нахождения пары лучших стратегий в  $Q$ , нужно максимизировать выражение

$$J_1(v, u) = \min_{w \in Q} \left( \frac{r_v c_u - r_u c_v}{c_u - c_v} - r_w + \frac{r_u - r_v}{c_u - c_v} c_w \right) < 0 \quad (26)$$

по всем стратегиям  $v$  и  $u$  во множестве  $Q$  с соответствующими коэффициентами  $(c_v, r_v)$  и  $(c_u, r_u)$ , то есть максимизировать функционал  $J_1$ , заданный формулой (26), на декартовом произведении  $Q^2$ . Выражение (26) можно рассматривать как обобщенную функцию приспособленности для пар стратегий из множества  $Q$ . Учитывая линейную зависимость коэффициентов  $c$  и  $r$  от ключевых параметров, можно выразить функцию (26) через них аналогично (21).

Максимизация функционала  $J_1$  позволяет найти все возможные выживающие пары (даже если такая пара не единственна). Отметим, что для наилучшей пары значение функционала  $J_1$  равно нулю.

В Таблице приведено значение функционала  $J_2(w, v_1, v_2)$  при разных стратегиях  $w$  из рассматриваемого множества четырех стратегий. Из приведенных значений видно, что наименьшее значение функционала  $J_2$  достигается при  $w = v_1$  или  $w = v_2$ , где он равен нулю. Отсюда следует, что функционал  $J_1$  на паре  $(v_1, v_2)$  принимает значение 0. Но ноль является абсолютным максимумом этого функционала, большего значения он не принимает никогда. Поэтому пара  $(v_1, v_2)$  наилучшая.

Отметим, что если множество  $W$  содержит более двух разных точек, соответствующих выживающим стратегиям, то на всех этих точках функционал  $J$  принимает равное максимальное значение. Тогда в силу линейности функции  $J$  по переменным  $r$  и  $c$  все эти точки должны лежать на одной прямой. Все такие точки могут быть найдены путем максимизации функционала  $J_1$  и не требуют развития иной методики. Однако на практике такой случай представляется маловероятным. Ведь он требует точного линейного согласования значений коэффициентов (и ключевых параметров) для множества из более чем двух различных стратегий. Любое сколь угодно малое отклонение от этих значений приведет к разрушению согласования, что повлечет за собой вытеснение всех стратегий кроме двух или даже одной.

**2.4. Случай строго выпуклого множества конкурирующих стратегий.** Докажем еще одно важное свойство: если множество  $W$  строго выпуклое, в этом множестве существует единственная точка, соответствующая наилучшей (выживающей стратегии). Иными словами, при поиске выживающей стратегии для такого множества нужно решать только задачу максимизации функционала  $J_0$ .

Действительно, предположим, что в строго выпуклом множестве  $W$  существуют, по крайней мере, две различные точки  $(c_0, r_0)$  и  $(c^*, r^*)$ , соответствующие различным выживающим стратегиям  $v_0$  и  $v^*$ . В этом случае, как было показано выше, функция приспособленности имеет вид

$$J(w) = r_w - \frac{r^* - r_0}{c^* - c_0} c_w. \quad (27)$$

Функция (27) линейна по переменным  $r_w$  и  $c_w$ , поэтому она принимает одно и то же максимальное значение  $J(v_0)$  не только в точках  $(c_0, r_0)$  и  $(c^*, r^*)$ , но и во всех точках отрезка, соединяющего их. Поскольку множество  $W$  строго выпуклое, то все точки этого отрезка принадлежат  $W$ , а следовательно, соответствуют некоторым стратегиям из множества  $Q$ , которые также будут выживающими. Все точки этого отрезка, кроме концов, должны быть внутренними точками множества  $W$ , то есть у любой такой точки есть малая окрестность, целиком включенная в  $W$ . В силу линейности  $J$  как функции двух аргументов  $c$  и  $r$ , в этой окрестности есть точки с

большими значениями  $J$ , чем  $J(v_0)$ , а это противоречит тому, что  $J(v_0)$  — максимальное значение функции приспособленности в области  $W$ .

Рассмотрим вопрос о выживающей стратегии для максимально широкого множества  $Q$ , содержащего все возможные гладкие периодические функции времени  $x(\tau)$ . Функция приспособленности имеет вид (11). Здесь величина  $\langle F \rangle$  представляет некоторую неизвестную заранее константу. Для того чтобы найти выживающую стратегию, нужно найти гладкую функцию  $x(\tau)$ , удовлетворяющую условию  $x(0) = x(1)$ , на которой функционал (11) принимает наибольшее значение. Задачу максимизации функционала (11) можно рассматривать как классическую задачу вариационного исчисления (или оптимального управления). Тогда при условии строгой выпуклости функции  $G$  и выпуклости функций  $E$  и  $S_x$  существует единственное решение вариационной задачи. Соответственно, будет выживать всего лишь одна стратегия. В частности, это будет справедливо для линейно-квадратичных аппроксимаций функций окружающей среды. Если, кроме того, взять синусоидальную аппроксимацию функции активности хищника  $S_\tau(\tau) = \cos(2\pi\tau) + 1$ , то задачу оптимизации можно решить аналитически [14], единственная выживающая стратегия движения зоопланктона имеет вид синусоиды  $x(\tau) = A + B \cos(2\pi\tau)$ , где константы  $A$  и  $B$  явно выражаются через коэффициенты функции приспособленности и параметры внешних условий среды

$$A = \frac{\lambda_1 \sigma_1 - \langle F \rangle \gamma \sigma_2}{2\lambda_4} - D_0, \quad B = -\frac{\langle F \rangle \gamma \lambda_2}{8\lambda_3 \pi^2 + 2\lambda_4}. \quad (28)$$

Тогда, подставляя полученное решение (28) в формулы для вычисления ключевых параметров  $M$  (9), коэффициентов  $r$  и  $c$  (10), можно вычислить соответствующее стационарное значение  $F$  по формуле (15):

$$\langle F \rangle = \frac{\lambda_1 \sigma_1 (A + D) - 2\lambda_3 B^2 \pi^2 - \lambda_4 (A + D_0)^2 - \lambda_4 (B^2/2)}{\gamma \sigma_2 (A + B/2 + D)} - \frac{1}{(\gamma \sigma_2 (A + B/2 + D))^2}. \quad (29)$$

Решение полученной системы уравнений (28), (29) относительно  $A$ ,  $B$ ,  $\langle F \rangle$  позволяет находить выживающую стратегию.

**2.5. Сравнение с эмпирическими данными.** Для введенных ранее параметров линейно-квадратичных аппроксимаций функций среды и восстановленных коэффициентов функции приспособленности были найдены следующие значения констант:  $A = -55.2$ ,  $B = -27.6$ . График соответствующей стратегии приведен на рис. 2, *a*.

Для гиперболических аппроксимаций функций среды найти аналитическое решение вариационной задачи не представляется возможным. В этом случае осуществлялся численный поиск выживающей стратегии в форме отрезка тригонометрического ряда пятого порядка  $x(\tau) = A_0 + \sum_{k=1}^5 (A_k \cos(k2\pi\tau) + B_k \sin(k2\pi\tau))$ . Решалась задача максимизации значения обобщенной функции приспособленности (21) с предварительно восстановленными коэффициентами  $\lambda_1$ ,  $\lambda_3$ ,  $\lambda_4$ ,  $\gamma$  относительно коэффициентов ряда  $A_k$  и  $B_k$  методом глобальной оптимизации [62]. В результате были найдены следующие наилучшие значения коэффициентов:  $A_0 = -78.5$ ,  $A_1 = -57.6$ ,  $A_3 = 6.5$ ,  $A_5 = -0.2$ , остальные коэффициенты равны нулю. График соответствующей стратегии изображен на рис. 2, *b*. Также для сопоставления приведены наблюдаемые положения кладоцера *Calanuseuxinus* в северо-восточной части Черного моря летом 2011 г. Можно видеть, что построенная стратегия хорошо согласуется с эмпирическими данными.

Кроме этого была рассмотрена возможность неограниченно долгого сосуществования двух видов кладоцера. Наряду с полученной стратегией была рассмотрена стратегия с коэффициентами  $A_0 = -80.8$ ,  $A_1 = -49.5$ ,  $A_3 = 4.2$ ,  $A_5 = 0.2$ . Эта стратегия является аппроксимацией движения кладоцера *Pseudocalanus elongates* (представлена на рис. 3). Были рассмотрены следующие значения коэффициентов функции приспособленности:  $\lambda_1 = 2.5$ ,  $\lambda_3 = 2.5e - 7$ ,  $\lambda_4 = 1e - 6$ ,

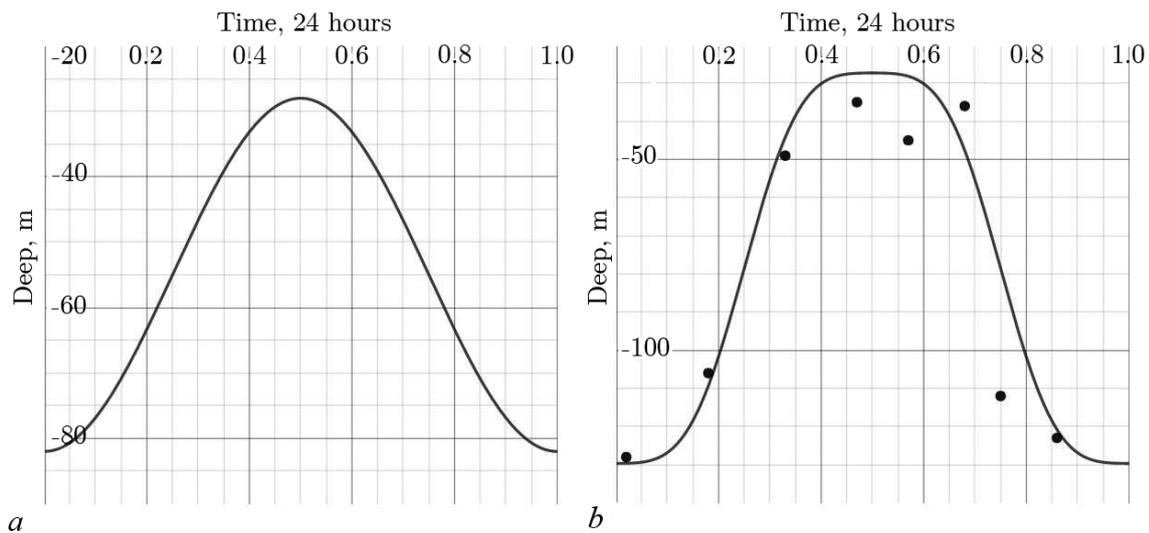


Рис. 2. Графики выживающих стратегий: *a* – график выживающей стратегии в случае линейно-квадратичных аппроксимаций факторов внешней среды; *b* – график выживающей стратегии в случае гиперболических аппроксимаций факторов внешней среды. Точками показаны наблюдаемые положения кладоцера *Calanus euxinus* 21.06.2011 в северо-восточной части акватории Черного моря

Fig. 2. Graphs of surviving strategies: *a* – graph of the surviving strategy in the case of linear-quadratic approximations of environmental factors; *b* – graph of the surviving strategy in the case of hyperbolic approximations of the environmental factors. The dots show the observed positions of the cladoceran *Calanus euxinus* on June 21, 2011 in the northeastern part of the Black Sea

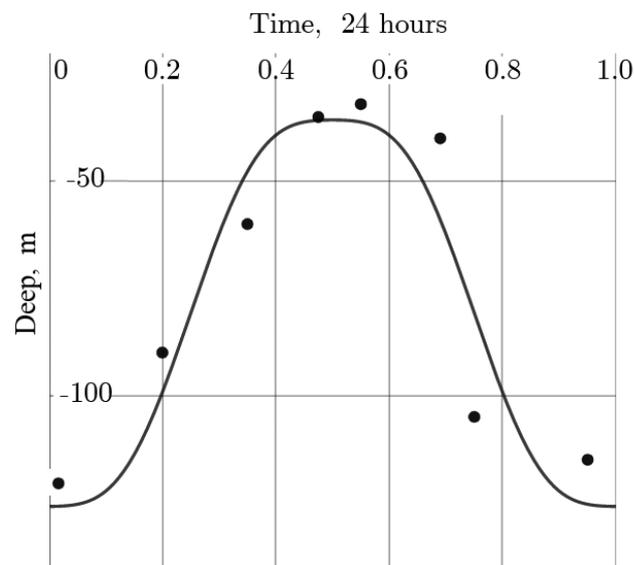


Рис. 3. Аппроксимация движения *Pseudocalanus elongatus*: Точками показаны наблюдаемые положения кладоцера *Pseudocalanus elongatus* 21.06.2011 в северо-восточной части акватории Черного моря

Fig. 3. Approximation of *Pseudocalanus Elongatus* motion. The dots show the observed positions of the cladoceran *Pseudocalanus elongates* on June 21, 2011 in the north-eastern part of the Black Sea

$\gamma = 1.2$  и система «хищник–две жертвы». При использовании описанной выше методики было установлено, что в данной системе выживают оба вида. Это соответствует наблюдаемому в природе наличию двух доминирующих видов клада *Calanus euxinus* и *Pseudocalanus elongatus* в северо-восточной части Черного моря.

### Заключение

В настоящей статье представлена новая методика построения функции приспособленности в случае ее зависимости от множества сосуществующих наследственных элементов — стратегий поведения. Методика предполагает два этапа вывода такой функции. Сначала восстанавливается функция приспособленности для некоторого конечного подмножества элементов на основе обработки данных долгосрочной динамики их численностей и сравнения их конкурентных преимуществ. При этом решается задача ранжирования на основе технологий машинного обучения, в результате чего идентифицируются значения коэффициентов функции приспособленности. На втором этапе выводится форма обобщенной функции приспособленности для произвольного множества элементов. Здесь используются уже найденные на предыдущем этапе значения коэффициентов, а также особенности межвидового взаимодействия, отраженные в модели, а именно, связь значений фазовых координат в устойчивом состоянии равновесия. Обобщенная функция приспособленности имеет две разные формы — для случая единственной выживающей стратегии и для случая нескольких выживающих стратегий. Приведен пример множества, в котором выживают две различные стратегии. Доказываются достаточные условия единственности наилучшей точки.

Предложенная методика построения функции приспособленности, зависящей от множества конкурирующих стратегий, хотя и использует частные особенности конкретной модели, но является достаточно общей и вполне может быть применена для широкого круга моделей популяционной динамики.

Построенная в результате моделирования стратегия суточных вертикальных миграций зоопланктона хорошо согласуется с эмпирическими данными.

Поиск выживающей стратегии фактически эквивалентен определению устойчивого состояния равновесия в модели. Если число сосуществующих наследственных стратегий жертвы в исследуемом сообществе достаточно велико (например, сотни тысяч), то число возможных состояний равновесия системы становится очень большим и решить задачу исследования их устойчивости классическими методами Ляпунова очень сложно. В этом случае поисковый алгоритм на основе максимизации функции приспособленности представляется удобной альтернативой для классического подхода.

С помощью построенной функции приспособленности можно моделировать эволюционно устойчивый режим суточных вертикальных миграций зоопланктона путем численного решения минимаксной задачи.

Предложенная методика построения функции приспособленности, зависящей от множества конкурирующих стратегий, является достаточно общей и вполне может быть применена для широкого круга моделей популяционной динамики.

Отметим, что решаемая здесь задача ранжирования связана с ключевой проблемой искусственного интеллекта — формирование собственной цели системы, определяющей ее поведение. В результате решения задачи ранжирования методами искусственного интеллекта может быть сформирована функция сравнения, которая позволяет находить наилучшую стратегию поведения. Однако в общей теории машинного обучения остается открытым вопрос об источнике порядка предпочтительности на обучающей выборке и предполагается, что этот порядок предьявляется системе внешним учителем. Кроме того, не всегда порядок предпочтительности, заданный на

некотором подмножестве, может быть распространен на более широкие множества. Настоящее исследование, проведенное для частного случая систем с целесообразным поведением — живых систем, показывает, как порядок предпочтительности возникает в виде результата конкуренции стратегий. Здесь фактически учителем является сам фактор выживания носителей той или иной стратегии. Кроме того, здесь показано, как формируется целевая функция даже в условиях зависимости порядка предпочтительности от множества конкурирующих стратегий.

### Список литературы

1. *Stucchi L., Pastor J. M., García-Algarra J., Galeano J.* A general model of population dynamics accounting for multiple kinds of interaction // *Complexity*. 2020. Vol. 2020. P. 7961327. DOI: 10.1155/2020/7961327.
2. *Victorov A. A., Kholodnov V. A.* The mathematical model of population dynamics // *Journal of Nanomedicine & Nanotechnology*. 2019. Vol. 5, no. 1. P. 009.
3. *Frisman E. Y., Zhdanova O. L., Kulakov M. P., Neverova G. P., Revutskaya O. L.* Mathematical modeling of population dynamics based on recurrent equations: Results and prospects. Part I // *Biology Bulletin*. 2021. Vol. 48, no. 1. P. 1–15. DOI: 10.1134/S1062359021010064.
4. *McBride J. M., Nimphius S.* Biological system energy algorithm reflected in sub-system joint work distribution movement strategies: influence of strength and eccentric loading // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10, no. 1. P. 12052. DOI: 10.1038/s41598-020-68714-8.
5. *Abiodun O. I., Jantan A., Omolara A. E., Dada K. V., Mohamed N. A. E., Arshad H.* State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey // *Heliyon*. 2018. Vol. 4, no. 11. P. e00938. DOI: 10.1016/j.heliyon.2018.e00938.
6. *Gorban A. N., Zinovyev A.* Principal manifolds and graphs in practice: from molecular biology to dynamical systems // *International Journal of Neural Systems*. 2010. Vol. 20, no. 3. P. 219–232. DOI: 10.1142/S0129065710002383.
7. *Aynaud M.-M., Mirabeau O., Gruel N., Grossetête S., Boeva V., Durand S., Surdez D., Saulnier O., Zaïdi S., Gribkova S., Fouché A., Kairov U., Raynal V., Tirode F., Grünwald T. G. P., Bohec M., Baulande S., Janoueix-Lerosey I., Vert J.-P., Barillot E., Delattre O., Zinovyev A.* Transcriptional programs define intratumoral heterogeneity of ewing sarcoma at single-cell resolution // *Cell Reports*. 2020. Vol. 30, no. 6. P. 1767–1779. DOI: 10.1016/j.celrep.2020.01.049.
8. *Demidova A., Druzhinina O., Jaćimović M., Masina O., Mijajlović N.* Problems of synthesis, analysis and optimization of parameters for multidimensional mathematical models of interconnected populations dynamics // In: Jaćimović M., Khachay M., Malkova V., Posypkin M. (eds) *Optimization and Applications. OPTIMA 2019*. Vol. 1145 of Communications in Computer and Information Science. Cham: Springer, 2020. P. 56–71. DOI: 10.1007/978-3-030-38603-0\_5.
9. *Korobeinikov A., Shchepakina E., Sobolev V.* A black swan and canard cascades in an SIR infectious disease model // *Mathematical Biosciences and Engineering*. 2019. Vol. 17, no. 1. P. 725–736. DOI: 10.3934/mbe.2020037.
10. *Gavrilets S.* *Fitness Landscapes and the Origin of Species (MPB-41)*. Princeton: Princeton University Press, 2004. 480 p.
11. *Gyllenberg M., Metz J. A. J. H., Service R.* When do optimisation arguments make evolutionary sense? // In: Chalub F., Rodrigues J. (eds) *The Mathematics of Darwin's Legacy. Mathematics and Biosciences in Interaction*. Basel: Springer, 2011. P. 233–268. DOI: 10.1007/978-3-0348-0122-5\_12.
12. *Parvinen K., Dieckmann U., Heino M.* Function-valued adaptive dynamics and the calculus of variations // *Journal of Mathematical Biology*. 2006. Vol. 52, no. 1. P. 1–26. DOI: 10.1007/s00285-005-0329-3.
13. *Birch J.* Natural selection and the maximization of fitness // *Biological Reviews*. 2016. Vol. 91, no. 3. P. 712–727. DOI: 10.1111/brv.12190.

14. *Kuzenkov O., Morozov A., Kuzenkova G.* Recognition of patterns of optimal diel vertical migration of zooplankton using neural networks // In: 2019 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). 14-19 July 2019, Budapest, Hungary. New York: IEEE, 2019. DOI: 10.1109/IJCNN.2019.8852060.
15. *Clark C., Mangel M.* Dynamic State Variable Models in Ecology: Methods and Applications. Oxford: Oxford University Press, 2000. 289 p.
16. *Fiksen O., Giske J.* Vertical distribution and population dynamics of copepods by dynamic optimization // ICES Journal of Marine Science. 1995. Vol. 52, no. 3–4. P. 483–503. DOI: 10.1016/1054-3139(95)80062-X.
17. *Klimenko A. Y.* Entropy and equilibria in competitive systems // Entropy. 2014. Vol. 16, no. 1. P. 1–22. DOI: 10.3390/e16010001.
18. *Bratus A. S., Semenov Y. S., Novozhilov A. S.* Adaptive fitness landscape for replicator systems: to maximize or not to maximize // Mathematical Modelling of Natural Phenomena. 2018. Vol. 13, no. 3. P. 25–38. DOI: 10.1051/mmnp/2018040.
19. *Дрожжин С. В., Братусь А. С.* Математическая модель эволюции репликаторных систем // Вестник Московского университета. Сер. Вычислительная математика и кибернетика. 2018. № 3. С. 36–41.
20. *Горбань А. Н.* Обход равновесия. М.: Наука, 1984. 226 с.
21. *Gorban A. N.* Selection theorem for systems with inheritance // Mathematical Modelling of Natural Phenomena. 2007. Vol. 2, no. 4. P. 1–45. DOI: 10.1051/mmnp:2008024.
22. *Gorban A. N.* Self-simplification in Darwin's systems // In: Gorban A., Roose D. (eds) Coping with Complexity: Model Reduction and Data Analysis. Vol. 75 of Lecture Notes in Computational Science and Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. P. 311–344. DOI: 10.1007/978-3-642-14941-2\_17.
23. *Karev G. P., Kareva I. G.* Replicator equations and models of biological populations and communities // Mathematical Modelling of Natural Phenomena. 2014. Vol. 9, no. 3. P. 68–95. DOI: 10.1051/mmnp/20149305.
24. *Kuzenkov O., Ryabova E.* Variational principle for self-replicating systems // Mathematical Modelling of Natural Phenomena. 2015. Vol. 10, no. 2 P. 115–128. DOI: 10.1051/mmnp/201510208.
25. *Kuzenkov O. A., Ryabova E. A.* Limit possibilities of solution of a hereditary control system // Differential Equations. 2015. Vol. 51, no. 4. P. 523–532. DOI: 10.1134/S0012266115040096.
26. *Kuzenkov O., Morozov A.* Towards the construction of a mathematically rigorous framework for the modelling of evolutionary fitness // Bulletin of Mathematical Biology. 2019. Vol. 81, no. 11. P. 4675–4700. DOI: 10.1007/s11538-019-00602-3.
27. *Mohri M., Rostamizadeh A., Talwalkar A.* Foundations of Machine Learning. Cambridge: The MIT Press, 2012. 432 p.
28. *Liu T.-Y.* Learning to rank for information retrieval // Foundations and Trends in Information Retrieval. 2009. Vol. 3, no. 3. P. 225–331. DOI: 10.1561/15000000016.
29. *Tax N., Bockting S., Hiemstra D.* A cross-benchmark comparison of 87 learning to rank methods // Information Processing & Management. 2015. Vol. 51, no. 6. P. 757–772. DOI: 10.1016/j.ipm.2015.07.002.
30. *Rahangdale A., Raut S.* Machine learning methods for ranking // International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering. 2019. Vol. 29, no. 6. P. 729–761. DOI: 10.1142/S021819401930001X.
31. *Ibrahim O. A. S., Landa-Silva D.* An evolutionary strategy with machine learning for learning to rank in information retrieval // Soft Computing. 2018. Vol. 22, no. 10. P. 3171–3185. DOI: 10.1007/s00500-017-2988-6.

32. *Oliveira I. F. D., Ailon N., Davidov O.* A new and flexible approach to the analysis of paired comparison data // *Journal of Machine Learning Research*. 2018. Vol. 19, no. 60. P. 1–29.
33. *Ailon N.* An active learning algorithm for ranking from pairwise preferences with an almost optimal query complexity // *Journal of Machine Learning Research*. 2012. Vol. 13, no. 5. P. 137–164.
34. *Kuzenkov O., Morozov A., Kuzenkova G.* Exploring evolutionary fitness in biological systems using machine learning methods // *Entropy*. 2021. Vol. 23, no. 1. P. 35. DOI: 10.3390/e23010035.
35. *Sandhu S. K., Morozov A., Kuzenkov O.* Revealing evolutionarily optimal strategies in self-reproducing systems via a new computational approach // *Bulletin of Mathematical Biology*. 2019. Vol. 81, no. 11. P. 4701–4725. DOI: 10.1007/s11538-019-00663-4.
36. *Klimenko A. Y.* Intransitivity in theory and in the real world // *Entropy*. 2015. Vol. 17, no. 6. P. 4364–4412. DOI: 10.3390/e17064364.
37. *Ringelberg J.* *Diel Vertical Migration of Zooplankton in Lakes and Oceans*. Dordrecht: Springer, 2010. 356 p. DOI: 10.1007/978-90-481-3093-1.
38. *Ostrovskii A. G., Arashkevich E. G., Solovyev V. A., Shvoev D. A.* Seasonal variation of the sound-scattering zooplankton vertical distribution in the oxygen-deficient waters of the NE Black Sea // *Ocean Science*. 2021. Vol. 17, no. 4. P. 953–974. DOI: 10.5194/os-17-953-2021.
39. *Sakinan S., Gücü A. C.* Spatial distribution of the Black Sea copepod, *Calanus euxinus*, estimated using multi-frequency acoustic backscatter // *ICES Journal of Marine Science*. 2017. Vol. 74, no. 3. P. 832–846. DOI: 10.1093/icesjms/fsw183.
40. *Hays G. C.* A review of the adaptive significance and ecosystem consequences of zooplankton diel vertical migrations // *Hydrobiologia*. 2003. Vol. 503, no. 1–3. P. 163–170. DOI: 10.1023/B:HYDR.0000008476.23617.b0.
41. *Kaiser M. J., Attrill M. J., Jennings S., Thomas D., Barnes D. K. A., Brierley A. S., Polunin N. V. C., Raffaelli D. G., Williams P. J. I. B.* *Marine Ecology: Processes, Systems, and Impacts*. Oxford: Oxford University Press, 2005. 557 p.
42. *Buesseler K. O., Lamborg C. H., Boyd P. W., Lam P. J., Trull T. W., Bidigare R. R., Bishop J. K. B., Casciotti K. L., Dehairs F., Elskens M., Honda M., Karl D. M., Siegel D. A., Silver M. W., Steinberg D. K., Valdes J., Mooy B. V., Wilson S.* Revisiting carbon flux through the ocean's twilight zone // *Science*. 2007. Vol. 316, no. 5824. P. 567–570. DOI: 10.1126/science.1137959.
43. *Ducklow H. W., Steinberg D. K., Buesseler K. O.* Upper ocean carbon export and the biological pump // *Oceanography*. 2001. Vol. 14, no. 4. P. 50–58. DOI: 10.5670/oceanog.2001.06.
44. *Isla A., Scharek R., Latasa M.* Zooplankton diel vertical migration and contribution to deep active carbon flux in the NW Mediterranean // *Journal of Marine Systems*. 2015. Vol. 143. P. 86–97. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2014.10.017.
45. *Archibald K. M., Siegel D. A., Doney S. C.* Modeling the impact of zooplankton diel vertical migration on the carbon export flux of the biological pump // *Global Biogeochemical Cycles*. 2019. Vol. 33, no. 2. P. 181–199. DOI: 10.1029/2018GB005983.
46. *Arcifa M. S., Peticarrari A., Bunioto T. C., Domingos A. R., Minto W. J.* Microcrustaceans and predators: diel migration in a tropical lake and comparison with shallow warm lakes // *Limnetica*. 2016. Vol. 35, no. 2. P. 281–296. DOI: 10.23818/limn.35.23.
47. *Häfker N. S., Meyer B., Last K. S., Pond D. W., Hüppe L., Teschke M.* Circadian clock involvement in zooplankton diel vertical migration // *Current Biology*. 2017. Vol. 27, no. 14. P. 2194–2201. DOI: 10.1016/j.cub.2017.06.025.
48. *Guerra D., Schroeder K., Borghini M., Camatti E., Pansera M., Schroeder A., Sparnocchia S., Chiggiato J.* Zooplankton diel vertical migration in the Corsica Channel (north-western Mediterranean Sea) detected by a moored acoustic Doppler current profiler // *Ocean Science*. 2019. Vol. 15, no. 3. P. 631–649. DOI: 10.5194/os-15-631-2019.

49. *Wishner K. F., Seibel B., Outram D.* Ocean deoxygenation and copepods: coping with oxygen minimum zone variability // *Biogeosciences*. 2020. Vol. 17, no. 8. P. 2315–2339. DOI: 10.5194/bg-17-2315-2020.
50. *Tutasi P., Escribano R.* Zooplankton diel vertical migration and downward C flux into the oxygen minimum zone in the highly productive upwelling region off northern Chile // *Biogeosciences*. 2020. Vol. 17, no. 2. P. 455–473. DOI: 10.5194/bg-17-455-2020.
51. *Baumgartner M. F., Tarrant A. M.* The physiology and ecology of diapause in marine copepods // *Annual Review of Marine Science*. 2017. Vol. 9. P. 387–411. DOI: 10.1146/annurev-marine-010816-060505.
52. *Тихонов Д. А., Медвинский А. Б.* Анализ взаимных корреляций между колебаниями обилия популяций планктона и корреляций между колебаниями планктонного обилия и вариациями температуры на примере экосистемы Нарочанских озер // *Биофизика*. 2019. № 4. С. 747–753. DOI: 10.1134/S0006302919040148.
53. *Гиричева Е. Е.* Влияние трофических отношений в сообществе планктона на его пространственно-временную динамику // *Математическая биология и биоинформатика*. 2019. Т. 14, № 2. С. 393–405. DOI: 10.17537/2019.14.393.
54. *Сергеева В. М., Дриц А. В., Флинт М. В.* Особенности распределения и питания доминирующих видов зоопланктона в условиях осеннего развития кокколитофорид в восточной части Баренцева моря // *Океанология*. 2019. Т. 59, № 5. С. 734–745. DOI: 10.31857/S0030-1574595734-745.
55. *Morozov A., Kuzenkov O. A., Arashkevich E. G.* Modelling optimal behavioural strategies in structured populations using a novel theoretical framework // *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9, no. 1. P. 15020. DOI: 10.1038/s41598-019-51310-w.
56. *Morozov A. Y., Kuzenkov O. A.* Towards developing a general framework for modelling vertical migration in zooplankton // *Journal of Theoretical Biology*. 2016. Vol. 405. P. 17–28. DOI: 10.1016/j.jtbi.2016.01.011.
57. *Базыкин А. Д.* Нелинейная динамика взаимодействующих популяций. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 368 с.
58. *Ризниченко Г. Ю.* Лекции по математическим моделям в биологии. Москва-Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2002. 232 с.
59. *Бишоп К. М.* Распознавание образов и машинное обучение. М.: Вильямс, 2020. 960 с.
60. *Danovaro R., Carugati L., Berzano M., Cahill A. E., Carvalho S., Chenuil A., Corinaldesi C., Cristina S., David R., Dell'Anno A., Dzhenbekova N., Garcés E., Gasol J. M., Goela P., Féral J.-P., Ferrera I., Forster R. M., Kurekin A. A., Rastelli E., Marinova V., Miller P. I., Moncheva S., Newton A., Pearman J. K., Pitois S. G., Reñé A., Rodríguez-Ezpeleta N., Saggiomo V., Simis S. G. H., Stefanova K., Wilson C., Martire M. L., Greco S., Cochrane S. K. J., Mangoni O., Borja A.* Implementing and innovating marine monitoring approaches for assessing marine environmental status // *Frontiers in Marine Science*. 2016. Vol. 3. P. 213. DOI: 10.3389/fmars.2016.00213.
61. *Sato M.* Variability in Diel Vertical Migration of Zooplankton and Physical Properties in Saanich Inlet, British Columbia. PhD Thesis. Victoria, Canada: University of Victoria, 2013. 122 p.
62. *Morozov A. Y., Kuzenkov O. A., Sandhu S. K.* Global optimisation in Hilbert spaces using the survival of the fittest algorithm // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2021. Vol. 103. P. 106007. DOI: 10.1016/j.cnsns.2021.106007.

## References

1. *Stucchi L., Pastor JM, García-Algarra J, Galeano J.* A general model of population dynamics accounting for multiple kinds of interaction. *Complexity*. 2020;2020:7961327. DOI: 10.1155/2020/7961327.

2. Victorov AA, Kholodnov VA. The mathematical model of population dynamics. *Journal of Nanomedicine & Nanotechnology*. 2019;5(1):009.
3. Frisman EY, Zhdanova OL, Kulakov MP, Neverova GP, Revutskaya OL. Mathematical modeling of population dynamics based on recurrent equations: Results and prospects. Part I. *Biology Bulletin*. 2021;48(1):1–15. DOI: 10.1134/S1062359021010064.
4. McBride JM, Nimphius S. Biological system energy algorithm reflected in sub-system joint work distribution movement strategies: influence of strength and eccentric loading. *Scientific Reports*. 2020;10(1):12052. DOI: 10.1038/s41598-020-68714-8.
5. Abiodun OI, Jantan A, Omolara AE, Dada KV, Mohamed NAE, Arshad H. State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey. *Heliyon*. 2018;4(11):e00938. DOI: 10.1016/j.heliyon.2018.e00938.
6. Gorban AN, Zinovyev A. Principal manifolds and graphs in practice: from molecular biology to dynamical systems. *International Journal of Neural Systems*. 2010;20(3):219–232. DOI: 10.1142/S0129065710002383.
7. Aynaud MM, Mirabeau O, Gruel N, Grossetête S, Boeva V, Durand S, Surdez D, Saulnier O, Zaïdi S, Gribkova S, Fouché A, Kairov U, Raynal V, Tirode F, Grünwald TGP, Bohec M, Baulande S, Janoueix-Lerosey I, Vert JP, Barillot E, Delattre O, Zinovyev A. Transcriptional programs define intratumoral heterogeneity of ewing sarcoma at single-cell resolution. *Cell Reports*. 2020;30(6):1767–1779. DOI: 10.1016/j.celrep.2020.01.049.
8. Demidova A, Druzhinina O, Jaćimović M, Masina O, Mijajlovic N. Problems of synthesis, analysis and optimization of parameters for multidimensional mathematical models of interconnected populations dynamics. In: Jaćimović M, Khachay M, Malkova V, Posypkin M, editors. *Optimization and Applications. OPTIMA 2019*. Vol. 1145 of *Communications in Computer and Information Science*. Cham: Springer; 2020. P. 56–71. DOI: 10.1007/978-3-030-38603-0\_5.
9. Korobeinikov A, Shchepakina E, Sobolev V. A black swan and canard cascades in an SIR infectious disease model. *Mathematical Biosciences and Engineering*. 2019;17(1):725–736. DOI: 10.3934/mbe.2020037.
10. Gavrillets S. *Fitness Landscapes and the Origin of Species (MPB-41)*. Princeton: Princeton University Press; 2004. 480 p.
11. Gyllenberg M, Metz JAJH, Service R. When do optimisation arguments make evolutionary sense? In: Chalub F, Rodrigues J, editors. *The Mathematics of Darwin's Legacy. Mathematics and Biosciences in Interaction*. Basel: Springer; 2011. P. 233–268. DOI: 10.1007/978-3-0348-0122-5\_12.
12. Parvinen K, Dieckmann U, Heino M. Function-valued adaptive dynamics and the calculus of variations. *Journal of Mathematical Biology*. 2006;52(1):1–26. DOI: 10.1007/s00285-005-0329-3.
13. Birch J. Natural selection and the maximization of fitness. *Biological Reviews*. 2016;91(3):712–727. DOI: 10.1111/brv.12190.
14. Kuzenkov O, Morozov A, Kuzenkova G. Recognition of patterns of optimal diel vertical migration of zooplankton using neural networks. In: 2019 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). 14-19 July 2019, Budapest, Hungary. New York: IEEE; 2019. DOI: 10.1109/IJCNN.2019.8852060.
15. Clark C, Mangel M. *Dynamic State Variable Models in Ecology: Methods and Applications*. Oxford: Oxford University Press; 2000. 289 p.
16. Fiksen O, Giske J. Vertical distribution and population dynamics of copepods by dynamic optimization. *ICES Journal of Marine Science*. 1995;52(3–4):483–503. DOI: 10.1016/1054-3139(95)80062-X.
17. Klimenko AY. Entropy and equilibria in competitive systems. *Entropy*. 2014;16(1):1–22. DOI: 10.3390/e16010001.
18. Bratus AS, Semenov YS, Novozhilov AS. Adaptive fitness landscape for replicator systems: to

- maximize or not to maximize. *Mathematical Modelling of Natural Phenomena*. 2018;13(3):25–38. DOI: 10.1051/mmnp/2018040.
19. Drozhzhin SV, Bratus AS. Mathematical model of evolution of replicator systems. *Bulletin of Moscow University. Series: Computational Mathematics and Cybernetics*. 2018;(3):36–41 (in Russian).
  20. Gorban AN. *Equilibrium Bypass*. Moscow: Nauka; 1984. 226 p. (in Russian).
  21. Gorban AN. Selection theorem for systems with inheritance. *Mathematical Modelling of Natural Phenomena*. 2007;2(4):1–45. DOI: 10.1051/mmnp:2008024.
  22. Gorban AN. Self-simplification in Darwin’s systems. In: Gorban A, Roose D, editors. *Coping with Complexity: Model Reduction and Data Analysis*. Vol. 75 of *Lecture Notes in Computational Science and Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2011. P. 311–344. DOI: 10.1007/978-3-642-14941-2\_17.
  23. Karev GP, Kareva IG. Replicator equations and models of biological populations and communities. *Mathematical Modelling of Natural Phenomena*. 2014;9(3):68–95. DOI: 10.1051/mmnp/20149305.
  24. Kuzenkov O, Ryabova E. Variational principle for self-replicating systems. *Mathematical Modelling of Natural Phenomena*. 2015;10(2):115–128. DOI: 10.1051/mmnp/201510208.
  25. Kuzenkov OA, Ryabova EA. Limit possibilities of solution of a hereditary control system. *Differential Equations*. 2015;51(4):523–532. DOI: 10.1134/S0012266115040096.
  26. Kuzenkov O, Morozov A. Towards the construction of a mathematically rigorous framework for the modelling of evolutionary fitness. *Bulletin of Mathematical Biology*. 2019;81(11):4675–4700. DOI: 10.1007/s11538-019-00602-3.
  27. Mohri M, Rostamizadeh A, Talwalkar A. *Foundations of Machine Learning*. Cambridge: The MIT Press; 2012. 432 p.
  28. Liu TY. Learning to rank for information retrieval. *Foundations and Trends in Information Retrieval*. 2009;3(3):225–331. DOI: 10.1561/15000000016.
  29. Tax N, Bockting S, Hiemstra D. A cross-benchmark comparison of 87 learning to rank methods. *Information Processing & Management*. 2015;51(6):757–772. DOI: 10.1016/j.ipm.2015.07.002.
  30. Rahangdale A, Raut S. Machine learning methods for ranking. *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering*. 2019;29(6):729–761. DOI: 10.1142/S021819401930001X.
  31. Ibrahim OAS, Landa-Silva D. An evolutionary strategy with machine learning for learning to rank in information retrieval. *Soft Computing*. 2018;22(10):3171–3185. DOI: 10.1007/s00500-017-2988-6.
  32. Oliveira IFD, Ailon N, Davidov O. A new and flexible approach to the analysis of paired comparison data. *Journal of Machine Learning Research*. 2018;19(60):1–29.
  33. Ailon N. An active learning algorithm for ranking from pairwise preferences with an almost optimal query complexity. *Journal of Machine Learning Research*. 2012;13(5):137–164.
  34. Kuzenkov O, Morozov A, Kuzenkova G. Exploring evolutionary fitness in biological systems using machine learning methods. *Entropy*. 2021;23(1):35. DOI: 10.3390/e23010035.
  35. Sandhu SK, Morozov A, Kuzenkov O. Revealing evolutionarily optimal strategies in self-reproducing systems via a new computational approach. *Bulletin of Mathematical Biology*. 2019;81(11):4701–4725. DOI: 10.1007/s11538-019-00663-4.
  36. Klimenko AY. Intransitivity in theory and in the real world. *Entropy*. 2015;17(6):4364–4412. DOI: 10.3390/e17064364.
  37. Ringelberg J. *Diel Vertical Migration of Zooplankton in Lakes and Oceans*. Dordrecht: Springer; 2010. 356 p. DOI: 10.1007/978-90-481-3093-1.
  38. Ostrovskii AG, Arashkevich EG, Solovyev VA, Shvoev DA. Seasonal variation of the sound-scattering zooplankton vertical distribution in the oxygen-deficient waters of the NE Black Sea. *Ocean Science*. 2021;17(4):953–974. DOI: 10.5194/os-17-953-2021.
  39. Sakinan S, Gücü AC. Spatial distribution of the Black Sea copepod, *Calanus euxinus*, estimated

- using multi-frequency acoustic backscatter. *ICES Journal of Marine Science*. 2017;74(3):832–846. DOI: 10.1093/icesjms/fsw183.
40. Hays GC. A review of the adaptive significance and ecosystem consequences of zooplankton diel vertical migrations. *Hydrobiologia*. 2003;503(1–3):163–170. DOI: 10.1023/B:HYDR.0000008476.23617.b0.
  41. Kaiser MJ, Attrill MJ, Jennings S, Thomas D, Barnes DKA, Brierley AS, Polunin NVC, Raffaelli DG, Williams PJIB. *Marine Ecology: Processes, Systems, and Impacts*. Oxford: Oxford University Press; 2005. 557 p.
  42. Buesseler KO, Lamborg CH, Boyd PW, Lam PJ, Trull TW, Bidigare RR, Bishop JKB, Casciotti KL, Dehairs F, Elskens M, Honda M, Karl DM, Siegel DA, Silver MW, Steinberg DK, Valdes J, Mooy BV, Wilson S. Revisiting carbon flux through the ocean’s twilight zone. *Science*. 2007;316(5824):567–570. DOI: 10.1126/science.1137959.
  43. Ducklow HW, Steinberg DK, Buesseler KO. Upper ocean carbon export and the biological pump. *Oceanography*. 2001;14(4):50–58. DOI: 10.5670/oceanog.2001.06.
  44. Isla A, Scharek R, Latasa M. Zooplankton diel vertical migration and contribution to deep active carbon flux in the NW Mediterranean. *Journal of Marine Systems*. 2015;143:86–97. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2014.10.017.
  45. Archibald KM, Siegel DA, Doney SC. Modeling the impact of zooplankton diel vertical migration on the carbon export flux of the biological pump. *Global Biogeochemical Cycles*. 2019;33(2):181–199. DOI: 10.1029/2018GB005983.
  46. Arcifa MS, Peticarrari A, Bunioto TC, Domingos AR, Minto WJ. Microcrustaceans and predators: diel migration in a tropical lake and comparison with shallow warm lakes. *Limnetica*. 2016;35(2):281–296. DOI: 10.23818/limn.35.23.
  47. Häfker NS, Meyer B, Last KS, Pond DW, Hüppe L, Teschke M. Circadian clock involvement in zooplankton diel vertical migration. *Current Biology*. 2017;27(14):2194–2201. DOI: 10.1016/j.cub.2017.06.025.
  48. Guerra D, Schroeder K, Borghini M, Camatti E, Pansera M, Schroeder A, Sparnocchia S, Chiggiato J. Zooplankton diel vertical migration in the Corsica Channel (north-western Mediterranean Sea) detected by a moored acoustic Doppler current profiler. *Ocean Science*. 2019;15(3):631–649. DOI: 10.5194/os-15-631-2019.
  49. Wishner KF, Seibel B, Outram D. Ocean deoxygenation and copepods: coping with oxygen minimum zone variability. *Biogeosciences*. 2020;17(8):2315–2339. DOI: 10.5194/bg-17-2315-2020.
  50. Tutasi P, Escibano R. Zooplankton diel vertical migration and downward C flux into the oxygen minimum zone in the highly productive upwelling region off northern Chile. *Biogeosciences*. 2020;17(2):455–473. DOI: 10.5194/bg-17-455-2020.
  51. Baumgartner MF, Tarrant AM. The physiology and ecology of diapause in marine copepods. *Annual Review of Marine Science*. 2017;9:387–411. DOI: 10.1146/annurev-marine-010816-060505.
  52. Tikhonov DA, Medvinsky AB. An analysis of mutual correlations between fluctuations in plankton population abundances and temperature variations based on the example of the ecosystem of the Naroch lakes. *Biophysics*. 2019;64(4):593–598. DOI: 10.1134/S0006350919040201.
  53. Giricheva E. The influence of trophic interactions in the plankton community on its spatiotemporal dynamics. *Mathematical Biology and Bioinformatics*. 2019;14(2):393–405 (in Russian). DOI: 10.17537/2019.14.393.
  54. Sergeeva VM, Drits AV, Flint MV. Distribution and feeding of dominant zooplankton species

- under autumn coccolithophorid development in the eastern part of the Barents Sea. *Oceanology*. 2019;59(5):658–668. DOI: 10.1134/S0001437019050175.
55. Morozov A, Kuzenkov OA, Arashkevich EG. Modelling optimal behavioural strategies in structured populations using a novel theoretical framework. *Scientific Reports*. 2019;9(1):15020. DOI: 10.1038/s41598-019-51310-w.
  56. Morozov AY, Kuzenkov OA. Towards developing a general framework for modelling vertical migration in zooplankton. *Journal of Theoretical Biology*. 2016;405:17–28. DOI: 10.1016/j.jtbi.2016.01.011.
  57. Bazykin AD. *Nonlinear Dynamics of Interacting Populations*. Singapore: World Scientific; 1998. 216 p. DOI: 10.1142/2284.
  58. Riznichenko GY. *Lectures on Mathematical Models in Biology*. Moscow-Izhevsk: *Regulyarnaya i Haoticheskaya Dinamika*; 2002. 232 p. (in Russian).
  59. Bishop CM. *Pattern Recognition and Machine Learning*. New York: Springer-Verlag; 2006. 738 p.
  60. Danovaro R, Carugati L, Berzano M, Cahill AE, Carvalho S, Chenuil A, Corinaldesi C, Cristina S, David R, Dell'Anno A, Dzhenbekova N, Garcés E, Gasol JM, Goela P, Féral JP, Ferrera I, Forster RM, Kurekin AA, Rastelli E, Marinova V, Miller PI, Moncheva S, Newton A, Pearman JK, Pitois SG, Reñé A, Rodríguez-Ezpeleta N, Saggiomo V, Simis SGH, Stefanova K, Wilson C, Martire ML, Greco S, Cochrane SKJ, Mangoni O, Borja A. Implementing and innovating marine monitoring approaches for assessing marine environmental status. *Frontiers in Marine Science*. 2016;3:213. DOI: 10.3389/fmars.2016.00213.
  61. Sato M. *Variability in Diel Vertical Migration of Zooplankton and Physical Properties in Saanich Inlet, British Columbia*. PhD Thesis. Victoria, Canada: University of Victoria; 2013. 122 p.
  62. Morozov AY, Kuzenkov OA, Sandhu SK. Global optimisation in Hilbert spaces using the survival of the fittest algorithm. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2021;103:106007. DOI: 10.1016/j.cnsns.2021.106007.



*Кузенков Олег Анатольевич* — родился в Горьковской области (1961). Окончил с отличием факультет вычислительной математики и кибернетики Горьковского государственного университета им. Н. И. Лобачевского (1984). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «Дифференциальные уравнения и математическая физика» (1989, ГГУ). С 2015 года работает на кафедре дифференциальных уравнений, математического и численного анализа Института информационных технологий, математики и механики Нижегородского государственного университета имени Н. И. Лобачевского. Научные интересы — теория меры, оптимизация и теория оптимального управления, математическое моделирование. Имеет более 120 публикаций по указанным направлениям.

Россия, 603022 Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23  
 Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского  
 E-mail: kuzenkov\_o@mail.ru  
 ORCID: 0000-0001-9407-0517  
 AuthorID (eLibrary.Ru): 12881



Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2022. Т. 30, № 3  
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2022;30(3)

Научная статья  
УДК 004.032.26+004.274  
DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-3-299-310

## Сегментная спайковая модель нейрона CSNM

А. В. Бахшиев✉, А. А. Демчева

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия  
E-mail: ✉palexab@gmail.com, ademtcheva@gmail.com

Поступила в редакцию 7.11.2021, принята к публикации 20.12.2021,  
опубликована 31.05.2022

**Аннотация.** Цель настоящего исследования — разработка сегментной спайковой модели нейрона как элемента растущих нейронных сетей. **Методы.** В работе применены методы математического и численного моделирования и проведено сравнение реакций на одиночный импульс предложенной сегментной спайковой модели нейрона и модели порогового интегратора с утечкой. Рассмотрен также вопрос о влиянии гиперпараметров предложенной модели на динамику возбуждения нейрона. Все описанные эксперименты проводились в среде Matlab Simulink с использованием средств разработанной библиотеки. **Результаты.** По результатам исследования был сделан вывод о том, что предложенная модель способна качественно воспроизвести реакцию точечной классической модели, а настройка гиперпараметров позволяет воспроизводить следующие закономерности распространения сигналов в биологическом нейроне: уменьшение максимального потенциала и увеличение задержки между входным и выходным импульсами с увеличением размера нейрона или длины дендрита, а также рост потенциала при увеличении числа активных синапсов. **Заключение.** Показано, что предложенная сегментная спайковая модель нейрона позволяет описывать поведение биологических нейронов на уровне воспроизведения динамики преобразования импульсных сигналов. Гиперпараметры модели позволяют осуществлять настройку реакций нейрона при фиксированных остальных параметрах. Такая модель может использоваться как элемент спайковых нейронных сетей с детализацией до уровня сегментов дендритных деревьев нейронов.

**Ключевые слова:** нейроморфные системы, спайковая нейронная сеть, спайковый нейрон, сегментная модель нейрона.

**Для цитирования:** Бахшиев А. В., Демчева А. А. Сегментная спайковая модель нейрона CSNM // Известия вузов. ПНД. 2022. Т. 30, № 3. С. 299–310. DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-3-299-310

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

## Compartmental spiking neuron model CSNM

A. V. Bakhshiev<sup>✉</sup>, A. A. Demcheva

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

E-mail: ✉palexab@gmail.com, ademtcheva@gmail.com

Received 7.11.2021, accepted 20.12.2021, published 31.05.2022

**Abstract.** The *purpose* of this work is to develop a compartment spiking neuron model as an element of growing neural networks. *Methods.* As part of the work, the CSNM is compared with the Leaky Integrate-and-Fire model by comparing the reactions of point models to a single spike. The influence of hyperparameters of the proposed model on neuron excitation is also investigated. All the described experiments were carried out in the Simulink environment using the tools of the proposed library. *Results.* It was concluded that the proposed model is able to qualitatively reproduce the reaction of the point classical model, and the tuning of hyperparameters allows reproducing the following patterns of signal propagation in a biological neuron: a decrease in the maximum potential and an increase in the delay between input and output spikes with an increase in the size of the neuron or the length of the dendrite, as well as an increase in the potential with an increase in the number of active synapses. *Conclusion.* The proposed compartment spiking neuron model allows to describe the behavior of biological neurons at the level of pulse signal conversion. The hyperparameters of the model allow tuning the neuron responses at fixed other neuron parameters. The model can be used as a part of spiking neural networks with details at the level of compartments of neurons dendritic trees.

**Keywords:** neuromorphic systems, spiking neural network, spiking neuron, compartment neuron model.

**For citation:** Bakhshiev AV, Demcheva AA. Compartmental spiking neuron model CSNM. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2022;30(3):299–310. DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-3-299-310

*This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).*

### Введение

В последнее десятилетие теория и практики искусственных нейронных сетей достигли ряда значимых результатов в решении задач машинного обучения [1], однако вопрос создания аппаратных энергетически эффективных нейроморфных вычислителей по-прежнему остается открытым [2]. Разработка аппаратных реализаций спайковых нейронных сетей является одним из перспективных решений этой проблемы [3].

Несмотря на достигнутые успехи, глубокие нейронные сети испытывают ряд проблем, связанных с ограниченной обобщающей способностью, особенно в условиях изменяющейся среды [4]. Поэтому исследование структуры и принципов функционирования нервной системы с целью предложения новых архитектур и методов обучения искусственных нейронных сетей остается по-прежнему актуальным. В этом направлении применение спайковых моделей нейронов и нейронных сетей перспективно как для описания поведения естественных нейронных структур, так и для моделирования нейроморфных систем управления и обработки информации.

В настоящее время в спайковых нейронных сетях применяются, в основном, достаточно простые, точечные модели нейронов, такие как модель порогового интегратора (Integrate-and-Fire, IaF) и ее модификации, модель Ижикевича, SRM<sub>0</sub> (Simple Spike Response Model) [5], а также относительно простые модели синаптической передачи [6,7]. Точечную спайковую модель нейрона как элемента нейронной сети можно представить следующей функциональной схемой (рис. 1).

На схеме  $S(x, w, t)$  — функциональная запись модели синаптической передачи, которая осуществляет преобразование входного сигнала в синаптический ток;  $M(i_{\Sigma}, t)$  — функциональная запись модели мембраны, осуществляющей пространственное и временное суммирование входных сигналов;  $G(U, t)$  — генератор потенциала действия, который формирует выходной сигнал в ответ на превышение потенциалом  $U$  нейрона некоторого порогового значения.

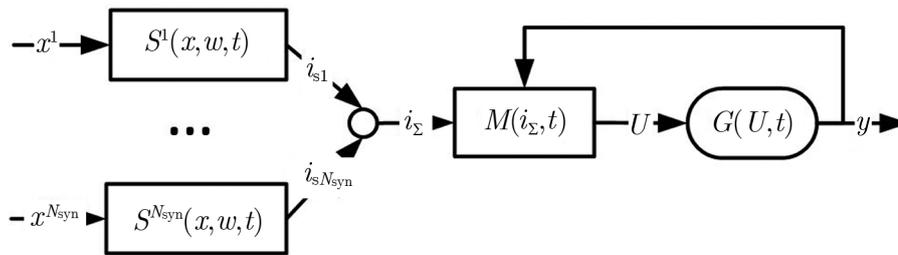


Рис. 1. Функциональная схема точечных моделей нейронов  
 Fig. 1. Functional diagram of point neuron models

Более сложные биофизические модели мембраны нейрона (например, модель Ходжкина–Хаксли [8]), как правило, не применяются в силу высокой вычислительной сложности.

В природе одним из основных способов достижения пластичности нервной системы, не учитываемой точечными моделями, является рост дендритного дерева и синаптического аппарата нейрона, участвующего в запоминании информации и формировании новых паттернов активности. Для описания сложной структуры мембраны нейрона существует кабельная теория [9] и сегментные модели нейронов [10], однако они также вычислительно сложны и не вполне удобны для моделирования спайковых нейронных сетей.

В работах [11, 12] была представлена сегментная спайковая модель нейрона. Ее особенностью является возможность формировать требуемую реакцию нейрона, оперируя такими гиперпараметрами, как размер нейрона, длина дендритов, число возбуждающих или тормозных синапсов, не переходя к параметрической настройке каждого элемента. Модель применялась для исследования систем управления и обработки информации, базирующихся на приближенных к биологии моделях нейронных сетей [13]. Недостатком этой модели является несовместимость функциональных элементов (синапс, сегмент мембраны, низкопороговая зона) по входам и выходам с классическими моделями. Также, реализация генератора импульсов для стабилизации длительности выходного импульса содержит дополнительное неадаптивное инерционное звено, негативно влияющее на общие инерционные свойства нейрона.

В этой работе мы представляем обновленную сегментную спайковую модель нейрона (Compartment Spiking Neuron Model – CSNM), свободную от указанных недостатков.

## 1. Модель нейрона

**1.1. Архитектура модели.** В основе модели лежит эквивалентная электрическая схема мембраны по Экклсу (рис. 2) [14]. Здесь  $R_m$  – сопротивление мембраны,  $C_m$  – емкость мембраны,  $R_s$  – сопротивление синапса,  $E_m$  и  $E_s$  – ЭДС мембраны и синаптической передачи, соответственно.

В модели CSNM мы абстрагируемся от количественного описания химических процессов в нейроне – так же, как и от понятия ионных каналов. Однако, чтобы сохранить возможность описать сложную динамику интегрирования входных сигналов на мембране, мы вводим понятие ионных механизмов, которых может быть, в общем случае, произвольное число, и процессы в которых в целом соответствуют

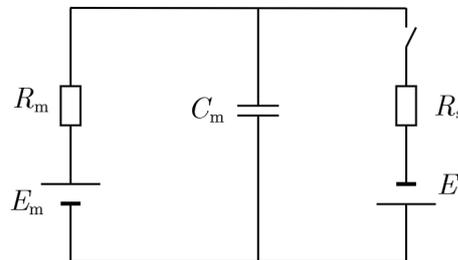


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема мембраны по Экклсу  
 Fig. 2. Eccles membrane equivalent electric diagram

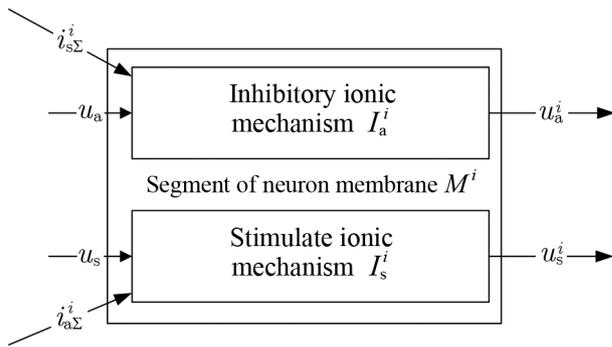


Рис. 3. Структура ионного механизма сегмента мембраны нейрона

Fig. 3. Structure of neuron membrane segment ion mechanism

На схеме приняты следующие обозначения:  $B^1 \dots B^{N_s}$  – сегменты мембраны тела нейрона;  $N_s$  – размер тела нейрона;  $D^{1,1} \dots D^{L, N_d(L)}$  – сегменты мембраны дендритного дерева;  $N_d$  – длина дендрита;  $L$  – число дендритов;  $S^1 \dots S^{N_{syn}}$  – синапсы (нижний индекс определяет возбуждающий синапс (s), или тормозной (a));  $N_{syn}$  – число синапсов, образованных на сегменте дендрита;  $x_s^1 \dots x_s^{N_{syn}}$  – входной сигнал (последовательность импульсов), поступающий на синапсы;  $i_{a\Sigma}^n, i_{s\Sigma}^n$  – суммарное влияние тормозящих и возбуждающих синапсов, соответственно;  $E_m$  – начальное состояние ионных механизмов в покое;  $U^1 \dots U^{N_s}$  – вклады сегментов мембраны тела в общий потенциал нейрона;  $U_\Sigma$  – общий потенциал нейрона;  $Y$  – выходной сигнал (последовательность импульсов), формируемый нейроном.

Полагаем, что нейроны обмениваются информацией через события-импульсы (спайки), которые можно представить как:

$$x = \begin{cases} E_y, & t_i \leq t \leq t_i + \Delta t, \\ 0, & t < t_i, t > t_i + \Delta t, \end{cases} \quad (1)$$

где  $E_y$  – амплитуда входного импульса,  $t_i$  – время начала формирования входного импульса,  $\Delta t$  – длительность входного импульса.

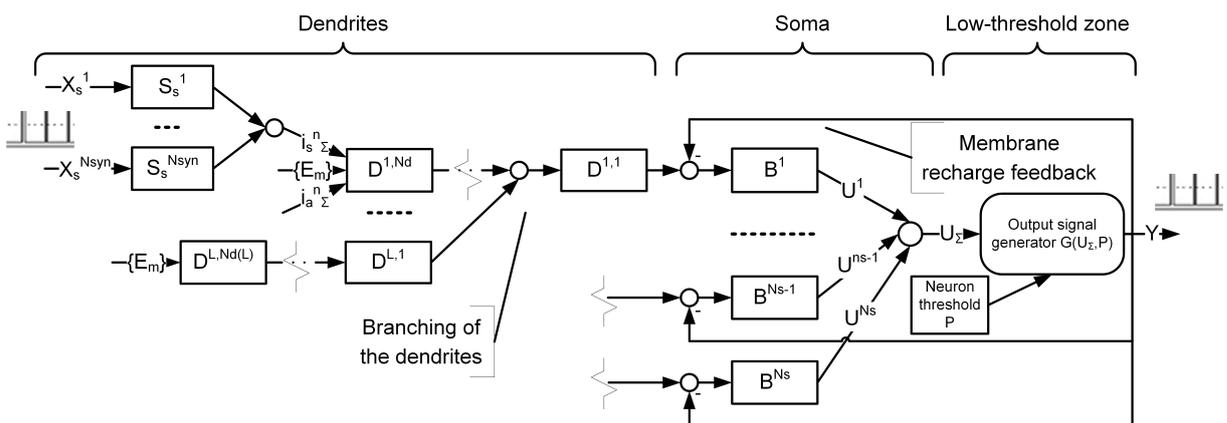


Рис. 4. Структурно-функциональная схема модели нейрона

Fig. 4. Structural and functional diagram of the neuron model

Поступающие на вход синапсов импульсы  $x$  преобразуются в них в выходную величину, моделирующую влияние синаптического тока на сегмент мембраны нейрона. Сегменты мембраны тела нейрона и дендритов представляют собой пары ионных механизмов, описывающих механизмы деполяризации и гиперполяризации. Выходом сегмента мембраны является пара значений гиперполяризации и деполяризации, определяющая их вклад в суммарный потенциал.

Генератор потенциала действия формирует выходной импульс, который может быть передан другим нейронам сети, а также формирует сигнал обратной связи на сегменты мембраны тела клетки, что позволяет описывать переходные процессы, возникающие во время генерации импульса.

Такая структурная организация модели нейрона позволяет проводить расчет систем дифференциальных уравнений для каждого нейрона независимо, поскольку нейроны обмениваются исключительно информацией о моменте времени возникновения импульса, а входной вектор системы уравнений модели нейрона формируется внутри модели как функция от моментов времени прихода импульсов.

Система в целом характеризуется набором из следующих гиперпараметров: размер нейрона  $N_s$  (число блоков-моделей сегмента мембраны), длина дендритов  $N_d$  и число возбуждающих или тормозных синапсов (число соответствующих блоков в модели)  $N_{syn}$ . Их значения задают общий вид системы и позволяют сформировать требуемую реакцию нейрона.

Далее рассмотрено математическое описание моделей функциональных элементов нейрона.

**1.2. Модель синаптической передачи.** На вход модели синапса (2) поступает сигнал с выхода пресинаптического нейрона вида (1). На выходе модели синапса формируется синаптический ток. Модель синапса реализует основные особенности функционирования синаптической передачи — экспоненциальный характер выделения и распада медиатора, различие в скоростях протекания этих процессов и эффект пресинаптического торможения. Модели возбуждающих и тормозных синапсов идентичны друг другу, различие в их воздействии на сегмент мембраны определяется тем, к какому из ионных механизмов подключен каждый конкретный синапс.

Уравнения модели синапса:

$$\left. \begin{aligned} T_s(t) \frac{d\rho}{dt} &= x - \rho(t) \\ g &= F_{PreI}(\rho) \\ i_s &= g \frac{\varepsilon_s}{R_s} w \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где  $R_s > 0$  — сопротивление синапса,  $\varepsilon_s$  — электродвижущая сила (ЭДС) синаптической передачи,  $g$  — временная переменная, описывающая активность синапса с учетом эффекта пресинаптического торможения,  $w$  — вес связи,  $i_s$  — выходной синаптический ток,  $\rho$  — характеризует условную концентрацию медиатора, выделившегося в ответ на импульс. Начальные условия:  $\rho(0) = 0$ .

В уравнении выше  $T_s(t)$  представляет собой постоянную времени, определяемую по формуле

$$T_s(t) = \begin{cases} \tau_s, & x(t) > 0, \\ \tau_d, & x(t) \leq 0, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\tau_s$  — постоянная времени выделения медиатора,  $\tau_d$  — постоянная времени распада медиатора.  $F_{PreI}(\rho)$  — функция, имитирующая эффект пресинаптического торможения, описываемая в виде:

$$F_{PreI}(\rho) = \max \left( 0, \begin{cases} 4\xi(\rho - \xi\rho^2), & \xi \geq 0.5 \\ \rho, & \xi = 0 \end{cases} \right), \quad (4)$$

где  $\zeta \in 0, [0.5, \infty)$  — критическое значение концентрации медиатора, при котором начинает сказываться эффект пресинаптического торможения (нулевая величина означает отказ от использования эффекта пресинаптического торможения).

Заметим, что в данной модели вклад в меру эффективности воздействия синапса на сегмент мембраны вносят как его физические параметры  $R_s$  и  $\varepsilon_s$ , так и вес  $w$ . Это связано с унификацией использования модели синапса — в режиме оптимизации параметров нейронной сети (например, по правилу STDP — Spike-timing dependent plasticity) модификации подвергается вес  $w$ . В режиме же структурной адаптации вес синапса принимается равным единице. Физические параметры модели в любом случае подбираются исходя из специфики моделируемой структуры связей.

Непосредственно на ионный механизм мембраны нейрона оказывает влияние синаптический ток  $i_s$ , пропорциональный эффективной проводимости синапса.

**1.3. Модель ионного механизма сегмента мембраны.** В работах [11, 12] предложена модель ионного механизма, который имеет три основные характеристики: сопротивление  $R_m$ , емкость  $C_m$  и концентрацию ионов  $E_m$ , поддерживаемую насосной функцией канала внутри клетки. Произведение  $T_m = R_m C_m$  характеризует инертность канала в покое, то есть скорость восстановления нормальной концентрации ионов в клетке.

Модель ионного механизма отражает изменение потенциала мембраны в зависимости от влияния синапса, заключающегося в потере эффективности насосной функции канала и в снижении концентрации ионов в клетке с постоянной времени этого процесса  $T(t) = R^I(t)C_m$ .

Сопротивление  $R^I(t)$  определим из соотношения

$$\frac{1}{R^I(t)} = \frac{i_{s1}(t)}{\varepsilon_{s1}} + \frac{i_{s2}(t)}{\varepsilon_{s2}} + \dots + \frac{i_{sn}(t)}{\varepsilon_{sn}} + \frac{1}{R_m} = g_\Sigma(t) + \frac{1}{R_m}, \quad (5)$$

где  $i_{s1}(t), i_{s2}(t), \dots, i_{sn}(t)$  — синаптические токи активных синапсов, действующих на данный ионный механизм;  $\varepsilon_{s1}, \varepsilon_{s2}, \dots, \varepsilon_{sn}$  — ЭДС синапсов;  $g_\Sigma(t) = i_{s\Sigma}(t)/\varepsilon_s$  — суммарная проводимость моделей активных синапсов,  $i_{s\Sigma}(t)$  — суммарный синаптический ток,  $R_m > 0$  — сопротивление мембраны. Далее будем считать, что ЭДС всех синапсов равны.

Соответствующая система уравнений приведена ниже.

$$\left. \begin{aligned} T_I \frac{du}{dt} &= u_\Sigma - (1 + g_\Sigma R_m)u \\ T_I &= \frac{C_m}{g_\Sigma + R_m^{-1}} \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

где  $u_\Sigma(t)$  — ожидаемый вклад сегмента в величину внутриклеточного потенциала при отсутствии внешнего возбуждения, которая определяется активностью предыдущих сегментов мембраны,  $u(t)$  — реальный вклад сегмента в величину внутриклеточного потенциала. Начальные условия:  $u(0) = 0$ .

Модель сегмента мембраны структурно состоит из одного или нескольких ионных механизмов и синапсов. Таким образом, каждый сегмент имеет два вектора входов — синаптических входов  $X$  и ожидаемых вкладов в мембранный потенциал  $U_\Sigma$ , и один вектор выходов  $U$ .

**1.4. Модель генератора выходного сигнала.** Еще одно важное звено рассматриваемой модели — генератор выходного сигнала, формирующий события о генерации нейроном импульса. Значение выходного сигнала нейрона определяется следующим выражением:

$$y = F_G(\bar{U}, P_{act}, P_{rest}), \quad (7)$$

где  $\bar{U}$  — среднее значение потенциала с участков мембраны тела нейрона,  $y$  — сигнал (импульс), сообщающий о срабатывании нейрона,  $F_G(\bar{U})$  — функция гистерезиса, возвращающая 1 при

превышении  $\bar{U}$  порога  $P_{act}$ , и 0, если значение  $\bar{U}$  становится ниже порога  $P_{rest}$ . Формируемый выходной сигнал  $y$  поступает в обратные связи перезаряда тела нейрона, что позволяет описывать эффекты абсолютной и относительной рефрактерности, а также остаточной деполяризации нейрона после генерации импульса.

**1.5. Система уравнений модели нейрона.** Система уравнений, описывающая модель нейрона, содержит  $N$  дифференциальных уравнений первого порядка, где  $N$  вычисляется по формуле

$$N = \sum_{i=1}^L \left( 1 + L_D^i + N_B^i + \sum_{l=1}^{L_D^i} N_l^i \right), \quad (8)$$

где  $L$  — число сегментов тела нейрона,  $L_D^i$  — число сегментов дендрита, соответствующего  $i$ -му сегменту тела,  $N_B^i$  — суммарное число возбуждающих и тормозных синапсов на  $i$ -м сегменте тела нейрона,  $N_l^i$  — суммарное число возбуждающих и тормозных синапсов на  $l$ -м сегменте дендрита  $i$ -го сегмента тела нейрона.

Несмотря на кажущуюся сложность, как говорилось выше, благодаря принятой модели входных и выходных сигналов, при численном решении такую систему уравнений можно на каждом шаге расчета разделить на  $N$  независимых дифференциальных уравнений первого порядка, сшиваемых по граничным условиям в моменты начала или окончания входного и выходного импульса. При этом дополнительно уравнения моделей синапсов становятся линейными. Таким образом, численный расчет всей нейронной сети может быть реализован как расчет системы независимых дифференциальных уравнений первого порядка.

**1.6. Параметры модели.** В Таблице приведены значения параметров моделей всех функциональных элементов нейрона. Значения параметров выбирались таким образом, чтобы наиболее наглядно продемонстрировать возможности качественного описания реакций естественных нейронов с различной структурной организацией мембраны.

Таблица. Значения параметров модели нейрона  
Table. Values of neuron model parameters

<b>Синапс</b>
Постоянная времени выделения медиатора $\tau_s = 0.001$ с
Постоянная времени распада медиатора $\tau_d = 0.005$ с
Амплитуда входного сигнала $E_y = 1$
Коэффициент влияния эффекта пресинаптического торможения $\zeta = 1$
Эквивалентное сопротивление синапса («вес» синапса) $R_s = 2 \cdot 10^7$ Ом
ЭДС синаптической передачи $\varepsilon_s = -0.07$ В
<b>Ионный механизм мембраны</b>
Эквивалентное сопротивление мембраны в состоянии покоя $R_0 = 1 \cdot 10^7$ Ом
Эквивалентное сопротивление в состоянии перезаряда $R_F = 1 \cdot 10^7$ Ом
Эквивалентная емкость мембраны $C_m = 1 \cdot 10^{-9}$ Ф
Начальные вклады $\{E_m\} = \{E_m^+, E_m^-\}$ в мембранный потенциал ионных механизмов в состоянии покоя: $E_m^+ = 0.93, E_m^- = -1$
<b>Генератор потенциала действия</b>
Порог активации нейрона $P_{on} = -0.055$ В
Порог деактивации нейрона $P_{off} = -0.1$ В
Постоянная времени, определяющая инерцию генераторного механизма $T_G = 0.005$ с
Амплитуда выходного сигнала $E_y = 1$
Коэффициент обратной связи $F = 2$

## 2. Эксперименты

В разделе описаны результаты математического и численного моделирования на основе модели CSNM. Эксперименты проводились в среде Matlab Simulink с использованием средств библиотеки блоков, предложенной авторами. Параметры блоков заданы по умолчанию в соответствии с Таблицей, если в описании эксперимента не оговорено иное. Численное решение получено с применением явного метода Рунге–Кутты с переменным шагом. Сама библиотека, а также блоки и схемы, использованные в экспериментах, доступны по ссылке [15].

**2.1. Анализ реакций точечной модели на одиночный импульс.** Для сравнения предложенной модели с классической моделью порогового интегратора было выполнено моделирование реакции на импульсное воздействие.

Для обеих моделей было задано единое входное воздействие. На выходе были получены зависимости от времени потенциала мембраны как реакция на поступивший импульс. На рис. 5 изображены результаты моделирования. Графики потенциала мембраны для двух рассматриваемых моделей схожи по предельным амплитудам и временным задержкам. Качественные отличия в форме импульса определяются различием в математическом описании моделей (иная модель мембраны и генератора потенциала действия в модели CSNM).

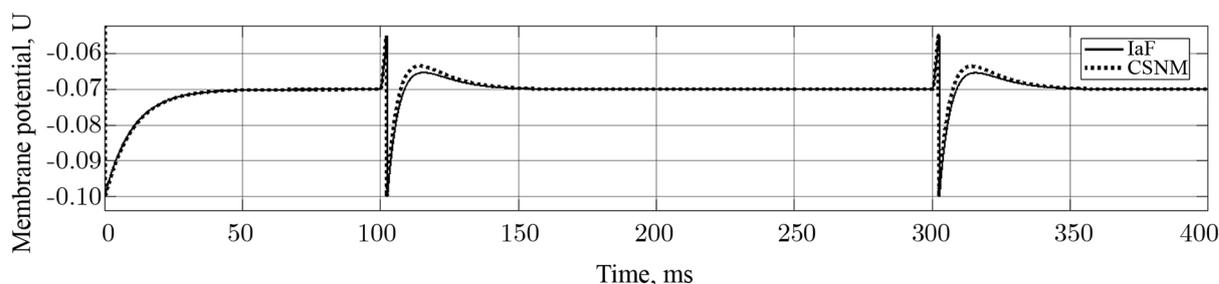


Рис. 5. Сравнение реакций моделей CSNM и IaF на одиночный импульс

Fig. 5. Comparison of reactions of CSNM and IaF models to a single spike

**2.2. Влияние гиперпараметров модели на возбуждение.** Был проведен ряд экспериментов по исследованию поведения модели в зависимости от структурных параметров. Для проведения экспериментов порог нейрона был искусственно завышен, чтобы исключить генерацию выходных импульсов. Таким образом были получены зависимости пикового значения амплитуды потенциала от размера тела  $N_s$  и длины дендрита (рис. 6), от числа активных синапсов  $N_{syn}$  (рис. 7).

По результатам экспериментов можно видеть, что при одинаковом входном воздействии пиковая амплитуда потенциала более крупного нейрона ( $N_s > 1$ ) нелинейно уменьшается. Аналогичная картина наблюдается при изменении длины дендрита — чем длиннее дендрит, по которому был передан возбуждающий сигнал, тем меньше пиковый потенциал при одинаковом входном воздействии. Увеличение числа активных синапсов  $N_{syn}$  способствует росту пиковой амплитуды потенциала нейрона.

На рис. 8 показана зависимость величины задержки формирования выходного импульса от места расположения синапса (или иначе — длины дендрита  $N_d$ ) и размера нейрона  $N_s$ . Таким образом, можно сделать вывод о возможности оптимизировать структуру нейрона под входные паттерны импульсов. При этом параметр  $N_s$  будет определять общую инерционность нейрона,  $N_d$  — величину задержки в срабатывании по приходу сигнала по данному дендриту,  $N_{syn}$  — амплитуду потенциала (и как следствие — частоту выходных импульсов).

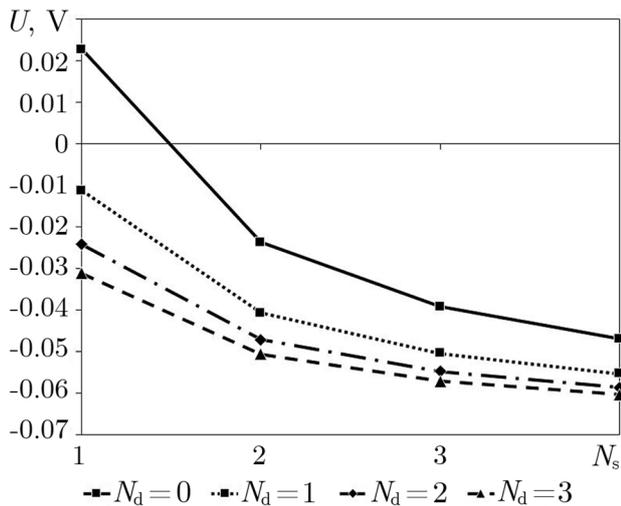


Рис. 6. Зависимость пикового значения амплитуды потенциала от размера тела нейрона при различных длинах дендрита

Fig. 6. Dependence of the peak potential amplitude on the neuron body size at different dendrite lengths

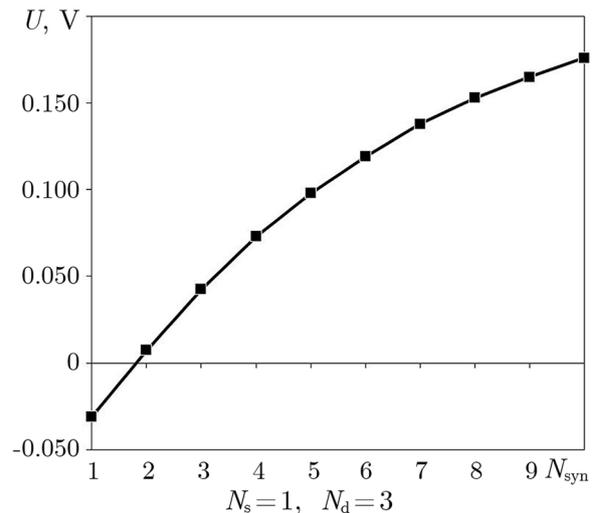


Рис. 7. Зависимость пикового потенциала нейрона от числа активных синапсов

Fig. 7. Dependence of the peak potential on the number of active synapses

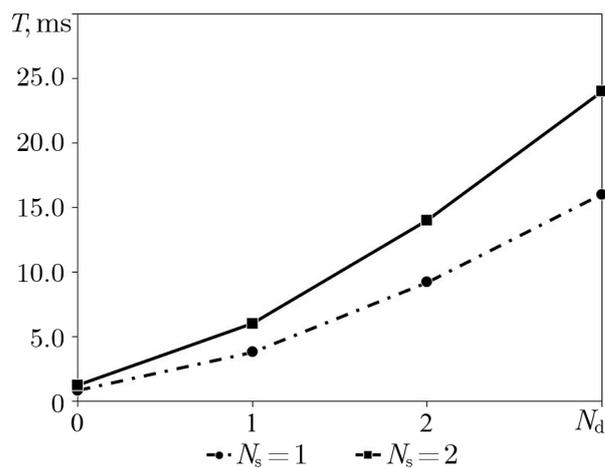


Рис. 8. Зависимость времени задержки между входным и выходным импульсами от длины дендрита и размера нейрона

Fig. 8. Dependence of the delay time between the input and output spikes on the length of the dendrite and the size of the neuron

Способность предложенной модели к структурной адаптации вместе с наблюдаемыми в экспериментах закономерностями позволяют применить CSNM для решения задач распознавания образов. Так, в работе [16] был реализован алгоритм структурного обучения модели нейрона распознаванию паттернов импульсов.

## Заключение

Предложенная сегментная спайковая модель нейрона позволяет качественно описывать поведение биологических нейронов на уровне динамики преобразования импульсных потоков, однако остается открытым вопрос о верификации модели на реальных биологических объектах. Гиперпараметры модели, такие как число сегментов тела, длины дендритов и число синапсов позволяют осуществлять настройку реакций нейрона при фиксированных остальных параметрах. Такая модель может использоваться как элемент спайковых нейронных сетей с детализацией до уровня сегментов дендритных деревьев нейронов. В рамках дальнейших исследований ведется работа по созданию архитектуры и алгоритмов структурного обучения сегментных спайковых нейронных сетей для решения задач машинного обучения. В перспективе планируется создание аппаратных реализаций сегментных спайковых нейронных сетей.

## Список литературы

1. *Shrestha A., Mahmood A.* Review of deep learning algorithms and architectures // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 53040–53065. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2912200.
2. *James C.D., Aimone J.B., Miner N.E., Vineyard C.M., Rothganger F.H., Carlson K.D., Mulder S.A., Draelos T.J., Faust A., Marinella M.J., Naegle J.H., Plimpton S.J.* A historical survey of algorithms and hardware architectures for neural-inspired and neuromorphic computing applications // Biologically Inspired Cognitive Architectures. 2017. Vol. 19. P. 49–64. DOI: 10.1016/j.bica.2016.11.002.
3. *Tavanaei A., Ghodrati M., Kheradpisheh S.R., Masquelier T., Maida A.* Deep learning in spiking neural networks // Neural Networks. 2019. Vol. 111. P. 47–63. DOI: 10.1016/j.neunet.2018.12.002.
4. *Marcus G.* Deep Learning: A Critical Appraisal [Electronic resource] // arXiv:1801.00631. arXiv Preprint, 2018. 27 p. Available from: <https://arxiv.org/abs/1801.00631>.
5. *Gerstner W.* Population dynamics of spiking neurons: Fast transients, asynchronous states, and locking // Neural Computation. 2000. Vol. 12, no. 1. P. 43–89. DOI: 10.1162/089976600300015899.
6. *Gerstner W., Kistler W.M.* Spiking Neuron Models: Single Neurons, Populations, Plasticity. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 480 p. DOI: 10.1017/CBO9780511815706.
7. *Izhikevich E.M.* Simple model of spiking neurons // IEEE Transactions on Neural Networks. 2003. Vol. 14, no. 6. P. 1569–1572. DOI: 10.1109/TNN.2003.820440.
8. *Hodgkin A.L., Huxley A.F.* A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve // Bulletin of Mathematical Biology. 1990. Vol. 52, no. 1–2. P. 25–71. DOI: 10.1007/BF02459568.
9. *Bell J.* Cable theory // In: Binder M.D., Hirokawa N., Windhorst U. (eds) Encyclopedia of Neuroscience. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. DOI: 10.1007/978-3-540-29678-2\_775.
10. *Lindsay A.E., Lindsay K.A., Rosenberg J.R.* Increased computational accuracy in multi-compartmental cable models by a novel approach for precise point process localization // Journal of Computational Neuroscience. 2005. Vol. 19, no. 1. P. 21–38. DOI: 10.1007/s10827-005-0192-7.
11. *Бахшиев А. В., Романов С. П.* Воспроизведение реакций естественных нейронов как результат моделирования структурно-функциональных свойств мембраны и организации синаптического аппарата // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2012. № 7. С. 25–35.
12. *Bakhshiev A., Gundelakh F.* Mathematical model of the impulses transformation processes in natural neurons for biologically inspired control systems development // In: Supplementary Proceedings of the 4th International Conference on Analysis of Images, Social Networks and Texts (AIST-SUP 2015). Vol. 1452. Yekaterinburg, Russia, April 9–11, 2015. Aachen, Germany: CEUR-WS, 2015. P. 1–12.

13. Бахшиев А. В. Перспективы применения моделей биологических нейронных структур в системах управления движением // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2011. № 9. С. 85–90.
14. Экклс Дж. Физиология синапсов. М.: Мир, 1966. 396 с.
15. Neuro Matlab: модели спайковых нейронов в Matlab Simulink [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://github.com/aicomunity/NeuroMatlab>.
16. Бахшиев А. В., Корсаков А. М., Астапова Л. А., Станкевич Л. А. Структурная адаптация сегментной спайковой модели нейрона // Труды VII Всероссийской конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях — 2021». Нижний Новгород, 20–24 сентября 2021. Нижний Новгород: Институт прикладной физики РАН, 2021. С. 30–33.

## References

1. Shrestha A, Mahmood A. Review of deep learning algorithms and architectures. IEEE Access. 2019;7:53040–53065. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2912200.
2. James CD, Aimone JB, Miner NE, Vineyard CM, Rothganger FH, Carlson KD, Mulder SA, Draelos TJ, Faust A, Marinella MJ, Naegle JH, Plimpton SJ. A historical survey of algorithms and hardware architectures for neural-inspired and neuromorphic computing applications. Biologically Inspired Cognitive Architectures. 2017;19:49–64. DOI: 10.1016/j.bica.2016.11.002.
3. Tavanaei A, Ghodrati M, Kheradpisheh SR, Masquelier T, Maida A. Deep learning in spiking neural networks. Neural Networks. 2019;111:47–63. DOI: 10.1016/j.neunet.2018.12.002.
4. Marcus G. Deep Learning: A Critical Appraisal [Electronic resource]. arXiv:1801.00631. arXiv Preprint; 2018. 27 p. Available from: <https://arxiv.org/abs/1801.00631>.
5. Gerstner W. Population dynamics of spiking neurons: Fast transients, asynchronous states, and locking. Neural Computation. 2000;12(1):43–89. DOI: 10.1162/089976600300015899.
6. Gerstner W, Kistler WM. Spiking Neuron Models: Single Neurons, Populations, Plasticity. Cambridge: Cambridge University Press; 2002. 480 p. DOI: 10.1017/CBO9780511815706.
7. Izhikevich EM. Simple model of spiking neurons. IEEE Transactions on Neural Networks. 2003;14(6):1569–1572. DOI: 10.1109/TNN.2003.820440.
8. Hodgkin AL, Huxley AF. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. Bulletin of Mathematical Biology. 1990;52(1–2):25–71. DOI: 10.1007/BF02459568.
9. Bell J. Cable theory. In: Binder MD, Hirokawa N, Windhorst U, editors. Encyclopedia of Neuroscience. Berlin, Heidelberg: Springer; 2009. DOI: 10.1007/978-3-540-29678-2\_775.
10. Lindsay AE, Lindsay KA, Rosenberg JR. Increased computational accuracy in multi-compartmental cable models by a novel approach for precise point process localization. Journal of Computational Neuroscience. 2005;19(1):21–38. DOI: 10.1007/s10827-005-0192-7.
11. Bakhshiev AV, Romanov SP. Reproduction of the reactions of biological neurons as a result of modeling structural and functional properties membrane and synaptic structural organization. Neurocomputers. 2021;(7):25–35 (in Russian).
12. Bakhshiev A, Gundelakh F. Mathematical model of the impulses transformation processes in natural neurons for biologically inspired control systems development. In: Supplementary Proceedings of the 4th International Conference on Analysis of Images, Social Networks and Texts (AIST-SUP 2015). Vol. 1452. Yekaterinburg, Russia, April 9–11, 2015. Aachen, Germany: CEUR-WS; 2015. P. 1–12.
13. Bakhshiev AV. Prospects for application of models of biological neural structures in the motion control system. Information-measuring and Control Systems. 2011;(9):85–90 (in Russian).

14. Eccles JC. The Physiology of Synapses. Berlin, Heidelberg: Springer; 1964. 316 p.  
DOI: 10.1007/978-3-642-64950-9.
15. Neuro Matlab: the spiking neuron models in Matlab Simulink [Electronic resource]. Available from: <https://github.com/aicomunity/NeuroMatlab>.
16. Bakhshiev AV, Korsakov AM, Astapova LA, Stankevich LA. The structural adaptation of the compartment spiking neuron model. In: Proceedings of the VII All-Russian Conference «Nonlinear Dynamics in Cognitive Research – 2021». Nizhny Novgorod, 20–24 September 2021. Nizhny Novgorod: Institute of Applied Physics RAS; 2021. P. 30–33 (in Russian).



*Бахшиев Александр Валерьевич* — родился в Санкт-Петербурге (1979). Окончил с отличием физико-механический факультет Санкт-Петербургского государственного политехнического университета по направлению «Прикладная механика» (2002). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности «Системный анализ, управление и обработка информации» (2017, СПИИРАН). С 2017 года работает в Высшей школе «Автоматизация и робототехника» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета Петра Великого в должности доцента. Научные интересы — искусственные нейронные сети, глубокое обучение, математическое моделирование. Опубликовал свыше 80 научных трудов по указанным направлениям.

Россия, 195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29  
 Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)  
 E-mail: [palexab@gmail.com](mailto:palexab@gmail.com)  
 ORCID: 0000-0002-1284-0088  
 AuthorID (eLibrary.Ru): 172135



*Демчева Александра Андреевна* — родилась в Самаре (1999). Окончила с отличием Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого по направлению «Мехатроника и робототехника» (2021), продолжает обучение в магистратуре. Научные интересы — искусственные нейронные сети, глубокое обучение, математическое моделирование.

Россия, 195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29  
 Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)  
 E-mail: [ademtcheva@gmail.com](mailto:ademtcheva@gmail.com)



Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2022. Т. 30, № 3  
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2022;30(3)

Научная статья  
УДК 51.7  
DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-3-311-321

## Измерение когнитивного потенциала на основе выполнения задач различного уровня сложности

А. Ю. Петухов<sup>1</sup>✉, С. А. Полевая<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики имени М. В. Келдыша РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского, Россия

E-mail: ✉Lectorr@yandex.ru, s453383@mail.ru

Поступила в редакцию 9.11.2021, принята к публикации 26.01.2022,  
опубликована 31.05.2022

**Аннотация.** Цель работы. Статья посвящена теме измерения когнитивного потенциала человека на основе полученных экспериментальных данных с целью выявления его потенциальных возможностей, а также мониторинга их динамики, например, для диагностики восстановления после перенесенного заболевания. Данная цель разбивается в исследовании на две задачи, а именно, чтобы оценить когнитивный потенциал, необходимо разработать два алгоритма. 1. Оценки уровня когнитивной сложности задач. 2. Системы уровней когнитивного потенциала для индивида. **Методы.** Основу методов составляет комплекс экспериментальных, в том числе специально разработанных авторских методик, а также математических методов для обработки данных и расчета введенных специфических параметров для формализации когнитивного потенциала. **Результаты.** На основе указанных методов предложены способы (и конкретные формулы) расчета когнитивного потенциала индивида, используя экспериментальные данные и задачи различного уровня сложности. **Заключение.** В рамках данного исследования создана методология определения значения когнитивного потенциала на основе теории информационных образов/репрезентаций. Для объективизации когнитивных навыков (в том числе, так называемых softskills) разработан специальный web-инструментарий. Полученные метрики позволят исследовать влияние социальных, генетических и патогенетических факторов на динамику когнитивных способностей. Предложена новая теоретическая и технологическая платформа для цифрового картирования и оптимизации когнитивных функций.

**Ключевые слова:** когнитивный потенциал, информационные образы, репрезентации, когнитивные процессы, тест Струпа, мозг, целевые стимулы.

**Благодарности.** Работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 17-02-00307.

**Для цитирования:** Петухов А. Ю., Полевая С. А. Измерение когнитивного потенциала на основе выполнения задач различного уровня сложности // Известия вузов. ПНД. 2022. Т. 30, № 3. С. 311–321. DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-3-311-321

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

## Measuring cognitive potential based on the performance of tasks of various levels of complexity

A. Y. Petukhov<sup>1</sup>✉, S. A. Polevaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Russia

E-mail: ✉Lectorr@yandex.ru, s453383@mail.ru

Received 9.11.2021, accepted 26.01.2022, published 31.05.2022

**Abstract.** *Purpose of work.* The article is devoted to the topic of measuring the cognitive potential of a person on the basis of the obtained experimental data in order to identify its potential capabilities, as well as to monitor their dynamics, for example, to diagnose recovery after an illness. This goal is divided in the study into two tasks, namely, to assess the cognitive potential, it is necessary to develop two algorithms: 1. Assessment of the level of cognitive complexity of tasks. 2. Systems of levels of cognitive potential for an individual. *Methods.* The basis of the methods is a set of experimental, including specially developed author's, techniques, as well as mathematical methods for processing data and calculating the entered specific parameters to formalize the cognitive potential. *Results.* On the basis of these methods, methods (and specific formulas) are proposed for calculating the cognitive potential of an individual using experimental data and tasks of various levels of complexity. *Conclusion.* Within the framework of this study, a methodology for determining the value of cognitive potential was created on the basis of the theory of information images / representations, as well as a specially developed web-toolkit for objectifying cognitive skills (including the so-called softskills). This value can be useful, both in studies related to changes in cognitive abilities as a result of the influence of various internal and external factors (for example, learning, diseases, injuries, etc.), diagnostic goals (for example, with the aim of determining the speed recovery after a disease that affects cognitive activity, such as a stroke or SARS-CoV-2), and in the formation of requirements for certain work positions that significantly depend on the cognitive abilities of the individual.

**Keywords:** cognitive potential, information images, representations, cognitive processes, Stroop test, brain, target stimuli.

**Acknowledgements.** This work was supported by Russian Foundation for Basic Research, grant No. 17-02-00307.

**For citation:** Petukhov AY, Polevaya SA. Measuring cognitive potential based on the performance of tasks of various levels of complexity. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics.* 2022;30(3):311–321. DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-3-311-321

*This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).*

### Введение

Необходимость измерения когнитивного потенциала у индивидов связана с актуальностью решения целого ряда проблем.

1. Объективизации оценки соответствия претендента на какую-либо рабочую / управленческую позицию.
2. Персонализации стратегий передачи знаний и навыков.
3. Совершенствования методов когнитивной диагностики и реабилитации после инсульта или вирусных инфекций (например, covid-19).

При этом на сегодня имеется немало различных отдельных задач и методов, которые с определенными допущениями дают оценку когнитивным способностям испытуемых [1–7]. Вместе с тем, данные методики часто слабо сочетаются друг с другом, имеется немало проблем с обработкой результатов, а также с их интерпретацией.

Для определения и стратификации по сложности различных когнитивных задач в течение 2014–2021 гг. проводились многочисленные экспериментальные исследования, направленные на решение подобных задач в различных условиях. На основе полученных результатов была

разработана соответствующая база — 35000 записей результатов сенсомоторной активности по 433 заданиям разными целевыми функциями для разных возрастных и профессиональных групп. Каждая запись включает время принятия решений, продолжительность моторной реакции, индикаторы ошибок первого и второго рода [8].

Также следует отметить, что за последний год был проведен целый ряд исследований, которые показали характерную и статистически достоверную зависимость когнитивных способностей индивида от перенесенного заболевания КОВИД-19 (с учетом его тяжести и даже при бессимптомном протекании заболевания), см., например [9].

В рамках данного исследования, будут приведены примеры, где когнитивные функции испытуемых изучались при помощи трех тестов: тест простой сенсомоторной реакции, тест на память «7 слов» и модификация теста Stroop. Все они были представлены на Web-платформе КОГНИТОМ (cogni-nn.ru) [8], что позволило провести объективную диагностику с мгновенной обратной связью и минимизировать участие эксперта-посредника.

Цифровое отображение когнитивных процессов определено в пространстве 15 параметров скорости и точности простой и сенсомоторной активности для 3 интерактивных контекстов (тесты) разного уровня сложности.

Таким образом, для корректной оценки когнитивного потенциала необходимо решить две задачи.

1. Разработать алгоритм оценки уровня когнитивной сложности заданий.
2. Разработать алгоритм оценки уровня когнитивного потенциала для индивида.

Ключом к решению поставленных задач может стать предлагаемая нами теория информационных образов / репрезентаций, как основа модели когнитивной активности человеческого мозга.

## 1. Теория информационных образов/репрезентаций

Основа предлагаемой теории — представление об универсальной когнитивной единице [9] информационном образе, о пространстве, в котором он существует, его топологии и свойствах. Информационные образы/репрезентации (далее ИО) можно определить как отображения объектов и событий в любом пространстве признаков [11, 12].

В рамках теории ИО мы представляем разум человека как иерархическую систему взаимодействующих образов, находящуюся под регулярным внешним воздействием.

Образы с более высокой энергией (мы вводим понятие энергии  $E$  для описания коммуникативной активности образов) располагаются «выше» и ближе к краю пространства информационных образов индивида, поэтому гораздо чаще вступают во взаимодействие, и наоборот, низкоактивные с невысокой энергией и большей инерционностью располагаются ближе к центру пространства и относительно редко вступают в активное взаимодействие с внешними стимулами [11].

Можно выделить 4 условных типа ИО, не претендуя на однозначную классификацию.

1. **Доминирующие** образы определяют так называемую доминанту [5] человеческого поведения, его информационный первичный портрет, его основной набор наиболее используемых сознательно информационных образов, условно проводя аналогию с компьютером — содержимое оперативной памяти.
2. **Активные** образы также являются одними из определяющих факторов в информационной системе человека. Однако их влияние несколько меньше доминантных, используются сознательно несколько реже.

Данные два типа ИО относятся в большей степени к эксплицитным когнитивным процессам индивида.

3. **Пассивные** образы являются, как правило, скрытыми в человеческой деятельности и отвечают за его виртуальное поведение — то есть мечты, фантазии, проявления в виртуальной среде, например, в социальных сетях под вымышленными именами, в онлайн-играх и т. д. Также в этой области находится большинство образов, относящихся к рефлексорным приобретенным функциям, пассивным навыкам и т. д.
4. **Отложенные.** Данные образы практически не проявляются внешне в осознанной деятельности индивида, и включаются, как правило, лишь в определенных случаях или оказывают свое воздействие без их осознания и выделения в потребность.

Данные два типа ИО относятся к имплицитной когнитивной деятельности индивида.

Важно отметить, что основную реальную информационную деятельность человека определяют лишь два первых типа образов, третий — в большей степени виртуальную.

Очевидно, что информационный образ невозможно передать путем коммуникации между индивидами неизменным. Ведь, по сути, каждый ИО уникален, ведь индивид обладает специфическим индивидуальным опытом.

Кроме того, человек не способен передать образ, который существует у него в голове, в его пространстве ИО, другому человеку напрямую. Для этого он пользуется различными коммуникативными аппаратами, сформированными у него с помощью социальной надстройки коммуникации или — коммуникационного поля (КП). КП — это информационная общность индивидуального опыта и коллективного бессознательного, сформированная в результате нахождения человека в социуме. Коммуникативный аппарат представляет собой: речь, визуальный способ передачи информации, тактильный, символичный и т. д. Таким образом КП шифрует передаваемый образ в некий код и расшифровывает принимаемый код в собственный образ при коммуникации с другим индивидом.

Соответственно, передача ИО осуществляется с помощью следующей цепочки:

**Образ → коммуникативное поле → сигнал-сообщение →  
→ возмущение в коммуникативном поле другого индивида → восприятие → образ**

Теория ИО позволяет иначе взглянуть на ряд характерных закономерностей в разуме человека, корректно интерпретировать и объяснить некоторые из них. Подробнее см. в работах [11, 12]. Также основы теории применяются для построения моделей для диагностики различных состояний человека [13, 14]. В целом, в мире подобное направление описания когнитивной активности индивида является достаточно популярным, регулярно выходят публикации, посвященные моделированию динамики репрезентаций/образов в человеческом мозге [15–17].

В такой интерпретации реакция индивида на оказанное информационное воздействие будет представлена в виде активации (то есть перемещения образа/образов) с относительно низкого уровня на более высокий. С точки зрения теории ИО, образы, используемые бессознательно, обладают значительно большей инерционностью, что приводит к относительно большому количеству времени для их использования в осознанной коммуникации. При этом человеческий мозг, как правило, выбирает ближайшие образы для взаимодействия, поэтому при осознанной попытке стратификации противоречащих информационных потоков мы видим существенное увеличение интерференции для родного языка и увеличение эффекта когнитивного диссонанса.

## 2. Расчет уровня сложности заданий

Есть несколько способов расчета уровня сложности задач с точки зрения оценки когнитивных способностей отдельно взятого индивида. Их можно упрощенно разделить на два способа:

- 1) относительная оценка;
- 2) абсолютная оценка.

Первая относится к результатам экспериментальных исследований, а именно — относительной оценке ресурсных затрат (когнитивных, временных) конкретного индивида на решение задач в сравнении со средними по выборке, а также количества ошибок.

Второй тип оценки базируется на определении фундаментальных характеристик и различий предлагаемых задач с целью выявления уровня когнитивных затрат, а также порога решений (то есть представляют ли задачи невыполнимую сложность для индивида или группы индивидов).

Для первого типа оценки необходима существенная база накопленных проведенных тестов, чтобы выявить наиболее сложные и менее сложные тесты для различных выборок индивидов в среднем. Такая база фактически была нами создана [8].

Однако такой большой объем данных достаточно трудно корректно обработать в короткие сроки и, по сути, это серьезная задача класса Big Data, требующая отдельного внимания. Поэтому в данном исследовании мы сосредоточимся больше на абсолютной оценке сложности предлагаемых задач.

Основным фактором, определяющим такую сложность, будет для нас количество информационных потоков, которые возникают при решении отдельной задачи [13]. Данное решение можно интерпретировать, как обработку информационного образа (или образов), предлагаемого задачей за определенный промежуток времени (время реакции), и активацию собственного образа для выдачи ответной реакции.

Понятно, что наиболее простой вариант воздействия здесь будет воздействие одного образа без необходимости его распознавания (например, задача, когда необходимо нажимать на кнопку при появлении любого изображения на экране). В тесте «Простая сенсомоторная активность» (ПСМА) предъявлялось последовательно 70 одинаковых стимулов (красный круг диаметром 5 см), межстимульный интервал 1000 мс, экспозиция 100 мс. Задание: нажимать на кнопку сразу, как только на экране появится изображение круга. Продолжительность теста не более 2 мин.

Схематически это отображено на рис. 1.

Более сложный вариант, когда образов несколько и более, требуется когнитивная работа для распознавания и/или сравнения образов.

Классический пример таких задач — тест Stroop [5]. В модифицированном тесте Stroop (Stroop\_smr) стимулами являются цветные изображения слов, обозначающих цвет: красный, зеленый, синий, желтый, черный. Цвет букв назначается из этого же набора вариантов. Межстимульный интервал 1000 мс, экспозиция 500 мс. Задание: нажимать на кнопку сразу, как только цвет букв соответствует смыслу слова. Всего последовательно предъявлялись 99 стимулов, из которых 20 являлись целевыми. Продолжительность теста не более 2 мин. Общая продолжительность тестирования составляла не более 10 минут.

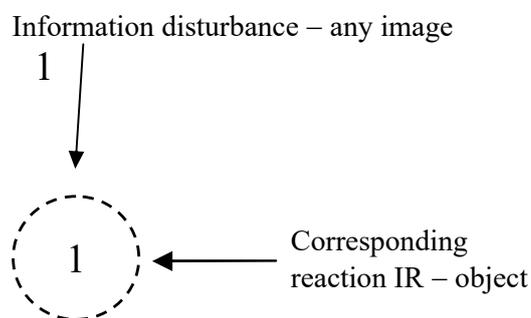


Рис. 1. Простейшая задача

Fig. 1. Simple task

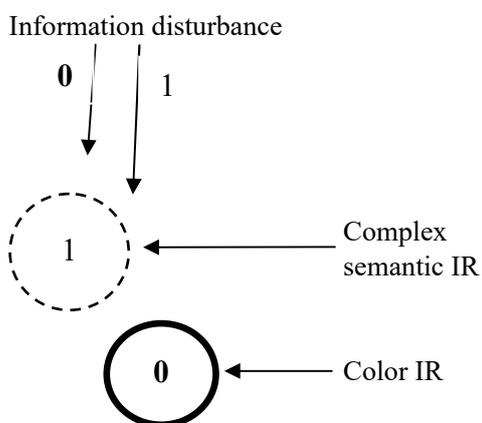
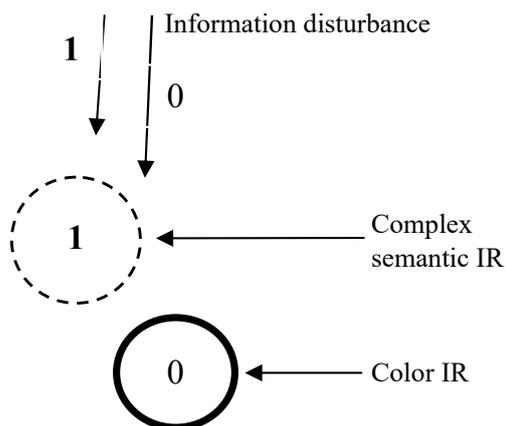


Рис. 2. Тест Stroop

Fig. 2. Test Stroop

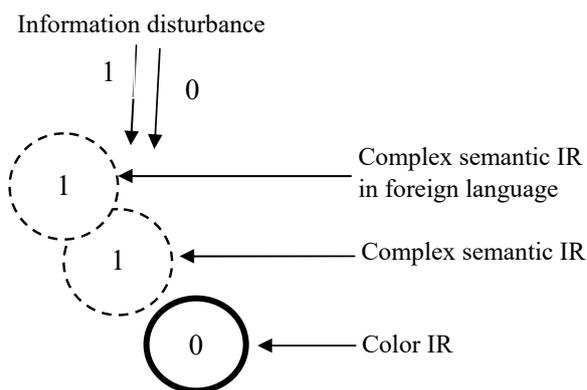


Рис. 3. Схема процесса обработки информационных потоков при переводе иностранного языка

Fig. 3. Framework of information flow for interpretation foreign language

С точки зрения теории ИО, возникающие рассогласования восприятия текстовых и цветовых образов связаны с образованием разных потоков информационного возмущения в пространстве ИО. Соответственно, реакция на данное возмущение дается наиболее близкими и активными образами.

На рис. 2 изображен схематически процесс обработки информационных потоков при тесте Stroop. Есть два условных информационных возмущения (потока) — «текст» — 1 и «цвет» — 0. Они не совпадают, вызывая когнитивный диссонанс взаимодействия двух ИО — смыслового и цветового. Есть два варианта, когда нужно выбрать либо смысл слова — на рис. 2 сверху, либо цвет слова — на рис. 2 снизу.

В целом, концентрация на одном из информационных потоков без активации другого требует осознанной блокировки бессознательных реакций на привычные раздражители (такие, как выбор цвета по цвету) и сам эффект когнитивного диссонанса объясняется здесь рассогласованием активности информационных образов, задействованных разнонаправленными возмущениями коммуникационного поля, несогласующимися с бессознательными адаптивными реакциями. Потребность разума в выстраивании новых логических цепочек в обход уже существующих и сопоставления иных кодов образа с кодами информационного возмущениями коммуникационного поля приводит к информационному «провалу», в результате чего испытуемые иногда «зависали» над выбором цвета, дергая стрелкой на экране монитора от одного к другому. И только после устранения части противоречащих образов в структуре решения делается итоговый выбор.

Следующий уровень сложности представляют задания с необходимостью расшифровки, или определения искомого образа при противоречащих информационных потоках. Например, при переводе с иностранного языка, при невысоком уровне владения (рис. 3).

Таким образом, на основе такой интерпретации когнитивной активности можно стратифицировать уровень сложности предлагаемых задач — в зависимости от количества информационных потоков и типов когнитивных действий, требуемых для их обработки.

Например, на рис. 1 изображен простейший случай, где есть один информационный поток, без необходимости его обработки (интерпретации), таким образом его когнитивная сложность  $S = 1$  (определение появления какого-либо потока)  $\times 1$  (выбор необходимого информационного потока).

Умножение на количество потоков происходит по причине параллельности предоставления информации, а не последовательным способом, что существенно усложняет принятие решения и вызывает появление эффекта когнитивного диссонанса.

Важно отметить, что мы говорим о заданиях без учета эффекта обучения.

На рис. 2 у нас два потока и необходимость в интерпретации одного из них, таким образом:  $S_c = (1(\text{соответствие смыслу или цвету}) + 1(\text{определение появления какого-либо потока})) \times 2(\text{выбор необходимого информационного потока}) = 4$ .

Для рис. 3 добавляется перевод (то есть определение образа на родном языке к образу на иностранном языке) и  $S_c = 6$ .

Примерный вид обобщенной формулы когнитивной сложности задания можно представить так:

$$S_c = \left( \sum_i^n 1 \right) * I(1), \quad (1)$$

где  $n$  — количество задействованных в обработке образов,  $i$  — номер образа, а  $I$  — количество информационных потоков, которые надо обработать.

### 3. Когнитивный потенциал

Таким образом мы определили уровень сложности задач с точки зрения когнитивных затрат на их решение. Однако, очевидно, что ввиду индивидуальных особенностей и способностей человека не следует напрямую говорить о соответствии когнитивного потенциала и уровня решения задач. То есть, если индивид с допустимым количеством ошибок и затрат по времени решает задачи уровня  $S = 5$ , то его когнитивный потенциал равен 5. Ведь вполне возможно, ему по каким-то причинам будет легче решить задачи уровня 6 (например, потому что там будут операции с цветовыми образами, а на уровне 5 ему дали семантические, что конкретно для данного испытуемого является более трудным заданием).

Поэтому в такой парадигме необходимо взять интегральный рейтинг с учетом решения задач разного уровня и с разными типами образов в одном уровне. Кроме того, поскольку ранее уже поднималась тема относительных показателей индивида, то в идеале необходимо учитывать средние показатели по большой выборке индивидов по заданиям различного уровня и с разными типами образов. Также, в этой логике можно определить когнитивный потенциал, как пороговое значение сложности решаемых задач. При превышении порога индивид совершает ошибки.

Также важным фактором для наших расчетов является и то, что в качестве параметров мы будем использовать те показатели, которые нам доступны в рамках исследуемой базы экспериментальных данных. Вместе с тем, следует отметить, что плюсом выбранных показателей является их относительная доступность, отсутствие необходимости в сложном оборудовании для получения (по сути кроме компьютера с мышкой), что дает существенный потенциал для масштабного применения и апробации.

Какие параметры мы можем извлечь из данной базы?

1. Время принятия решений (временной интервал между появлением изображения на экране монитора и моментом нажатия на кнопку) в среднем по заданию —  $T_d$  / среднее время на принятие решений по базе для данного типа заданий —  $T_{dmid}$ .

2. Продолжительность удержания кнопки при моторной реакции (MR, миллисекунды) —  $T_p$  / среднее по базе —  $T_{p\text{mid}}$ .
3. Количество пропусков целевого стимула (ERR1) —  $P_p$  / среднее по базе —  $P_{p\text{mid}}$ .
4. Количество двойных нажатий (ERR2) —  $P_d$  / среднее по базе —  $P_{d\text{mid}}$ .
5. Количество нажатий на нецелевой стимул —  $P_m$  / среднее по базе —  $P_{m\text{mid}}$ .

Обладая набором таких данных, можно определить сложность используемых задач с точки зрения относительных величин по выбранным 5 параметрам. Это будет выглядеть так:

$$S_r = \frac{T_d/T_{d\text{max}} + T_p/T_{p\text{max}} + P_p/P_{p\text{max}} + P_d/P_{d\text{max}} + P_m/P_{m\text{max}}}{u}, \quad (2)$$

где  $u$  — количество параметров, в нашем случае 5, если же какого-то параметра нет (например, в задании нет варианта ошибок), то тогда просто записывается 0 вместо соответствующей дроби. В каждой из дробей делится параметр исследуемого задания на максимальный параметр из базы для всех заданий. Таким образом, значение относительной сложности будет колебаться от 0 до 1, никогда не достигая 0 и имея теоретическую возможность достижения 1 для задания, которое является самым сложным по всем выбранным параметрам.

На основе данных параметров мы составили формулу, определяющую когнитивный потенциал индивида (конечно, с точки зрения данных, полученных в результате прохождения им ряда тестов и сравнения с результатами выборки из базы):

$$P_c = \sum_{j=1}^m \left( \frac{T_{d\text{mid}}^j}{T_d^j} + \frac{T_{p\text{mid}}^j}{T_p^j} + \frac{P_{p\text{mid}}^j}{P_p^j} + \frac{P_{d\text{mid}}^j}{P_d^j} + \frac{P_{m\text{mid}}^j}{P_m^j} \right) S_c^j S_r^j, \quad (3)$$

где  $j$  — номер задания,  $m$  — количество заданий. Соответственно в дробях вычисляется отношение среднего полученного значения параметра по отдельному заданию в базе, поделенного на полученное значение параметра у исследуемого индивида.

Это умножается на сложность задания и суммируется по всем заданиям. Итоговое число и есть условное значение когнитивного потенциала, в котором учитываются и абсолютные факторы когнитивной сложности, и относительные (получаемые из базы данных по заданиям).

### Заключение

В рамках данного исследования создана методология определения значения когнитивного потенциала на основе теории информационных образов/репрезентаций, а также специально разработанного web-инструментария для объективизации когнитивных навыков (в том числе, так называемых — softskills).

Данное знание может быть полезно как в исследованиях связанных с изменением когнитивных способностей в результате влияния различных внутренних и внешних факторов (например, обучения, заболеваний, травм и т. д.), так и в диагностических целях (например, с целью определения скорости восстановления после заболевания, влияющего на когнитивную активность, такого как инсульт или SARS-CoV-2). Кроме того, данный подход можно использовать при формировании требований (в том числе и процессов собеседования) к некоторым трудовым позициям, которые существенным образом зависят от когнитивных способностей индивида.

Как правило, методики, обычно используемые в таких случаях, часто требуют самооценки состояния от людей с нарушенными механизмами осознания, слабо сочетаются друг с другом, имеется немало проблем с обработкой результатов, а также с их интерпретацией. Предлагаемый метод способен помочь в решении подобных проблем.

Следующим этапом развития данной идеи будет проведение экспериментального исследования динамики восстановления когнитивных способностей индивида, сравнения показателей, введенных в нашей работе, с данными других методов оценки восстановления когнитивного потенциала. Это позволит в достаточной степени апробировать подход и проверить его эффективность по сравнению с иными способами.

## Список литературы

1. Александров Ю. И. Психофизиологические закономерности научения и методы обучения // Психологический журнал. 2012. Т. 33, № 6. С. 5–19.
2. Кожевников В. В., Полевая С. А., Шишалов И. С., Бахчина А. В. Мобильный HR-измеритель (HR-измеритель). Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ 2014618634 от 26.08.2014.
3. Vandekerckhove J. A cognitive latent variable model for the simultaneous analysis of behavioral and personality data // Journal of Mathematical Psychology. 2014. Vol. 60. P. 58–71. DOI: 10.1016/j.jmp.2014.06.004.
4. Faugeras O., Inglis J. Stochastic neural field equations: a rigorous footing // Journal of Mathematical Biology. 2015. Vol. 71, no. 2. P. 259–300. DOI: 10.1007/s00285-014-0807-6.
5. Kooi B. W. Modelling the dynamics of traits involved in fighting-predators-prey system // Journal of Mathematical Biology. 2015. Vol. 71, no. 6–7. P. 1575–1605. DOI: 10.1007/s00285-015-0869-0.
6. Haazebroek P., van Dantzig S., Hommel B. A computational model of perception and action for cognitive robotics // Cognitive Processing. 2011. Vol. 12, no. 4. P. 355. DOI: 10.1007/s10339-011-0408-x.
7. Geukes S., Gaskell M. G., Zwitserlood P. Stroop effects from newly learned color words: effects of memory consolidation and episodic context // Frontiers in Psychology. 2015. Vol. 6. P. 278. DOI: 10.3389/fpsyg.2015.00278.
8. Полевая С. А., Еремин Е. В., Буланов Н. А., Бахчина А. В., Ковальчук А. В., Парин С. Б. Событийно-связанная телеметрия ритма сердца для персонализированного дистанционного мониторинга когнитивных функций и стресса в условиях естественной деятельности // Современные технологии в медицине. 2019. Т. 11, № 1. С. 109–115. DOI: 10.17691/stm2019.11.1.13.
9. Almeria M., Cejudo J. C., Sotoca J., Deus J., Krupinski J. Cognitive profile following COVID-19 infection: Clinical predictors leading to neuropsychological impairment // Brain, Behavior, & Immunity – Health. 2020. Vol. 9. P. 100163. DOI: 10.1016/j.bbih.2020.100163.
10. Анохин К. В. Генные зонды для картирования нервных сетей при обучении // Принципы и механизмы деятельности мозга человека. Л.: Наука, 1989. С. 191–192.
11. Petukhov A. Y., Polevaya S. A., Yakhno V. G. The theory of information images: Modeling based on diffusion equations // International Journal of Biomathematics. 2016. Vol. 9, no. 6. P. 1650087. DOI: 10.1142/S179352451650087X.
12. Petukhov A. Y., Polevaya S. A. Modeling of communicative individual interactions through the theory of information images // Current Psychology. 2017. Vol. 36, no. 3. P. 428–433. DOI: 10.1007/s12144-016-9431-5.
13. Petukhov A. Y., Polevaya S. A. Modeling of cognitive brain activity through the information images theory in terms of the bilingual Stroop test // International Journal of Biomathematics. 2017. Vol. 10, no. 7. P. 1750092. DOI: 10.1142/S1793524517500929.
14. Petukhov A. Y., Polevaya S. A., Polevaya A. V. Experimental diagnostics of the emotional state of individuals using external stimuli and a model of neurocognitive brain activity // Diagnostics. 2022. Vol. 12, no. 1. P. 125. DOI: 10.3390/diagnostics12010125.

15. *Friston K. J., Price C. J.* Dynamic representations and generative models of brain function // *Brain Research Bulletin*. 2001. Vol. 54, no. 3. P. 275–285. DOI: 10.1016/S0361-9230(00)00436-6.
16. *Güçlü U., van Gerven M. A. J.* Modeling the dynamics of human brain activity with recurrent neural networks // *Frontiers in Computational Neuroscience*. 2017. Vol. 11. P. 7. DOI: 10.3389/fncom.2017.00007.
17. *Herweg N. A., Kahana M. J.* Spatial representations in the human brain // *Frontiers in Human Neuroscience*. 2018. Vol. 12. P. 297. DOI: 10.3389/fnhum.2018.00297.

## References

1. Alexandrov YI. Psychophysiological regularities of learning and methods of training. *Psychological Journal*. 2012;33(6):5–19 (in Russian).
2. Kozhevnikov VV, Polevaya SA, Shishalov IS, Bakhchina AV. Mobile HR-Meter (HR-Meter). Certificate of State Registration of Computer Programs 2014618634 dated 26.08.2014 (in Russian).
3. Vandekerckhove J. A cognitive latent variable model for the simultaneous analysis of behavioral and personality data. *Journal of Mathematical Psychology*. 2014;60:58–71. DOI: 10.1016/j.jmp.2014.06.004.
4. Faugeras O, Inglis J. Stochastic neural field equations: a rigorous footing. *Journal of Mathematical Biology*. 2015;71(2):259–300. DOI: 10.1007/s00285-014-0807-6.
5. Kooi BW. Modelling the dynamics of traits involved in fighting-predators-prey system. *Journal of Mathematical Biology*. 2015;71(6–7):1575–1605. DOI: 10.1007/s00285-015-0869-0.
6. Haazebroek P, van Dantzig S, Hommel B. A computational model of perception and action for cognitive robotics. *Cognitive Processing*. 2011;12(4):355. DOI: 10.1007/s10339-011-0408-x.
7. Geukes S, Gaskell MG, Zwitserlood P. Stroop effects from newly learned color words: effects of memory consolidation and episodic context. *Frontiers in Psychology*. 2015;6:278. DOI: 10.3389/fpsyg.2015.00278.
8. Polevaya SA, Eremin EV, Bulanov NA, Bakhchina AV, Kovalchuk AV, Parin SB. Event-related telemetry of heart rate for personalized remote monitoring of cognitive functions and stress under conditions of everyday activity. *Modern Technologies in Medicine*. 2019;11(1):109–115. DOI: 10.17691/stm2019.11.1.13.
9. Almeria M, Cejudo JC, Sotoca J, Deus J, Krupinski J. Cognitive profile following COVID-19 infection: Clinical predictors leading to neuropsychological impairment. *Brain, Behavior, & Immunity – Health*. 2020;9:100163. DOI: 10.1016/j.bbih.2020.100163.
10. Anokhin KV. The genetic probes for mapping the neural network during training // In: *The Principles and Mechanisms of the Human Brain*. Leningrad: Nauka; 1989. P. 191–192 (in Russian).
11. Petukhov AY, Polevaya SA, Yakhno VG. The theory of information images: Modeling based on diffusion equations. *International Journal of Biomathematics*. 2016;9(6):1650087. DOI: 10.1142/S179352451650087X.
12. Petukhov AY, Polevaya SA. Modeling of communicative individual interactions through the theory of information images. *Current Psychology*. 2017;36(3):428–433. DOI: 10.1007/s12144-016-9431-5.
13. Petukhov AY, Polevaya SA. Modeling of cognitive brain activity through the information images theory in terms of the bilingual Stroop test. *International Journal of Biomathematics*. 2017;10(7):1750092. DOI: 10.1142/S1793524517500929.
14. Petukhov AY, Polevaya SA, Polevaya AV. Experimental diagnostics of the emotional state of individuals using external stimuli and a model of neurocognitive brain activity. *Diagnostics*. 2022;12(1):125. DOI: 10.3390/diagnostics12010125.

15. Friston KJ, Price CJ. Dynamic representations and generative models of brain function. *Brain Research Bulletin*. 2001;54(3):275–285. DOI: 10.1016/S0361-9230(00)00436-6.
16. Güçlü U, van Gerven MAJ. Modeling the dynamics of human brain activity with recurrent neural networks. *Frontiers in Computational Neuroscience*. 2017;11:7. DOI: 10.3389/fncom.2017.00007.
17. Herweg NA, Kahana MJ. Spatial representations in the human brain. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2018;12:297. DOI: 10.3389/fnhum.2018.00297.

*Петухов Александр Юрьевич* — родился в Горьком (1987). Окончил радиофизический факультет Нижегородского государственного университета имени Н. И. Лобачевского (2009). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата политических наук в ННГУ в области моделирования процессов манипуляции сознанием в обществе (2011). В 2015 году принял обязанности руководителя научно-исследовательской лаборатории «Моделирования социальных и политических процессов», также работает в ННГУ на должности доцента. В 2016 году получил звание доцента. С февраля 2020 года – сотрудник Института прикладной математики имени М. В. Келдыша РАН. С декабря 2020 года — руководитель лаборатории в МГУ имени М. В. Ломоносова. Автор монографии на тему моделирования социальных и политических процессов. Опубликовал более 80 статей в рецензируемых научных изданиях.



Россия, 125047 Москва, Миусская площадь, 4  
 Институт прикладной математики имени М. В. Келдыша РАН  
 Россия, 119991 Москва, Ленинские горы, 1  
 Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
 E-mail: Lectort@yandex.ru  
 ORCID: 0000-0002-7412-5397  
 AuthorID (eLibrary.Ru): 623135

*Полевая Софья Александровна* — родилась в Горьком (1964), окончила биологический факультет Горьковского государственного университета (1986). Защитила диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук (ННГУ, 1997) и доктора биологических наук (ИТЭБ, 2009). Автор более 300 научных публикаций и 10 патентов РФ. В настоящее время заведует кафедрой психофизиологии Нижегородского государственного университета. Научные интересы: физика когнитивных систем, алгоритмы кодирования и распознавания сенсорной информации, динамика функциональных состояний, разработка информационных технологий для персонализированной диагностики и оптимизаций когнитивного потенциала и адаптационных процессов.



Россия, 603022 Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23  
 Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского  
 E-mail: s453383@mail.ru  
 ORCID: 0000-0002-3896-787X  
 AuthorID (eLibrary.Ru): 77263



Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2022. Т. 30, № 3  
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2022;30(3)

Научная статья

УДК 159.91

DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-3-322-330

**Клинические аспекты нелинейной динамики когнитивных процессов:  
особенности сенсомоторной активности у пациентов  
на клинической фазе COVID-19**

*С. А. Полевая<sup>1</sup>✉, М. Е. Халак<sup>1,2</sup>, К. С. Липатов<sup>3</sup>, Н. В. Заречнова<sup>3</sup>,  
М. М. Циркова<sup>1,3</sup>, Е. В. Еремин<sup>1</sup>, Н. А. Буланов<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского, Россия

<sup>2</sup>Приволжский исследовательский медицинский университет, Нижний Новгород, Россия

<sup>3</sup>Клиническая больница № 2 Приволжского окружного медицинского центра ФМБА России, Нижний Новгород, Россия

<sup>4</sup>НИУ «Высшая школа экономики», Москва, Россия

E-mail: ✉s453383@mail.ru, m-e-h@yandex.ru, kir\_lipatov@rambler.ru, nvzar@mail.ru,  
cirkova\_mariya@mail.ru, eugenevc@gmail.com, nikbulanov@gmail.com

*Поступила в редакцию 10.11.2021, принята к публикации 5.04.2022, опубликована 31.05.2022*

**Аннотация.** Механизмы ретроградного или антероградного нейронального транспорта обеспечивают миграцию вирусов SARS-CoV-2 в моторные и сенсорные терминалы, что может провоцировать существенные искажения в процессах распознавания информационных образов и формирования программ действий. Цель настоящего исследования — экспериментально определить динамические режимы когнитивной системы у пациентов с COVID-19. Когнитивные процессы отображены в пространстве параметров сенсомоторной активности при решении задач разного уровня сложности на WEB-платформе КОГНИТОМ. Пациентам и здоровым предъявлены одинаковые наборы стимулов в одинаковых функциональных контекстах. Ковид-специфические режимы обработки информации проявились в резком уменьшении скорости когнитивных процессов и увеличении количества пропусков целевых событий. Полученные данные открывают новые возможности для построения биологоправдоподобной модели когнитивной системы с учетом особенностей нейрональной платформы при COVID-19.

**Ключевые слова:** когнитивные процессы, информационные технологии, цифровизация, COVID-19.

**Благодарности.** Работа выполнена при частичной поддержке РФФ, грант № 22-18-20075.

**Для цитирования:** Полевая С. А., Халак М. Е., Липатов К. С., Заречнова Н. В., Циркова М. М., Еремин Е. В., Буланов Н. А. Клинические аспекты нелинейной динамики когнитивных процессов: особенности сенсомоторной активности у пациентов на клинической фазе COVID-19 // Известия вузов. ПНД. 2022. Т. 30, № 3. С. 322–330. DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-3-322-330

*Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).*

## Clinical aspects of nonlinear dynamics of cognitive processes: features of sensorimotor activity in patients at the clinical phase of COVID-19

S. A. Polevaya<sup>1</sup>✉, M. E. Khalak<sup>1,2</sup>, K. S. Lipatov<sup>3</sup>, N. V. Zarechnova<sup>3</sup>,  
M. M. Cirkova<sup>1,3</sup>, E. V. Eremin<sup>1</sup>, N. A. Bulanov<sup>4</sup>

<sup>1</sup>National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2</sup>Privolzhsky Research Medical University of the MOH Russia, Nizhny Novgorod, Russia

<sup>3</sup>Clinical Hospital No. 2, Privolzhsky District Medical Center

of Federal Medico-Biological Agency of Russia, Nizhny Novgorod, Russia

<sup>4</sup>National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

E-mail: ✉s453383@mail.ru, m-e-h@yandex.ru, kir\_lipatov@rambler.ru, nvzar@mail.ru,  
cirkova\_mariya@mail.ru, eugenevc@gmail.com, nikbulanov@gmail.com

Received 10.11.2021, accepted 5.04.2022, published 31.05.2022

**Abstract.** The mechanisms of retrograde or anterograde neuronal transport ensure the migration of SARS-CoV-2 viruses to motor and sensory terminals, which can provoke significant distortions in the processes of information pattern recognition and the formation of action programs. The *purpose* of this study is to experimentally determine the dynamic modes of the cognitive system in patients with COVID-19. Cognitive processes are displayed in the space of parameters of sensorimotor activity when solving problems of different levels of complexity on the COGNITOM WEB platform. Patients and healthy individuals are presented with the same sets of stimuli in the same functional contexts. Covid-specific modes of information processing were manifested in a sharp decrease in the speed of cognitive processes and an increase in the number of missed target events.

**Keywords:** cognitive processes, information technology, digitalization, COVID-19.

**Acknowledgements.** The work was supported in part by the Russian Science Foundation grant No. 22-18-20075.

**For citation:** Polevaya SA, Khalak ME, Lipatov KS, Zarechnova NV, Cirkova MM, Eremin EV, Bulanov NA. Clinical aspects of nonlinear dynamics of cognitive processes: features of sensorimotor activity in patients at the clinical phase of COVID-19. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2022;30(3):322–330. DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-3-322-330

*This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).*

### Введение

Свойства информационных систем проявляются в искажениях, которые они вносят в информационный сигнал. Цифровизация искажений при различных функциональных состояниях открывает новые возможности для построения биологоправдоподобных моделей когнитивных систем с учетом возрастных, клинических и индивидуальных особенностей когнитивного агента.

Пандемия COVID-19 актуализировала комплекс патологических состояний, связанных с рисками нарушения когнитивных функций: тяжелый острый респираторный синдром (ТОРС), хронический стресс, мультисистемный воспалительный синдром, синдром диссеминированного внутрисосудистого свертывания крови [1]. У значительной части пациентов с COVID-19 наблюдается чрезвычайно низкая сатурация крови кислородом, но, что примечательно, непропорционально мало симптомов церебральной, или «счастливой» гипоксии. Кислородное голодание головного мозга может провоцировать неврологические нарушения, особенно в областях мозга, очень чувствительных к гипоксии. Когнитивной дисфункции способствуют ишемические или гипоксические поражения гиппокампа, базальных ганглиев, мозжечка, нарушения функциональных связей, типичные для ТОРС. Специфические изменения когнитивных процессов могут быть связаны со специфическими нейротропными проявлениями активности коронавирусов [2]. Свойства SARS-CoV-2 как катализатора и ускорителя агрегации белков головного мозга способствуют серьезным повреждениям структуры и функции центральной нервной системы (ЦНС),

включая инфекции иммунных макрофагов, микроглии или астроцитов, тяжелый энцефалит, токсическую энцефалопатию и тяжелые острые демиелинизирующие поражения. Данные ФМРТ свидетельствуют, что очаги деструкции распространяются на комплекс подкорковых структур, захватывают таламус, базальные ганглии и зоны неокортекса, включенные в лимбическую систему. Нейроанатомическая схема поражений мозга хорошо согласуется с нейроархитектурой дофаминергических путей. Неслучайно одним из проявлений действия SARS-CoV-2 является снижение активности дофамина в нигростриатном комплексе [3]. Механизмы ретроградного или антероградного нейронального транспорта обеспечивают миграцию вирусов в моторные и сенсорные терминалы, что может провоцировать существенные искажения сенсомоторных реакций любого уровня сложности. Таким образом, SARS-CoV-2 поражает основные компоненты нейрональной платформы, поддерживающей ключевые когнитивные процессы:

- 1) повреждение экстероцептивных и интероцептивных сенсорных каналов провоцирует нарушение перцептивных процессов отображения объективных сигналов в признаки субъективных информационных образов и сигналы обратной афферентации;
- 2) деструкция таламуса провоцирует нарушение процесса концентрации информационных ресурсов на наиболее значимых объектах и событиях, то есть селективного внимания;
- 3) гипоксические поражения гиппокампа провоцируют нарушения в динамической системе памяти и провоцируют искажения в процессах сохранения и воспроизведения информационных образов;
- 4) деградация дофаминергической системы искажает оценочные функции, нарушает локомоторные процессы, провоцирует редукцию эмоций, в том числе витальных, таких как «боль».

Из сообщений пациентов известен репертуар когнитивных проблем, связанных с COVID-19: спутанное сознание, трудности с концентрацией внимания, редукция двигательной активности, нарушение координации движений, потеря запаха и вкуса, снижение висцеральной чувствительности, резкая редукция оценочных функций и мотиваций [4]. Около 70% пациентов после выписки из больницы имели когнитивный дефицит, который проявлялся в уменьшении скорости и точности когнитивных процессов на фоне депрессии и тревожных расстройств. Данные о скорости и точности когнитивных процессов у пациентов на клинической опасной фазе COVID-19 крайне малочисленны. Уникальные возможности для объективизации открываются благодаря применению дистанционных методов мониторинга на базе WEB-платформ с набором интерактивных сенсомоторных тестов. В нашей работе представлены результаты измерения когнитивных функций на базе WEB-платформы КОГНИТОМ [5] и определены особенности работы с информационными образами у пациентов в клинической фазе болезни.

## 1. Методы

В исследовании приняли участие 30 добровольцев: 15 пациентов с положительным результатом анализа на РНК SARS-CoV-2 методом ПЦР, пневмонией разной степени тяжести, сатурацией не выше 95 и температурой не выше 37°C в возрасте от 40 до 63 лет (группа COVID); 15 здоровых в возрасте от 40 до 54 лет. Критерий исключения: наличие неврологических и психиатрических заболеваний.

Для измерения когнитивных функций на WEB-платформе КОГНИТОМ (cogni-nn.ru) [5] было сформировано 3 интерактивных контекста (тесты), включающих универсальный моторный компонент (нажатие на клавишу) и разные когнитивные компоненты: тест простой сенсомоторной реакции, тест на память «7 слов» и модификация теста Stroop. Когнитивные компоненты тестов отличались сложностью правил принятия решений и, соответственно, когнитивными процессами, обеспечивающими успешные реакции. Когнитивный компонент каждого теста включает

*Полевая С. А., Халак М. Е., Липатов К. С., Заречнова Н. В.,  
Циркова М. М., Еремин Е. В., Буланов Н. А.  
Известия вузов. ПНД, 2022, т. 30, № 3*

сохранение в рабочей памяти целевых признаков и образа действия, перцепцию, селективное внимание, принятие решения и запуск программы действий. Тест «простая сенсомоторная реакция» обеспечивал минимальный уровень когнитивной нагрузки: для успеха достаточно выделить один признак — наличие/отсутствие сенсорного события. Тест на память «7 слов» сложнее: необходимо сохранить в памяти 7 хорошо знакомых слов (вербальных образов) и контролировать наличие/отсутствие целевого образа на экране монитора. Модифицированный тест Stroop отличался количеством целевых признаков и сложностью операций с информационными образами: необходимо обнаружить сенсорное событие (появление на экране слова, обозначающего цвет), определить соответствие вербального (смысл слова) и сенсорного образа (цвет букв на изображении слова), контролировать идентичность этих образов.

В каждом из трех тестов измерялись четыре показателя скорости и точности когнитивного процесса:

- 1) временной интервал между появлением изображения на экране монитора и моментом нажатия на кнопку (CogR, миллисекунды);
- 2) количество пропусков целевого стимула (ERR1);
- 3) количество двойных нажатий (ERR2);
- 4) количество нажатий на нецелевой стимул (ERR3).

Таким образом, по совокупности всех измерений режим когнитивных процессов отображался в пространстве 12 параметров.

В тесте «Простая сенсомоторная активность» (ПСМА) предъявлялось последовательно 70 одинаковых стимулов (красный круг диаметром 5 см), межстимульный интервал 1000 мс, экспозиция 100 мс. Задание: нажимать на кнопку сразу, как только на экране появится изображение круга. Продолжительность теста не более 2 минут.

В Тесте «7 слов» (ПАМЯТЬ) предлагалось запомнить 7 слов: лицо, красный, церковь, бархат, фиалка, кошка, время. Последовательно предъявлялось 58 слов, из которых 19 являлись целевыми. Межстимульный интервал 2000 мс, экспозиция 500 мс. Задание: нажимать на кнопку сразу, как только на экране появится запомненное слово. Продолжительность теста не более 3 минут.

В модифицированном тесте Stroop (Stroop\_smr) стимулами являются цветные изображения слов, обозначающих цвет: красный, зеленый, синий, желтый, черный. Цвет букв назначается из этого же набора вариантов. Межстимульный интервал 1000 мс, экспозиция 500 мс. Задание: нажимать на кнопку сразу, как только цвет букв соответствует смыслу слова. Всего последовательно предъявляется 99 стимулов, из которых 20 являлись целевыми. Продолжительность теста не более 2 минут. Общая продолжительность тестирования составляла не более 10 минут.

Статистический анализ проводился с использованием программы Statistica 10. Применены U-критерий Манна–Уитни и критерий Вилкоксона для оценки различий между двумя группами, многофакторный ANOVA, критерий корреляции Спирмена и кластерный анализ k-means. Статистическая значимость для всех анализов была установлена на уровне  $p < 0.05$ .

## 2. Результаты и обсуждение

Анализ цифровых отображений когнитивных процессов позволил выявить сложный паттерн искажений, спровоцированных инфекцией вирусом SARS-CoV-2 (табл. 1).

Для оценки влияния гипоксии на когнитивные процессы проведен анализ связи параметров сенсомоторной активности с уровнем сатурации. Из двенадцати параметров цифрового отображения наиболее чувствительны к гипоксии два: чем ниже насыщение крови кислородом, тем продолжительнее удержание кнопки (MR) в тесте «Простая сенсомоторная активность» (критерий Спирмена,  $r = -0.71$ ) и продолжительность когнитивного процесса (CogR\_ПАМЯТЬ) в тесте

Таблица 1. Параметры сенсомоторной активности  
Table 1. Sensorimotor activity parameters

Параметры	Группа «COVID»	Группа «КОНТРОЛЬ»	Mann-Whitney U Test, p-value
CogR_ПСМР	393.83±40.93	225.06±27.38	<b>0.002</b>
Err#1_ПСМР	4.33±1.65	1.94±0.42	0.504
Err#2_ПСМР	0.58 ±0.23	2.61± .63	<b>0.035</b>
Err#3_ПСМР	0.42±0.15	0.61±0.12	0.315
CogR_ПАМЯТЬ	786.42±22.81	563.56±31.15	<b>0.000</b>
Err#1_память	2.25±0.52	0.56±0.17	<b>0.007</b>
Err#2_память	0.08±0.08	0.00±0.00	0.247
Err#3_память	1.08±0.23	3.28±0.50	<b>0.002</b>
CogR_Stroop	735.83±21.78	691.89±9.97	<b>0.000</b>
Err#1_Stroop	6.83±1.53	2.39±0.45	<b>0.013</b>
Err#2_Stroop	0.17±0.11	0.11±0.08	0.693
Err#3_Stroop	2.75±0.52	4.22±0.39	<b>0.036</b>

«7 слов» (критерий Спирмана,  $r = -0.78$ ). Связь сатурации с этими параметрами аппроксимируется линейными функциями, позволяющими рассчитывать риски гипоксических нарушений ЦНС по результатам компьютерного тестирования (рис. 1).

Как в простых, так и в сложных контекстах продолжительность когнитивного компонента сенсомоторной активности у пациентов больше, чем у здоровых (рис. 2). Не выявлено значимых эффектов, связанных со сложностью правил принятия решения в разных тестах.

Изменения точности распознавания при ковиде оценивались по разнице количества ошибочных реакций между группами «COVID» и «КОНТРОЛЬ». При минимальном уровне сложности

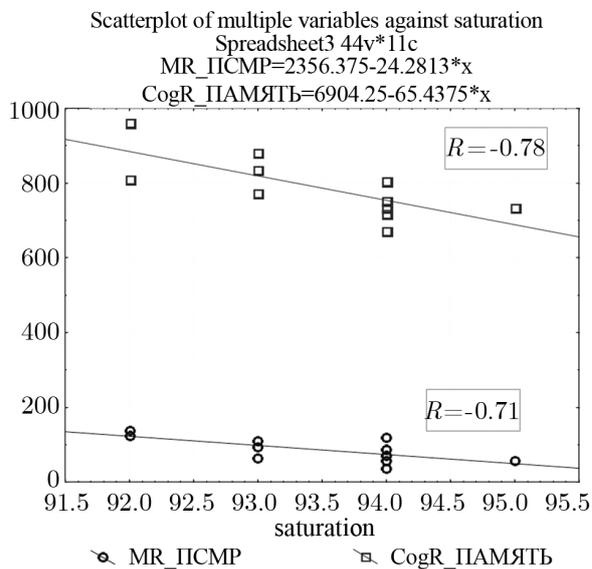


Рис. 1. Влияние насыщения крови кислородом на когнитивные процессы

Fig. 1. Effect of blood oxygen saturation on cognitive processes

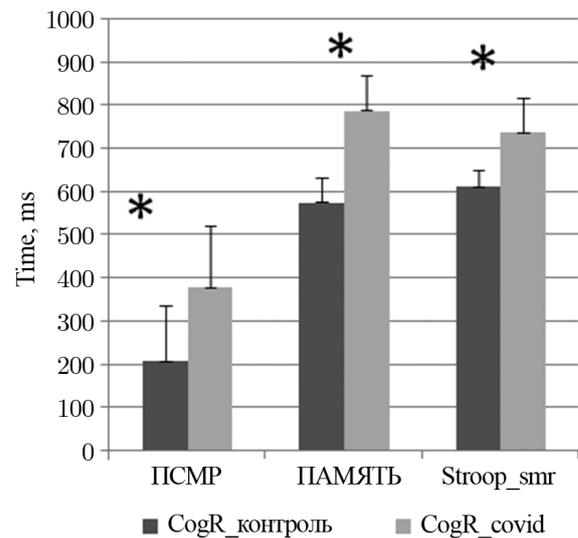


Рис. 2. Продолжительность когнитивного компонента сенсомоторной активности в группах «COVID» и «КОНТРОЛЬ». Звездочкой обозначены достоверные различия при  $p < 0.05$

Fig. 2. The duration of the cognitive component of sensorimotor activity in the “COVID” and “CONTROL” groups. An asterisk indicates significant differences at  $p < 0.05$

Полевая С. А., Халак М. Е., Лунатов К. С., Заречнова Н. В.,  
Циркова М. М., Еремин Е. В., Буланов Н. А.  
Известия вузов. ПНД, 2022, т. 30, № 3

в тесте на простую сенсомоторную активность различия между группами проявилось только в росте количества повторных нажатий на один стимул (ERR2). В сложных контекстах (Тест на память «7 слов» и модифицированный тест Stroop) разница в подобных ошибках отсутствует, но выявлены значимые эффекты, связанные с фактором группа (ANOVA,  $F(4, 112) = 3.9276, p = 0.00506$ ) (рис. 3) в количестве пропусков целевого события (ERR1) и количестве «ложных тревог» (ERR3). В группе «COVID» достоверно больше пропусков и достоверно меньше «ложных тревог».

Принятие правильного решения по результату сравнения вербального и сенсорного образов требует значительных ресурсов рабочей памяти и обеспечивается обменом данными в цикле гиппокамп — базальные ганглии — таламус. Кроме того, для успешной компарации необходима активность дофаминергической системы. Таким образом, в работу вовлекаются элементы нейрональной платформы, поврежденные вирусом SARS-CoV-2, что неминуемо приводит к существенным искажениям когнитивных процессов.

Сравнительный анализ сенсомоторной активности в группах «COVID» и «КОНТРОЛЬ» позволил выделить 4 наиболее информативных параметра: продолжительности когнитивного компонента в каждом из тестов и количество пропусков события в тесте Stroop. На основе этих параметров проведен кластерный анализ и определены диапазоны показателей, характеризующие специфические искажения когнитивных процессов у пациентов в клинической фазе COVID-19 (табл. 2).

Таблица 2. Характеристика кластеров по параметрам когнитивных процессов  
Table 2. Characteristics of clusters by parameters of cognitive processes

Параметры	cluster 1 (КОНТРОЛЬ)	cluster 2 (COVID)
CogR_ПСПМ (мс)	171.78–272.22	345.06–522.34
CogR_ПАМЯТЬ (мс)	520.93–655.07	713.91–850.29
CogR_Stroop (мс)	606.24–659.66	673.82–791.98
Err#1_Stroop	1.35–2.75	5.02–11.78
Чувствительность	0.94	0.75
Специфичность	0.85	0.90

## Выводы

Нарушение структуры и функций нейронных сетей при ковиде закономерно проявились в увеличении продолжительности когнитивного компонента сенсомоторной активности как в простых, так и сложных контекстах. Общим этапом решения задач разного уровня сложности является процесс перцепции. Очевидно, что преобразование зрительного сигнала в субъективный

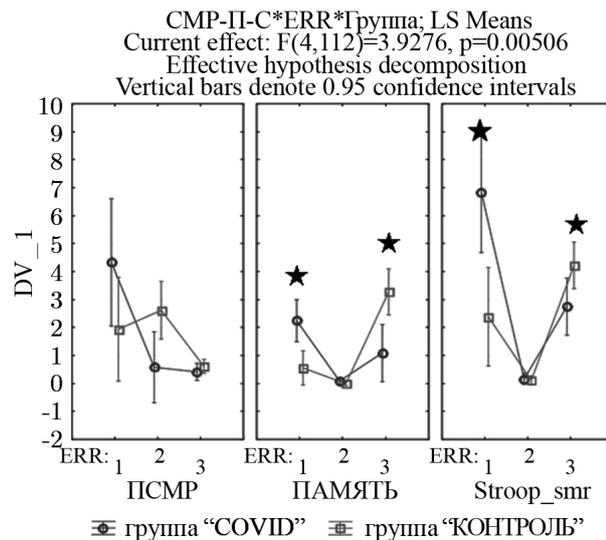


Рис. 3. Сравнительная оценка точности когнитивных процессов при заболевании COVID-19. Звездочкой обозначены достоверные различия  $p < 0.05$

Fig. 3. Comparative assessment of the accuracy of cognitive processes in COVID-19 disease. An asterisk indicates significant differences  $p < 0.05$

информационный образ существенно замедляется из-за связанной с заболеванием COVID-19 дегенерации рецепторов, демиелинизации нервных волокон и деструкции таламуса.

В сложных функциональных контекстах принятие правильного решения по результату сравнения вербального и сенсорного образов в тесте Stroop или при узнавании в тесте «7 слов» требует значительных ресурсов рабочей памяти и обеспечивается обменом данными в цикле гиппокамп — базальные ганглии — таламус. Кроме того, для успешной компарации необходима активность дофаминергической системы. Таким образом, в работу вовлекаются элементы нейрональной платформы, поврежденные вирусом SARS-CoV-2, что неминуемо приводит к существенным искажениям когнитивных процессов.

Анализ изменений в структуре ошибок указывает на повышение строгости критерия, выбранного мозгом для отсева «ложных тревог». Рост пропусков целевого события и уменьшение «ложных тревог» свидетельствуют, что информационная система при ковиде отдает предпочтение отказу от действия. Можно предположить, что замедление процессов обработки информации и отказ от действия являются проявлением гипобиотического режима работы мозга и связаны с общим снижением энергообеспечения физиологических процессов при ковиде [6]. Выявляемый дефицит варьирует в зависимости от тяжести респираторных симптомов, не имеет прямой корреляции с возрастом, образованием или другими демографическими и социально-экономическими переменными, и отмечается в том числе у тех пациентов, у кого не отмечалось других остаточных симптомов.

Цифровые отображения когнитивных процессов, полученных с помощью комплекса интерактивных тестов на WEB-платформе КОГНИТОМ, позволили определить специфику искажений когнитивных процессов у пациентов на клинической фазе COVID-19. Полученные данные открывают новые возможности для построения биологоправдоподобной модели когнитивной системы с учетом особенностей нейрональной платформы при COVID-19.

## Список литературы

1. *Miskowiak K. W., Johnsen S., Sattler S. M., Nielsen S., Kunalan K., Rungby J., Lapperre T., Porsberg C. M.* Cognitive impairments four months after COVID-19 hospital discharge: Pattern, severity and association with illness variables // *Eur. Neuropsychopharmacol.* 2021. Vol. 46. P. 39–48. DOI: 10.1016/j.euroneuro.2021.03.019.
2. *Beaud V., Crottaz-Herbette S., Dunet V., Vaucher J., Bernard-Valnet R., Du Pasquier R., Bart P.-A., Clarke S.* Pattern of cognitive deficits in severe COVID-19 // *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry.* 2021. Vol. 92, no. 5. P. 567–568. DOI: 10.1136/jnnp-2020-325173.
3. *Mukaetova-Ladinska E. B., Kronenberg G., Raha-Chowdhury R.* COVID-19 and neurocognitive disorders // *Curr. Opin. Psychiatry.* 2021. Vol. 34, no. 2. P. 149–156. DOI: 10.1097/YCO.0000000000000687.
4. *Devita M., Bordignon A., Sergi G., Coin A.* The psychological and cognitive impact of Covid-19 on individuals with neurocognitive impairments: research topics and remote intervention proposals // *Aging Clin. Exp. Res.* 2021. Vol. 33, no. 3. P. 733–736. DOI: 10.1007/s40520-020-01637-6.
5. *Полевая С. А., Еремин Е. В., Буланов Н. А., Бахчина А. В., Ковальчук А. В., Парин С. Б.* Событийно-связанная телеметрия ритма сердца для персонифицированного дистанционного мониторинга когнитивных функций и стресса в условиях естественной деятельности // *Современные технологии в медицине.* 2019. Т. 11, № 1. С. 109–115. DOI: 10.17691/stm2019.11.1.13.
6. *Drury R. L., Jarczok M., Owens A., Thayer J. F.* Wireless heart rate variability in assessing community COVID-19 // *Front. Neurosci.* 2021. Vol. 15. P. 564159. DOI: 10.3389/fnins.2021.564159.

*Полевая С. А., Халак М. Е., Лунатов К. С., Заречнова Н. В.,  
Циркова М. М., Еремин Е. В., Буланов Н. А.*  
Известия вузов. ПНД, 2022, т. 30, № 3

## References

1. Miskowiak KW, Johnsen S, Sattler SM, Nielsen S, Kunalan K, Rungby J, Lapperre T, Porsberg CM. Cognitive impairments four months after COVID-19 hospital discharge: Pattern, severity and association with illness variables. *Eur. Neuropsychopharmacol.* 2021;46:39–48. DOI: 10.1016/j.euroneuro.2021.03.019.
2. Beaud V, Crottaz-Herbette S, Dunet V, Vaucher J, Bernard-Valnet R, Du Pasquier R, Bart PA, Clarke S. Pattern of cognitive deficits in severe COVID-19. *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry.* 2021;92(5):567–568. DOI: 10.1136/jnnp-2020-325173.
3. Mukaetova-Ladinska EB, Kronenberg G, Raha-Chowdhury R. COVID-19 and neurocognitive disorders. *Curr. Opin. Psychiatry.* 2021;34(2):149–156. DOI: 10.1097/YCO.0000000000000687.
4. Devita M, Bordignon A, Sergi G, Coin A. The psychological and cognitive impact of Covid-19 on individuals with neurocognitive impairments: research topics and remote intervention proposals. *Aging Clin. Exp. Res.* 2021;33(3):733–736. DOI: 10.1007/s40520-020-01637-6.
5. Poleyva SA, Eremin EV, Bulanov NA, Bakhchina AV, Kovalchuk AV, Parin SB. Event-related telemetry of heart rate for personalized remote monitoring of cognitive functions and stress under conditions of everyday activity. *Modern Technologies in Medicine.* 2019;11(1):109–115. DOI: 10.17691/stm2019.11.1.13.
6. Drury RL, Jarczok M, Owens A, Thayer JF. Wireless heart rate variability in assessing community COVID-19. *Front. Neurosci.* 2021;15:564159. DOI: 10.3389/fnins.2021.564159.

*Полевая Софья Александровна* — родилась в Горьком (1964), окончила биологический факультет Горьковского государственного университета (1986). Защитила диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук (ННГУ, 1997) и доктора биологических наук (ИТЭБ, 2009). В настоящее время заведует кафедрой психофизиологии Нижегородского государственного университета. Научные интересы: физика когнитивных систем, алгоритмы кодирования и распознавания сенсорной информации, динамика функциональных состояний, разработка информационных технологий для персонализированной диагностики и оптимизаций когнитивного потенциала и адаптационных процессов. Автор более 300 научных публикаций и 10 патентов РФ.



Россия, 603022 Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23  
Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского  
E-mail: s453383@mail.ru  
ORCID: 0000-0002-3896-787X  
AuthorID (eLibrary.Ru): 77263  
WOS Research ID: C-7512-2012  
Scopus Author ID: 6504648647

*Халак Мария Евгеньевна* — родилась в Горьком (1982). Кандидат психологических наук, ассистент кафедры общей и клинической психологии ПИМУ, старший преподаватель кафедры психофизиологии ННГУ им. Н. И. Лобачевского. Сфера профессиональной деятельности: кризисный психолог, нейропсихолог, специалист по сопровождению семей, имеющих детей с особенностями развития, системный семейный психолог. Область научных интересов: психофизиология, нейропсихология, клиническая психология, психологическое сопровождение реабилитации, нейробиоуправление, биоэтика.



603950 Нижний Новгород, пл. Минина и Пожарского, 10/1  
Приволжский исследовательский медицинский университет Минздрава РФ  
E-mail: m-e-h@yandex.ru  
ORCID: 0000-0003-1897-8894  
AuthorID (eLibrary.Ru): 1070310  
Scopus AuthorID: 57223427123



Липатов Кирилл Сергеевич — окончил Нижегородскую государственную медицинскую академию по специальности «терапия» (1996). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата медицинских наук. После окончания академии работал врачом-терапевтом (1996–1998), врачом-нефрологом (1998–2014), зам. главного врача КБ № 1 по медицинской части. В настоящее время — главный врач клинической больницы № 2, зав. центром амбулаторного диализа, ассистент кафедры выездного и инновационного обучения по интегрированным дисциплинам Медико-биологического университета инноваций и непрерывного образования ФГБУ «ГНЦ — ФМБЦ им. А. И. Бурназяна» ФМБА России. Область научных и практических интересов: нефрология; электронный документооборот, информатизация в здравоохранении. Автор более 28 научных работ по различным аспектам нефрологии и организации здравоохранения. Имеет 1 патент на изобретение.

Россия, 603032 Нижний Новгород, ул. Гончарова, 1д  
Клиническая больница № 2 Приволжского окружного медицинского центра ФМБА России  
E-mail: kir\_lipatov@rambler.ru  
AuthorID (eLibrary.Ru): 1126811

*Заречнова Наталья Владимировна* — начальник центра анестезиологии и реанимации ГБУЗ НО «Нижегородский областной клинический онкологический диспансер», кандидат медицинских наук. Автор более 50 научных публикаций.

Россия, 603032 Нижний Новгород, ул. Гончарова, 1д  
Клиническая больница № 2 Приволжского окружного медицинского центра ФМБА России  
E-mail: nvzar@mail.ru  
AuthorID (eLibrary.Ru): 604559



*Циркова Мария Михайловна* — родилась в Горьком (1985). Психолог Отделения медицинской реабилитации КБ № 2 ПОМЦ ФМБА России. Профессиональная деятельность: нейропсихологическая диагностика когнитивных функций, программы когнитивной реабилитации, индивидуальные занятия по восстановлению нарушенных когнитивных функций, мониторинг динамики восстановления когнитивных функций в процессе комплексной реабилитации, работа с родственниками пациентов (создание дома адекватной среды для полноценного восстановления когнитивных функций или компенсации необратимых нарушений, использование компенсаторных стратегий в повседневной жизни). Область научных интересов: нейропсихология, клиническая психофизиология, нейрореабилитация.

Россия, 603022 Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23  
Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского  
Россия, 603032 Нижний Новгород, ул. Гончарова, 1д  
Клиническая больница № 2 Приволжского окружного медицинского центра ФМБА России  
E-mail: cirkova\_mariya@mail.ru



*Еремин Евгений Викторович* — родился в Горьком (1977). Окончил радиофизический факультет ННГУ по направлению «Физика в медицине и экологии». Младший научный сотрудник кафедры психофизиологии факультета социальных наук ННГУ им. Лобачевского. Является автором более 30 научных публикаций в российских и международных изданиях. Область научных интересов: физика, математика, анализ сердечного ритма.

Россия, 603022 Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23  
Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского  
E-mail: eugenevc@gmail.com  
ORCID: 0000-0001-5707-6063  
AuthorID (eLibrary.Ru): 128231  
Scopus Author ID: 57196752333



*Буланов Никита Алексеевич* — аспирант 2 года обучения НИУ «Высшая школа экономики». Россия, 101000 Москва, Мясницкая улица, 20  
НИУ «Высшая Школа Экономики»  
E-mail: nikbulanov@gmail.com  
ORCID: 0000-0001-5194-5707

*Полевая С. А., Халак М. Е., Липатов К. С., Заречнова Н. В.,  
Циркова М. М., Еремин Е. В., Буланов Н. А.*  
Известия вузов. ПНД, 2022, т. 30, № 3



Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2022. Т. 30, № 3  
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2022;30(3)

Научная статья  
УДК 57.011  
DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-3-331-357

## Нейродинамическая модель творческого познания реляционных сетей с четным циклическим торможением

В. Д. Цукерман

Академия биологии и биотехнологии имени Д. И. Ивановского  
Южного Федерального университета, Ростов-на-Дону, Россия  
E-mail: vtsukerman17@gmail.com

Поступила в редакцию 17.11.2021, принята к публикации 24.03.2022,  
опубликована 31.05.2022

**Аннотация.** Целью исследования является изучение нейродинамических основ творческой деятельности мозга. Современные системы искусственного интеллекта, использующие обучение глубоких нейронных сетей, требуют больших объемов входных данных, высоких вычислительных затрат и длительного времени обучения. Напротив, мозг может обучаться на небольших наборах данных в кратчайшие сроки и, что принципиально важно, кардинально отличается наличием творческих способностей. **Методы.** Исследование выполнено посредством вычислительных экспериментов с нейронными сетями, содержащими 5 и 7 осцилляторных слоёв (контуров), обученных представлять абстрактные концепты определенного класса животных. Схема нейронных сетей с четным циклическим торможением (ЕСI-сетей) содержит только билатеральные тормозные связи и состоит из двух субсетей: референтной некодирующей сети, являющейся аналогом нейронной сети режима мозга по умолчанию и основной информационной сети, получающей временные градиентные последовательности входных сигналов и контекстных входов. После обучения считывание популяционных фазовых кодов выполнялось простым линейным декодером. **Результаты и обсуждение.** Концептуальное обучение сети приводит к генерации ряда пространственных абстрактных изображений, отличающихся наиболее выраженными признаками релевантной линейки животных. В вычислительных экспериментах получен широкий набор изоморфных представлений концептов посредством: а) преобразований пространств изображений в широком диапазоне временных шкал обучающего входного потока сигналов; б) внутренней регуляции временных масштабов ментальных представлений концептов; в) подтверждения на модели зависимости психологической близости концептов от семантической дистанции; г) вызова из памяти (декодирования) распределенных групп нейронов концептов животных, которым сеть не была обучена. **Заключение.** В настоящей работе впервые показано, как используя небольшой набор входных событийных данных (последовательность четырех ССW- и двух СW-сигналов) и весьма ограниченные вычислительные ресурсы, сети с четным циклическим торможением проявляют креативные начала познания на основе реляционных отношений, концептуального обучения и обобщения знаний.

**Ключевые слова:** концептуальное обучение, воображение, семантическое пространство, обобщение.

**Для цитирования:** Цукерман В. Д. Нейродинамическая модель творческого познания реляционных сетей с четным циклическим торможением // Известия вузов. ПНД. 2022. Т. 30, № 3. С. 331–357. DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-3-331-357

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

## Neurodynamic model for creative cognition of relational networks with even cyclic inhibition

V. D. Tsukerman

Academy of Biology and Biotechnology  
of Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

E-mail: vtsukerman17@gmail.com

Received 17.11.2021, accepted 24.03.2022, published 31.05.2022

**Abstract.** The *purpose* of this work is study of the neurodynamic foundations of the creative activity of the brain. Modern AI systems using deep neural network training require large amounts of input data, high computational costs and long training times. On the contrary, the brain can learn from small datasets in no time and, crucially, it is fundamentally creative. *Methods.* The study was carried out through computational experiments with neural networks containing 5 and 7 oscillatory layers (circuits) trained to represent abstract concepts of a certain class of animals. The scheme of neural networks with even cyclic inhibition (ECI networks) contains only bilateral inhibitory connections and consists of two subnets: a reference noncoding network, which is an analogue of the default brain mode neural network, and the main information network that receives time sequences of environmental signals and contextual inputs. After training, the reading of the population phase codes was performed with a simple linear decoder. *Results.* Conceptual learning of the network leads to the generation of a number of spatial abstract images that are distinguished by the most pronounced features of the relevant line of animals. In computational experiments, a wide set of isomorphic representations of concepts was obtained through: a) transformations of image spaces in a wide range of time scales of the training input signal flow, b) internal regulation of the time scales of mental representations of concepts, c) confirmation on the model of the dependence of psychological proximity of concepts on semantic distance; d) calling from memory (decoding) distributed groups of neurons of animal concepts, which the network has not been trained in. *Conclusion.* This paper shows for the first time how, using a small set of event input data (a sequence of 4 CCW and 2 CW signals) and very limited computational resources, ECI networks exhibit creative cognitions based on relational relationships, conceptual learning and generalization of knowledge.

**Keywords:** conceptual learning, imagination, semantic space, generalization.

**For citation:** Tsukerman VD. Neurodynamic model for creative cognition of relational networks with even cyclic inhibition. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics.* 2022;30(3):331–357. DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-3-331-357

*This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).*

### Введение

В последние годы активно развивается новое направление наук о мозге — нейронаука творческой деятельности. Основу этого направления составляют достижения психологических исследований последних десятилетий и новейшие результаты нейробиологических исследований. Предполагается, что ментальные механизмы на нейросетевом уровне, поддерживающие творческое мышление и творческое познание, возникают из взаимодействия когнитивных процессов более низкого уровня [1]. Креативное познание и креативное мышление — это сложные процессы, включающие в себя компоненты внимания, когнитивного контроля, воображения, обобщения и памяти [2]. Вместе с тем, базисом этих творческих процессов служит реляционное мышление, то есть способность мозга устанавливать связи между, казалось бы, несвязанными концептами. Различные аспекты творческого мышления поддерживаются эпизодической и семантической памятью. Семантическая память обеспечивает базовые знания фактов и концептов, которые можно комбинировать для решения творческих задач и генерации новых идей [3], что подтверждается когнитивными и fMRI (Functional magnetic resonance imaging, функциональная магнитно-резонансная томография) исследованиями семантической памяти [4]. Важными понятиями в теориях о роли семантической памяти в творческом мышлении являются концептуальные пространства и семантическая дистанция. В последние годы растёт число доказательств наличия

общих нейронных механизмов, лежащих в основе навигации как в физическом, так и семантическом пространстве, используя в обоих случаях коды направления и расстояния между местами, даже если они являются категорическими и обозначенными символами [5].

Точка зрения, что люди могут использовать одни и те же нейронные механизмы для поддержки представления как пространственной, так и непространственной информации организацией концептов и памяти с помощью пространственных кодов получила прямое экспериментальное подтверждение участия в этом медиальной префронтальной коры и правой энторинальной коры. После тренировки оба региона кодировали расстояния между концептами, что позволяло восстановить точное двумерное представление семантического пространства прямо из их многомерных паттернов активности, при этом правая энторинальная кора (ЕС) демонстрировала периодическую модуляцию как функцию пройденного направления. Эти результаты показывают, что области мозга и схемы кодирования, поддерживающие отношения и движения между пространственными местоположениями у млекопитающих, «повторно используются» в организме человека для представления двумерного мультисенсорного концептуального пространства во время задачи символической категоризации [5].

Концептуальное знание частично организовано в низкомерные геометрии — «когнитивные карты», которые являются аналогами ориентированных на мир представлениями окружения, и ассоциируются с гиппокампальной формацией мозга и «пространствами изображений», которые являются аналогами эгоцентрических пространственных отношений и главным образом ассоциируются с теменной (париетальной) корой. Когнитивные карты — это информация о расстояниях между местоположениями, которые ранее были показаны только в навигационных задачах для физического пространства. Гиппокамп кодирует аналогичным образом расстояния между точками в абстрактном семантическом пространстве непрерывными стимульными признаками, которые были актуальны для приобретения нового концепта [6,7]. Когнитивные карты и пространства изображений могут быть конкретными проявлениями более общей склонности человеческого мозга организовывать знания в низкомерных пространствах [8]. Схемы изображений более абстрактны, чем обычные визуальные ментальные образы, и состоят из динамических пространственных паттернов, которые лежат в основе пространственных отношений и движений, обнаруживаемых в частных реальных изображениях. Низкомерные когнитивные карты и пространства изображений играют ключевую роль в замечательной способности человека проводить аналогии в разных областях. В принципе, проведение аналогий предполагает игнорирование многих различий и сосредоточение внимания на нескольких сходствах между объектами. Кроме того, низкомерные когнитивные карты могут быть важны для создания аналогий между объектами и событиями, которые далеки в нашем опыте, но которые можно сравнить лишь по нескольким выбранным измерениям [8].

Генеративность — важнейшая для когнитивных функций мозга способность, в том числе для планирования будущего, воображения, принятия решений и творческой деятельности. Генеративность дает вклад в поведение предсказанием будущего результата, что явно направляет текущее поведение и творческий потенциал, и указывает на унифицированную роль в познании. Как реализуется генеративность в мозге на нейронном уровне, каковы кандидатные паттерны нейронной активности, кодирующие возможный будущий сценарий? Экспериментально установлено, что гиппокамп представляет альтернативные гипотетические сценарии поочередно и циклически приблизительно каждые 125 мс, что соответствует тета-ритму, то есть мозг моделирует все возможные сценарии поведения, а не только реализуемые в будущем! При этом лежащие в основе паттерны активности имели эквивалентную временную структуру среди различных местоположений и направлений движения, подразумевая общий процесс циклического кодирования. Более того, цикл запускался на всех уровнях: от одиночных клеток до их популяций [9].

В процессе эволюции природа создала организмы, способные отвлекать свое внимание от настоящего момента для создания личного ментального пространства, в котором может быть

реализовано бесконечное количество возможностей. Содержимое этого ментального пространства может принимать разные формы: от фантазий до повторных переживаний прошлого события или воображения того, как может разворачиваться будущее событие. Всё это является актом творческого мышления, ментальным представлением того, что не существует в данный момент [10]. Отметим, что определение «*imagination*» — «воображение» данное Oxford English Dictionary, звучит как «... способность формировать внутренние образы или идеи объектов и ситуаций, которые на самом деле не воспринимаются органами чувств». Какие нейродинамические феномены лежат в основе этой способности мозга — один из основных вопросов настоящего исследования.

Наконец, важнейшей проблемой изучения творческого мышления является понимание языка (кода) мыслей, без которого невозможно представить реализацию огромного когнитивного потенциала мозга. Первое широкое экспериментальное исследование языка мышления для объяснения представления зрительно-пространственных последовательностей провели М. Amalric с соавторами [11]. Исследование взрослых французов, дошкольников, а также людей из группы коренных народов Амазонии — Мундуруку — с ограниченным числовым и геометрическим лексиконом и доступом к школьному образованию, показало возникающие спонтанно примитивы симметрии и вращения. Более того, испытуемые легко комбинировали эти геометрические формы примитивов в иерархически организованные выражения. Теоретическая модель авторов говорит о том, что «испытуемые “сжимали” пространственные последовательности в минимальное внутреннее правило или программу» [11].

Подводя итог настоящего обзора, вкратце отметим следующее. Высокоуровневая когнитивная обработка основана на замечательной способности мозга концептуализировать информацию, то есть выделять один или несколько признаков, свойственных другим объектам окружения. Эти признаки соответствуют абстрактным когнитивным переменным или концептам, знание которых позволяет обобщить и сразу сделать выводы о вновь встреченном предполагаемом объекте или событии. Высокоуровневая когнитивная обработка предполагает наличие языка (кода) мыслей, ментальное сжатие перцептуальной информации, гибкую рекомбинацию более простых частей, использование низкомерных семантических пространств, простых геометрических примитивов и правил. Язык мышления основан на способности мозга устанавливать связи между, казалось бы, несвязанными понятиями (концептами), что определяет реляционную природу нашего мышления. Используя рассмотренные выше фундаментальные характеристики мозговой деятельности, в данной работе впервые представлена нейродинамическая модель творческого познания реляционных нейронных сетей с четным циклическим торможением, включая следующие серии экспериментов.

- Исследование потенциала когнитивных возможностей ЕСИ-сетей.
- Исследование диапазона временных шкал, релевантных генерации абстрактных образов животных.
- Масштабные преобразования объектов посредством внутренней регуляции фазового тайминга событий контекстным входом сети.
- Исследование основ творческого познания нейронных сетей с четным циклическим торможением.

Приведенные серии вычислительных экспериментов являются дальнейшим развитием исследований сетей с четным циклическим торможением, см. работы [12, 13], в которых были впервые подробно описаны математическая модель и архитектура этих сетей с указанием динамических режимов, фазовых переходов, демонстрирующих генезис тета-гамма ритмической активности в базовом модуле — основной информационной единице сети, а также основы фазового кодирования сенсорных событий в мозге. Очередным этапом развития идеи фазового кодирования в осцилляторных сетях стало её применение к навигационному поведению организмов, где были описаны векторно-фазовый и топологический подход автора при вычислительном моделировании данной проблемы [14]. Важным итогом данного периода исследований явилась дифференциация и функциональная специализация информационных единиц на топологические и дирекциональные группировки в каждом ансамбле внешних контуров сети, а также постепенный

переход ансамблей внутренних слоев сети к чисто топологическим. Этот впервые описанный в модели ECI-сетей (neural networks with Even Cyclic Inhibition — ECI networks) нейродинамический феномен имел важный поведенческий функционал: внутренние ансамбли сети определяли местоположение виртуального навигатора, внешние — его пространственную траекторию движения в аллоцентрическом пространственном окружении [14].

Этот результат интересен еще тем, что открытые впервые у грызунов (крыс) гиппокампальные клетки места [15] и энторинальные решетчатые клетки (сетки) [16] получили в модельном нейросетевом исследовании свою роль на популяционном уровне кодирования пространственного поведения. Референтная координатная система ECI-сети определяет схему, в которой пространственная информация, то есть позиция объекта, может быть представлена относительно начальной точки. В зависимости от закрепления начала координатной системы, одна и та же информация может быть закодирована как эгоцентрически, так и аллоцентрически. Если референтная система связана с телом навигатора или частью его тела, например, головой, то представление будет по определению эгоцентрическим. Если начало координат является фиксированной точкой окружения (например, угол комнаты), то представление будет аллоцентрическим. Ясно, что одна и та же пространственная информация, представленная идиотетическими сигналами, например, вестибулярными, может использоваться для описания информации о собственном движении либо эгоцентрически, то есть относительно тела или части тела навигатора, либо аллоцентрически. Вместе эти типы информации дают организмам, совершающим навигацию, ментальную карту пространственного окружения, которая кодирует пространственную информацию в аллоцентрических координатах [7, 17].

Обращаясь вновь к описанному выше тезису о том, что концептуальное знание частично организовано в низкомерные геометрии — «когнитивные карты», которые ассоциируются с гиппокампальной формацией мозга и «пространствами изображений», отметим, что последние определенно относятся к аналогам эгоцентрических пространственных отношений. Добавим также, что когнитивные карты позволяют уйти от так называемой проблемы «проклятия размерности», связанной с тем, что объекты характеризуются многочисленными пространствами признаков, кодирование и распознавание которых в ряде жизненных ситуаций было бы неприемлемо долгим во времени. Поэтому когнитивные карты и пространства абстрактных изображений могут быть конкретными проявлениями более общей склонности человеческого мозга организовывать знания в низкомерных пространствах. Важно, что процесс абстракции решает эту проблему, создавая абстрактные переменные, описывающие признаки, совместно используемые разными конкретными объектами, уменьшая размерность и делая возможным обобщение в новых ситуациях [18].

Исходя из идеи пространственных абстрактных представлений в ментальной деятельности мозга здесь представлены материалы исследования нейродинамической модели построения эгоцентрических пространственных изображений объектов. Результатом этих исследований явилась разработка нейронного кода «мыслей» для обучения и пространственных представлений ряда объектов живых организмов в виде широкомасштабных символьных записей во временном измерении. В ряде современных работ подчеркивается, что люди могут использовать один и тот же нейронный механизм для поддержания представлений как пространственной, так и непространственной информации, организации понятий и воспоминаний с использованием пространственных кодов. Эта точка зрения предсказывает, что одни и те же схемы нейронного кодирования, характеризующие навигацию в физическом пространстве, основанную на расстоянии и направлении, должны лежать в основе навигации по абстрактным семантическим пространствам.

Недавно эта точка зрения получила прямое экспериментальное подтверждение в работе S. Viganò и M. Piazza [5]. Используя fMRI мозга и анализ репрезентативного сходства на основе модели прожектора, авторы обнаружили доказательства реакции мозга как на расстояние, так и на направление. Области, обычно участвующие в пространственной навигации — это медиальная префронтальная кора mPFC и правая энторинальная кора (EC). После тренировки участников

исследования обе области закодировали расстояния между понятиями, что позволило восстановить точное двумерное представление семантического пространства непосредственно из их многомерных паттернов активности, тогда как правая ЕС демонстрировала также периодическую модуляцию в зависимости от пройденного направления [5]. Эти результаты показывают, что области мозга и схемы кодирования, поддерживающие отношения и движения между пространственными местоположениями у млекопитающих, используются также для представления двумерного мультисенсорного концептуального пространства во время задачи символической категоризации у людей.

## 1. Методы

**1.1. Пространственная организация и математическая модель сетей с четным циклическим торможением.** Все экспериментальные серии, представленные в данной работе, были выполнены на осцилляторных нейронных сетях с четным циклическим торможением, впервые описанных в работах автора данной статьи [12, 14]. Схема ЕСI-сетей содержит только рекуррентные тормозные связи и состоит из двух субсетей: референтной не кодирующей, являющейся аналогом Default Mode Network (DMN) — нейронной сети оперативного покоя, иначе говоря, сетью пассивного режима работы или сетью режима мозга по умолчанию (различные переводы с английского языка) [4, 19, 20] и основной информационной сети, получающей временные последовательности внешних информационных сигналов и контекстного входа.

В общем виде математическая модель свободно масштабируемой ЕСI-сети выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \tau_i \frac{dx_i}{dt} = -x_i - b_i z_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} y_j + S_{0i} + S_i(t), \\ T_i \frac{dz_i}{dt} = -z_i + y_i, \\ y_i = \begin{cases} k(x_i - p_i), & x_i > p_i, \\ 0, & x_i \leq p_i, \end{cases} \quad i = 1, \dots, N. \end{cases} \quad (1)$$

В частности, ее отдельный модуль — осцилляторный узел ЕСI-сети можно записать в виде следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \tau_1 \frac{dx_1}{dt} = -x_1 - b_1 z_1 - a_{21} y_2 + S_{01}, \\ T_1 \frac{dz_1}{dt} = -z_1 + y_1, \\ \tau_2 \frac{dx_2}{dt} = -x_2 - b_2 z_2 - a_{12} y_1 + S_{02}, \\ T_2 \frac{dz_2}{dt} = -z_2 + y_2, \\ y_{1,2} = \begin{cases} k(x_{1,2} - p_{1,2}), & \text{для } x_{1,2} > p_{1,2}, \\ 0, & \text{для } x_{1,2} \leq p_{1,2}, \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

где  $x_i$  — мембранные потенциалы нейронов;  $z_i$  — глубина или степень адаптации этих нейронов к постоянному уровню входного воздействия;  $\tau_i$  — постоянные времени входа нейрона;  $T_i$ ,  $b_i$  — параметры, определяющие постоянные времени и уровень адаптации нейронов;  $p_i$  — пороги нейронов;  $a_{ij}$  — веса тормозных связей;  $S_{0i}$  и  $S_i(t)$  — постоянный и переменный входы нейронов, соответственно;  $y_i$  — выходная активность нейронов;  $k$  — коэффициент усиления;  $n$  — число осцилляторных узлов сети.

При определенных параметрах и соотношениях амплитуд внешних входов нейронов отдельный осцилляторный модуль способен к автономной генерации двух ритмов — высокочастотного

(гамма-подобного) и медленноволнового (тета-подобного). Генерация этих ритмов запускается постоянными, но разными уровнями возбуждения и постоянных времени обоих нейронов, а все фазовые манипуляции с высокочастотными пачками осцилляций осуществляются коротким возбуждающим импульсным входом на нейрон с малой постоянной времени входа. Особенностью ритмогенеза в таком модуле является наличие различных режимов генерации колебаний и существование фазовых переходов между ними, в частности, от непрерывного высокочастотного к двухчастотному режиму, то есть медленноволновому, перемежающемуся высокочастотными пачками осцилляций. В такой сети энергия паттернов входных импульсных сигналов приводит к фазовым смещениям высокочастотных гамма-пачек. Вычислительные эксперименты показывают, что фазовая динамика нейронов сети имеет сложную зависимость от целого ряда факторов: состояния сети, энергии входных сигналов, матрицы весов тормозных связей, постоянных времени входов и адаптации нейронов. Ритмогенез отдельного модуля определяется несколькими различными факторами: а) разностью потенциалов покоя обоих нейронов модуля —  $S_{0i}$ ; б) величиной адаптационного параметра нейрона —  $b_a$ ; в) соотношением постоянных времени входов обоих нейронов —  $\tau_i$  и  $T_i$ .

В вычислительных экспериментах решение вышеуказанных систем уравнений производилось численным методом Рунге–Кутты 4-порядка с шагом интегрирования, равным 0.01. Во всех вычислительных экспериментах были приняты следующие численные значения параметров нейронов для адаптивного нейрона модуля:  $\tau_1 = 0.01$ ;  $T_1 = 30$ ;  $b_1 = 10$ ;  $S_{01} = 0.083$ ;  $\alpha_{12} = \alpha_{21} = 2.27$ ; для условного осцилляторного нейрона:  $\tau_2 = 0.5$ ;  $T_2 = 0.8$ ;  $b_2 = 27$ ;  $S_{02} = 1$ ;  $k = 1$ ;  $p_{1,2} = 0$ . Все величины — безразмерные. Величина рекуррентных тормозных межнейронных связей  $\alpha_{ij}$  составляла постоянную величину, равную 0.001. Различие осцилляторных единиц референтной и информационной субсетей состоит лишь в том, что информационные единицы обладают внешними модулирующими входами  $S_i(t)$ , а референтные единицы таких входов не имеют. Во всех вычислительных экспериментах перечисленные параметры оставались неизменными, изменялись только внешние информационные входы. Величины тормозных внутримодульных связей между адаптивным и условным осцилляторным нейронами составляют 2.27, а веса сетевых межмодульных тормозных связей — 0.001, то есть сильно различаются. Таким образом, функциональная единица ритмогенеза состоит из двух отделов, обладающих существенной асимметрией настройки своих временных параметров, высокими значениями внутримодульных весовых коэффициентов связи и различием амплитуд постоянных входов  $S_{01}$  и  $S_{02}$ , что влияет на динамическое поведение осцилляторного модуля в целом, которое отличается сильной нелинейностью. В итоге подчеркнем, ЕСИ-сети — это сети слабосвязанных нелинейных осцилляторов, что придает большую нейродинамическую свободу последним. Важно также отметить, что референтная система осцилляторов, генерирующая когерентный тета-ритм, образует *систему отсчетов внутрисетевого времени*, которая и служит для измерения относительных фазовых смещений информационных осцилляторов, а также времени подачи вызывающих эти смещения внешних контекстных и информационных входов. Внешний возбуждающий вход нейронов  $S_i(t)$ , представляет собой комбинацию «контекстного» входа для всех единиц сети и специфического «дифференциального» входа для единиц с чувствительностью к различного рода вращениям сети относительно вертикальной оси, перпендикулярной плоскости рис. 1. Данные входы различаются временем подачи на вход, амплитудой и длительностью сигналов, и это различие учитывалось в интерфейсе с программой вычислений.

Комбинированные воздействия сигналов трансляционной и угловой скорости поворотов ЕСИ-сети приводят к модификации кривых фазовых ответов и их сжато-последовательному порядку представления от внешнего контура к внутреннему в референтном тета-цикле. Присутствие в семействах фазовых кривых сетей любой размерности шести ступенек локальной фазовой когерентности [16] говорит об устойчивости этого нейродинамического феномена и согласуется с выводом о трех направлениях пространственной симметрии, кодируемых «решетчатыми»

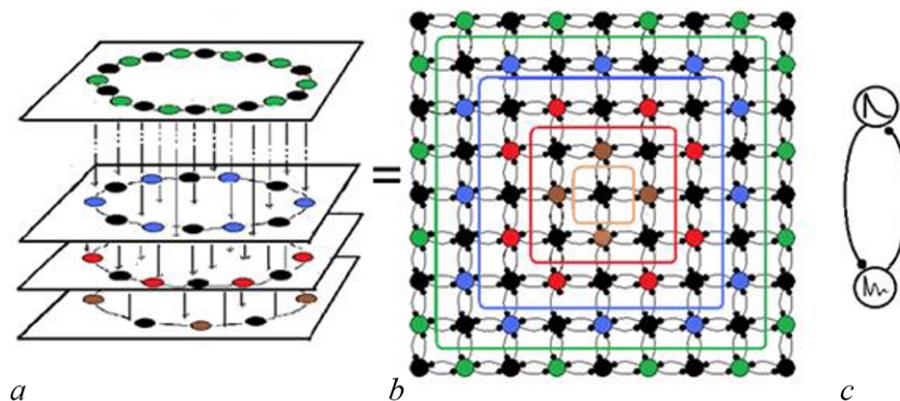


Рис. 1. Пространственная организация многослойных сетей нелинейных осцилляторов с четным циклическим торможением (*a* и *b* — эквивалентные схемы). В любом слое (контуре) сети содержится четное число тормозных связей, отсюда название even cyclic inhibitory networks (ECI-сети). Большими черными кружками обозначены осцилляторные не кодирующие модули, образующие референтную систему фазовых отсчетов; большими цветными кружками — информационные осцилляторные модули, на которые поступают внешние возбуждающие входы; малыми черными кружками — тормозные синапсы между осцилляторными модулями. На рис. *c* показан базовый двухкомпарментный элемент, расположенный в узлах решетки ECI-сети — осцилляторный модуль, состоящий из двух нейронов. Вверху — аналоговый адаптивный нейрон с реакцией на ступенчатый вход, показанной внутри нейрона; внизу — условно осцилляторный нейрон с быстро затухающими осцилляциями. Горизонтальные связи между соседними узлами осцилляторной решетки опосредуются между аналоговыми адаптивными нейронами [по 14]. Дальнейшие пояснения в тексте (цвет online)

Fig. 1. Spatial organization of multilayer networks of nonlinear oscillators with even cyclic inhibition (*a* and *b* — equivalent circuits). In any layer (contour) the network contains an even number of inhibitory connections, hence the name even cyclic inhibitory networks (ECI networks). Large black circles indicate oscillatory non-coding modules that form a reference system of phase counts; large colored circles indicate information oscillator modules that receive external exciting inputs; small black circles indicate inhibitory synapses between oscillator modules. Figure *c* shows a basic two-component element located in the nodes of the ECI-network — an oscillator module consisting of two neurons. At the top: an analog adaptive neuron with a step input response shown inside the neuron; at the bottom: a conditionally oscillatory neuron with rapidly decaying oscillations. Horizontal connections between neighboring nodes of the oscillator array are mediated between analog adaptive neurons [14] (color online)

клетками энторинальной коры, экспериментально подтвержденными как на животных, так и на человеке. Поясним этот вывод подробнее. Замечательный признак энторинальной карты, обнаруженный экспериментально у грызунов (крыс) состоит в ее исключительно регулярной организации, с решетками соседних клеток, имеющими общий шаг (расстояние между полями активности клеток) и общую ориентацию. Однако эти решетки пространственно смещены, но не повернуты друг относительно друга [16]. Теоретически, если мозг человека также включает в себя решетчатые клетки, то наша энторинальная кора в целом должна быть более активной, когда мы движемся вдоль осей симметрии наших решеток, и менее активной при пересечении этих осей в движении. Исходя из того, что у крысы обнаружено три таких главных оси, и что можно двигаться «вперед» либо «назад» вдоль каждой из них, что определяет шесть направлений, можно предсказать, что активность энторинальной коры человека также должна коррелировать с направлением движения 6-кратной дирекциональной симметрией подобно этой. С. Doeller с соавторами [21] использовали виртуальную реальность и изучали интегральную нейронную активность во время «ходьбы» испытуемых по генерированному компьютером ландшафту и смотрели на области монитора, где активность имела подобный описанному выше паттерн. Оказалось, что энторинальная кора человека действительно показывает этот решетчатый паттерн активности и соответствующие ей три оси симметрии у большинства волонтеров.

Экспериментально показано, что нейронами направления головы млекопитающих могут управлять периферические входы, главным образом, вестибулярный, зрительный, и вспомогатель-

ные афференты угловой скорости вращения головы [22–24]. «Клетки пространственного обзора» (spatial view cells), обнаруженные у приматов, характеризуются тем, что их активация происходит только в том случае, когда животное смотрит в определенное место пространства [25, 26]. Высокоразвитое зрение и глазодвигательная система приматов позволяют им исследовать и запоминать извне то, что находится в том или ином месте окружения, даже не посещая этих мест. Такие клетки пространственного обзора могут быть полезны как часть системы пространственной памяти, в которой они должны обеспечить представление части пространства, независимо от того, где точно находилась обезьяна или человек, и что может ассоциироваться с событиями, происходящими в этих местах. Пространственные представления приматов должны быть также полезны в запоминании траекторий при осуществлении навигационных задач и т. д.

Интеграл скорости по времени определяет положение тела в пространстве. Та же операция интегрирования траектории реализуется в гиппокампально-энториальной системе мозга, используя для этой операции сигналы собственного движения тела при навигации. В рассматриваемой модели эта имплицитная операция интегрирования траектории реализуется следующим образом. На вход всех информационных единиц сети в третьем тета-цикле после запуска процесса интегрирования поступает сигнал трансляционной (линейной) скорости с длительностью 5 у.е. времени и шагом амплитуды  $2 \cdot 10^{-5}$  в диапазоне нормированных амплитуд [0.00084...0.0014]. Затем в следующем, четвертом тета-цикле поступают сигналы угловой скорости вращения на клетки, чувствительные к независимым переменным — CCW- и CW- сигналам с длительностью 3 у.е. и шагом градиента амплитуд  $1 \cdot 10^{-5}$ , распределенным между релевантными клетками. Все символьные записи обучающих наборов данных, представленные в настоящей статье, включали в себя различные величины относительных временных интервалов между CCW/CW событиями в широком диапазоне временных шкал. Пример интерфейса с программным комплексом приведен на рис. 2.

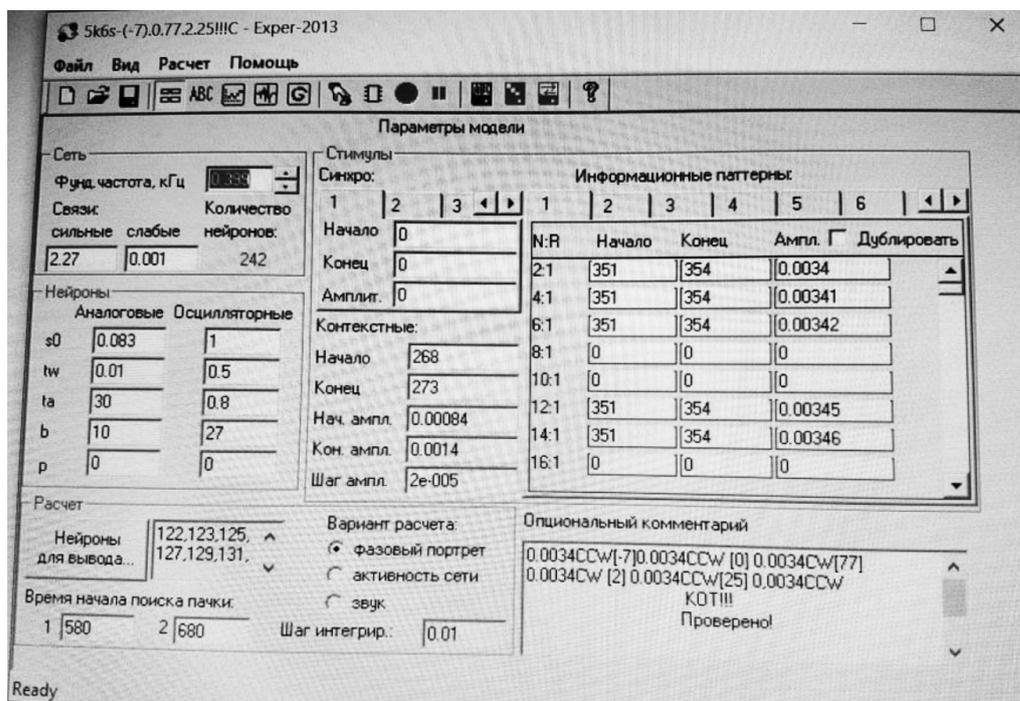


Рис. 2. Снимок с экрана компьютера интерфейс программного комплекса Expert-2013 на примере начала символьной записи первого события концепта CAT: 5k6s-[-7].0.77.2.25

Fig. 2. A screenshot of the computer interface of the Expert-2013 software package on the example of the beginning of the symbolic recording of the first event of the CAT concept: 5k6s -[-7].0.77.2.25

Представленная на рис. 2 последовательность пяти численных значений обучающего набора данных, ограниченных точками в записи, означает величины временных межсобытийных интервалов, а сами сигналы имеют стандартную длительность в 3 у.е. времени. Знак минус в первом межсобытийном интервале означает временное перекрытие второго сигнала ССW с первым сигналом ССW на 7 у.е. во внутренней шкале времени нейронной сети, а значение «0» — что окончание второго и начало третьего события совпадают во времени. Такая форма записи есть выражение временной последовательности сигналов на разработанном автором символьном языке «мыслей» — формы записи, которая показана в нижней части каждого представленного в статье графика или схемы и которая была «понятна» обучаемой нейронной сети. Слово «понятна» является производным от слова «понятие» или «концепт», отсюда реляционное концептуальное обучение — нейродинамический процесс обучения нейронной сети, в результате которого было получено сетевое представление семантического пространства живых организмов. Подчеркнем также, что комбинированные воздействия сигналов трансляционной и угловой скорости на сеть в нейродинамическом смысле становятся взаимозависимыми, поэтому получаемые в итоге направления и дистанции также взаимозависимы, что хорошо видно на представлениях пространственных траекторий образов объектов, полученных в результате декодирования популяционных фазовых кривых информационных единиц сети.

**1.2. Популяционное фазовое кодирование и временное сжатие в процессе обучения сети.** Схема ЕСI-сети, благодаря своей симметричной билатеральной организации, может быть привязана к «схеме тела» виртуального организма-навигатора. В частности, если правую диагональ схемы структурной организации нейронной сети жестко связать с фронтальным направлением тела, то в системе референтности правосторонняя субсеть (см. ниже, рис. 4, показанные двумя цветами клетки) будет соответствовать правой стороне тела, а субсеть клеток, расположенных слева от той же диагонали — левой стороне тела. Чтобы получить полное представление о возможности нейронной сети интегрировать траектории движения в любом направлении, а именно, во фронтальном направлении (прямо вперед), вправо, то есть по часовой стрелке (CW), или влево, против часовой стрелки (CCW), были проведены вычислительные эксперименты, в которых был определен диапазон нормированных значений амплитуд этих дирекциональных сигналов. Интегральные кривые фазовых ответов обеих популяций дирекционально чувствительных единиц сети к ССW- и CW-сигналам, строились машинным алгоритмом последовательными сегментами в каждом следующем за сигналом общей трансляционной скорости тета-цикле.

Паттерны импульсных воздействий определенной амплитуды (в нормированном диапазоне значений) и их длительности вызывают соответствующую фазовую развертку в тета-цикле, следующем за окончанием обучающего набора. Импульсный входной сигнал угловой скорости, распределенный среди релевантных входов ЕСI-сети, интегрируется сетью на каждом шаге величины приращения амплитуды контекстного входа трансляционной скорости и сохраняется в кратковременной памяти в виде прямолинейного сегмента фазовой траектории — вектора, направление и длина которого представлены в двух интегральных семействах противоположно направленных кривых фазовых ответов. Вся история обучения сети информационному набору сигналов в широком диапазоне временных масштабов пошагово сжимается и сохраняется в референтном тета-цикле, следующем за последним тета-циклом, в котором поступала входная информация.

Таким образом, весь процесс обучения в ЕСI-сетях состоит из трех временных окон: раннего, среднего и позднего после включения входного обучающего набора в символьном виде, что хорошо видно на всех графиках кривых фазовых ответов (рис. 3, 4, 5). На раннем этапе процесса происходит кодирование и сильно сжатое фазовое имплицитное представление обоих ССW- и CW-сигналов в референтном тета-цикле. На втором этапе благодаря шаговому прира-

щению амплитуды контекстного входа трансляционной скорости наблюдаются ортогональные представления обоих сигналов угловой скорости и, наконец, их постепенное преобразование к параллельным представлениям на поздней стадии обучения. При этом каждый шаг модификации фазовых представлений CCW- и CW-сигналов под действием контекстного входа сохраняется в буферной памяти и в виде отдельных сегментов кривых фазовых ответов всех информационных единиц представляется в графическом виде.

**1.3. Представление пространственной траектории — «ментальный» след памяти концептуальных представлений сети в эгоцентрическом пространстве.** Специфическая организация ЕСИ-сети кодирует относительный пространственный порядок полей активности информационных единиц, а не зависимость той или иной информационной единицы от определенного местоположения или частного события. Важно, что относительный порядок в нейросетевом пространстве может быть зафиксирован, поскольку сеть обладает локальной фазовой когерентностью и референтной некодирующей системой осцилляторов. Таким образом, в основе феномена «восприятия» пространства в данной нейросетевой модели лежит не пассивное отражение пространственной организации внешних стимулов, а активное построение собственного внутреннего представления пространства. И здесь важную роль играет решетчатая активность информационных единиц сети, которые коллективно «набрасывают» своеобразную координатную сетку (подобно энторинальным решетчатым полям активности) на исследуемое пространственное окружение. Непрерывная аттракторная нейросетевая модель может поддерживать активность своих нейронов для представления любого местоположения вдоль любого физического измерения, например, зрительного пространственного обзора или заданного пространственного окружения. ЕСИ-сеть может сохранять пакет нейронной активности постоянным, где бы она ни стартовала для представления текущего состояния (направления головы, позиции и т. д.) [14].

Для того чтобы получить графическое пространственное представление траектории движения, необходимо получать форвардные фазовые значения на каждом шаге изменения вектора скорости, которые затем переводятся в соответствии с описанным выше алгоритмом в сегменты (прямолинейные отрезки) пространственной траектории в эгоцентрической системе координат. Таким образом, представление траектории происходит в соответствии с векторной стратегией: направление и длина каждого последующего вектора вычисляются, исходя из разности фазовых представлений клеток с CW- и CCW-чувствительностью на каждом шаге приращения величины контекстного входа (горизонтальная ось на графиках кривых фазовых ответов). Общее время процесса фазового кодирования и обучения сети в данных экспериментальных сериях составляло 600–1200 тета-циклов при длительности одного тета-цикла приблизительно 97 у.е. времени в зависимости от временного масштаба обучающего набора сигналов (вертикальная ось на графиках кривых фазовых ответов). Тестовое эгоцентрическое пространство имело четыре фиксированных направления. По горизонтальной оси откладывались амплитуды контекстного входа с тем же шагом, что и при построении фазовых кривых; по вертикальной оси — величина разности взвешенных фазовых значений CW-клеток (со знаком минус в нижней полуплоскости) и CCW-клеток (со знаком плюс в верхней полуплоскости). Эта величина определяла направление вектора движения в текущий момент времени с точностью до постоянного коэффициента [27].

## 2. Результаты и обсуждение

В представленных далее модельных экспериментах показан ряд результатов, определяющих когнитивную нейродинамику сети, и, в частности, формирование концептуального пространства ЕСИ-сети, используя синтезированный язык (код) «мыслей». Прежде всего, однако, необходимо отметить нейродинамическое сходство и различия кривых фазовых ответов при обучении каждого

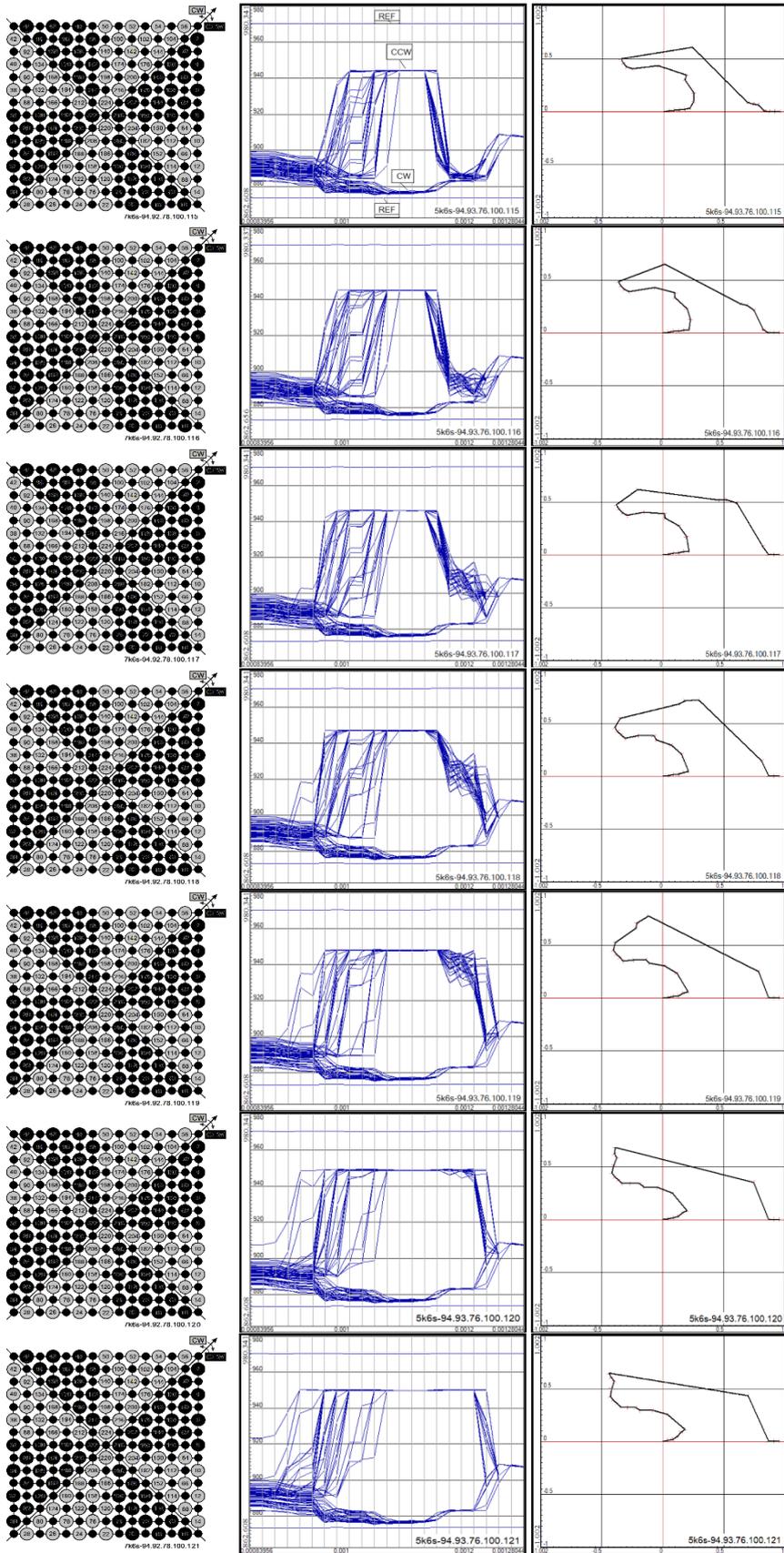


Рис. 3. Семантическое пространство 7 абстрактных изображений животных (сверху вниз: BORZ, DOG, BEA, CAM, BUL, miniBUL и CAT), созданное обучающими входными потоками сигналов, синтезированных автором вручную. Обучающий набор каждого концепта состоит из 6 событий (4 ССW- и 2 СW-сигналов), разделенных временными интервалами различной длительности (здесь и далее показано внизу каждого изображения). В каждом ряду, слева направо: схема ЕСI-сети, обученная тому или иному концепту; в центре — кривые фазовых ответов всех нейронов сети в референтном тета-цикле, показанном вдоль оси ординат графиков и обозначенном REF (означающими начало и конец тета-ритма); многочисленные вертикальные линии — шаг градиента контекстного входа, равный  $2 \cdot 10^{-5}$ ; справа — вызов из памяти сети — декодирование популяционного векторно-фазового кода каждого концепта (подробнее см. в работе [12] и ранних работах автора). На схеме сети: большими черными кружками показаны 4 кластера осцилляторных нейронов, чувствительных к вращениям сети против часовой стрелки (ССW), а серым цветом — 4 кластера нейронов — к вращениям по часовой стрелке (СW). Правая диагональ сети, оканчивающаяся стрелкой, привязана к фронтальному направлению схемы тела организма. Решетка малых черных кружков в схеме сети — некодирующая референтная субсеть осцилляторных нейронов. Все связи в сети — билатеральные рекуррентные тормозные; кластеры информационных нейронов, показанные большими черными кружками, получают возбуждающие информационные сигналы с различными временными интервалами и, соответственно, генерируют гамма пакеты с различными фазами в тета-цикле. Нейроны схемы, обозначенные малыми черными кружками, получают постоянные входы и генерируют когерентный референтный тета-ритм

Fig. 3. Semantic space of 7 abstract images of animals (top-down: BORZ, DOG, BEA, CAM, BUL, miniBUL and CAT), created by training input signal streams synthesized by the author manually. The training set for each concept consists of 6 events (4 CCW and 2 CW signals), separated by time intervals of different lengths (hereinafter shown at the bottom of each image). In each row, from left to right: an ECI network diagram trained on a particular concept; in the center — curves of phase responses of all neurons in the network in the reference theta cycle, shown along the ordinate axis of the graphs and denoted by REF (meaning the beginning and end of the theta rhythm); numerous vertical lines — the step of the gradient of the contextual input equal to  $2 \cdot 10^{-5}$ ; on the right — a call from the network memory — decoding of the population vector-phase code of each concept (for more details, see [12] and early works of the author). On the network diagram: large black circles show 4 clusters of oscillatory neurons that are sensitive to counterclockwise rotation of the network (CCW), and in gray — 4 clusters of neurons — to clockwise rotation (CW). The right diagonal of the net, ending with an arrow, is tied to the frontal direction of the body diagram of the organism. The lattice of small black circles in the network diagram is a noncoding reference subnetwork of oscillatory neurons. All connections in the network are bilateral recurrent inhibitory; clusters of information neurons, shown by large black circles, receive excitatory information signals at different time intervals and, accordingly, generate gamma bursts with different phases in the theta cycle. Small black circles receive constant inputs and generate a stable reference theta rhythm

объекта данного класса обучающими наборами входных данных (см. рис. 3). Интересно, что полученные различия данных кривых определяются лишь последним временным интервалом в обучающем наборе, вызывающем заметную перестройку всей цепочки последовательных сегментов пространственной траектории. Такая координированная векторно-фазовая перестройка вызывает смену наблюдаемых концептов. Другой важный пример динамической фазовой перестройки, результатом которой стал многочисленный набор изоморфных концептов каждого объекта, был получен при считывании кода из малых распределенных групп нейронов с исходной селективной СW- и ССW-настройкой (см. в работе [28]). Вычислительные эксперименты были проведены в соответствии со следующим планом исследования когнитивной нейродинамики представлений концептов:

- а) экспериментальное модельное исследование зависимости психологической близости концептов от семантической дистанции — известного факта в когнитивной психологии (см. рис. 3);
- б) исследования диапазона временных шкал обучающих наборов сигналов, релевантных генерации пространственных представлений образов животных (см. рис. 4);
- в) исследование масштабных преобразований воображаемых объектов (см. рис. 5);
- г) изучение творческих возможностей и демонстрация при вызове из памяти (декодировании) концептов животных, которым сеть не была обучена (рис. 6).

**2.1. Экспериментальное исследование на модели ЕСI-сети зависимости психологической близости концептов от семантической дистанции.** Зависимость психологической близости концептов от семантической дистанции — известный факт в когнитивной психологии.

Однако, как решается эта проблема на нейросетевом уровне, в настоящее время не известно. В этой связи одной из задач настоящих серий модельных экспериментов являлся поиск пространственных представлений объектов (животных), отличающихся, с одной стороны, *наиболее выраженными признаками релевантных животных* (длина и ширина морды, форма ушей или их отсутствие). С другой стороны, в связи с временным кодированием паттернов входных сигналов, принятых нами ранее в исследованиях нейродинамики ЕСИ-сетей, необходимо было найти такую форму символьной записи на языке «мыслей», в которой определяющей переменной в межсобытийных CW/CCW-интервалах было бы *внутреннее время сети*, определяющее пространственное представление того или иного концепта. Напомним, что описанная в Методах референтная субсеть позволяет производить высокоточную оценку временных интервалов как во входной обучающей последовательности сигналов, так и во временном коде (относительных фазовых сдвигах информационных единиц) при обучении сети. Кроме того, была принята исходная селективная настройка четырех кластеров информационных единиц к поступающим входным сигналам против часовой стрелки (CCW) и столько же с селективной настройкой к сигналам по часовой стрелке (CW). Соответствующие настройки кластеров клеток показаны черным и серым цветом, а также обозначены соответствующими направлениями стрелок в верхнем углу схемы ЕСИ-сетей на рис. 3. В данной серии экспериментов использовались символьные записи обучающих наборов сигналов с временными интервалами вида 5k6s-94.93.76.100.115 — ... 5k6s-94.93.76.100.121 с последовательно изменяющимися на единицу времени последним интервалом, как это показано сверху вниз в каждом ряду на рис. 3. Представленные здесь символьные записи кодируют временную программу подачи входных сигналов в сеть, что, в конечном итоге, после декодирования имплицитных фазовых представлений сети позволяет наблюдателю увидеть относительное изменение длин и направлений векторов, последовательно строящих пространственную траекторию того или иного объекта, начиная от лап и заканчивая хвостом.

Видно, что в результате концептуального обучения сети и декодирования популяционного фазового кода была получена серия из 7 пространственных абстрактных изображений, отличающихся наиболее выраженными признаками животных с условными названиями BORZ, DOG, BEA, CAM, BUL, miniBUL и CAT, а именно формой морды и ушей или их отсутствия. Таким образом, используя минимальный набор характерных признаков, в результате данной серии вычислительных экспериментов получено семантическое пространство, содержащее семь вышеперечисленных животных. Каждое пространственное представление определенного концепта из данной линейки животных характеризуется суммарной величиной межсобытийных временных интервалов во входной обучающей последовательности. При этом пространственные границы частных представлений концептов обусловлены различием в последнем временном интервале, составляющем в данном случае 1 у.е. Отметим, однако, важную деталь, что относительные представления концептов происходят не дискретно, а непрерывно (аналоговым образом) изменяясь во временном измерении, и различие в 1 у.е. не является пороговым значением, а отражает лишь наиболее явное различие между представлениями концептов в семантическом пространстве. Иными словами, непрерывная последовательность пространственных представлений объектов проходит от наиболее опознаваемых концептов к неопределенным и, вновь возвращаясь, но уже к новым образам из представленной на рис. 3 линейки объектов. Кроме того, зависимость психологической близости концептов от семантической дистанции, которая наблюдается в данной серии экспериментов, описываемых символьными записями, отличающимися друг от друга лишь 1 у.е. времени в последнем временном интервале, может быть легко расширена и на другие многочисленные обучающие наборы, несколько примеров которых будут рассмотрены в следующем разделе.

В заключение отметим, в частности, что концепт DOG явно перцептивно отличается от концепта miniBUL больше, чем концепт miniBUL от концепта CAT, и это вполне соответствует их

расстояниям в семантическом пространстве. В первом случае такое расстояние составляет 4 у.е. времени, а во втором — 1 у.е. времени, откуда явно следует, что «движущей силой» перцептуальных различий объектов в семантическом пространстве является относительное время и связанные с ним нейродинамические перестройки в сети. Так, концепты BORZ и CAT, находящиеся на противоположных концах семантической линейки категории животных, представленных сетью, отличаются большой величиной относительного времени. В этой связи отметим мнение S. Bernardi et al. [18], что, чем дальше человек удаляется от концепта в пространстве семантической памяти, тем более новым или креативным будет этот новый концепт.

**2.2. Исследование диапазона временных шкал обучающих наборов, релевантных генерации пространственных представлений образов животных.** Представленный выше обучающий набор данных, различающийся только последним временным интервалом, является лишь одним из примеров генерации концептуальных пространственных представлений животных, поэтому далее будет исследован диапазон и дана оценка временных шкал, релевантных генерации пространственных представлений концептов животных. Кроме того, будет рассмотрена применимость полученной выше оценки восприятия перцептивной близости объектов в зависимости от семантической дистанции в исследованном диапазоне временных шкал. В верхних двух рядах рисунка временной масштаб обучающего набора данных всех трех концептов DOG, BUL и CAT, представленных в символьной записи, составляет, соответственно 92, 96 и 97 у.е., то есть все три временных масштаба обучающих сигналов полностью укладываются в тета-цикл, длительность которого в модели составляет чуть больше 97 у.е. времени. В следующих, 3 и 4 рядах того же рисунка временной масштаб обучающих наборов сигналов концептов DOG, BUL и CAT составляет уже 189, 193 и 194 у.е., тем не менее, пространственные представления данных концептов перцептуально изоморфны первоначальным представлениям в сжатой до отдельного тета-цикла обучающей последовательности межсобытийных интервалов. Экспериментальные исследования модели показали широкий набор временных шкал обучающих сигналов вплоть до десятикратного их увеличения. Наконец, в последних двух рядах рис. 4 показаны хорошо заметные искажения кривых фазовых ответов и соответствующие им пространственные представления концептов DOG, BUL и CAT во временном масштабе, соответственно 1060, 1061 и 1063 у.е., свидетельствующие о верхней границе диапазона.

Интересно отметить несколько важных результатов данной серии экспериментов. Во-первых, это строгое соответствие каждого концепта приписываемой ему суммарной величине временных интервалов данной символьной последовательности сигналов. Во-вторых, полученная десятикратная оценка величины диапазона временных масштабов входных обучающих сигналов, релевантная получению изоморфных пространственных представлений выбранной линейки концептов животных. Подобно тому, как скорость произношения слов может значительно различаться, но при этом существует ограниченный физиологический диапазон скоростей, доступных для перцептивного восприятия речи. В-третьих, получено еще одно доказательство правильности методического подхода к моделированию когнитивной нейродинамики в осцилляторных сетях с четным циклическим торможением, выражающееся в данном случае в простой количественной оценке дистанции между концептами, которая отражает психологическую близость объектов (перцептивное сходство) в семантическом пространстве: большему сходству пространственных представлений концептов животных соответствуют меньшие относительные расстояния, меньшему сходству — большие расстояния.

В заключение подчеркнем, что перечисленное выше было достигнуто несмотря на то, что временная шкала входных обучающих наборов сигналов, релевантных генерации пространственных представлений образов животных была очень широка, перекрывая почти десятикратный временной диапазон от верхней до нижней границы допустимых значений суммарных межсобытийных временных интервалов в символьных записях.

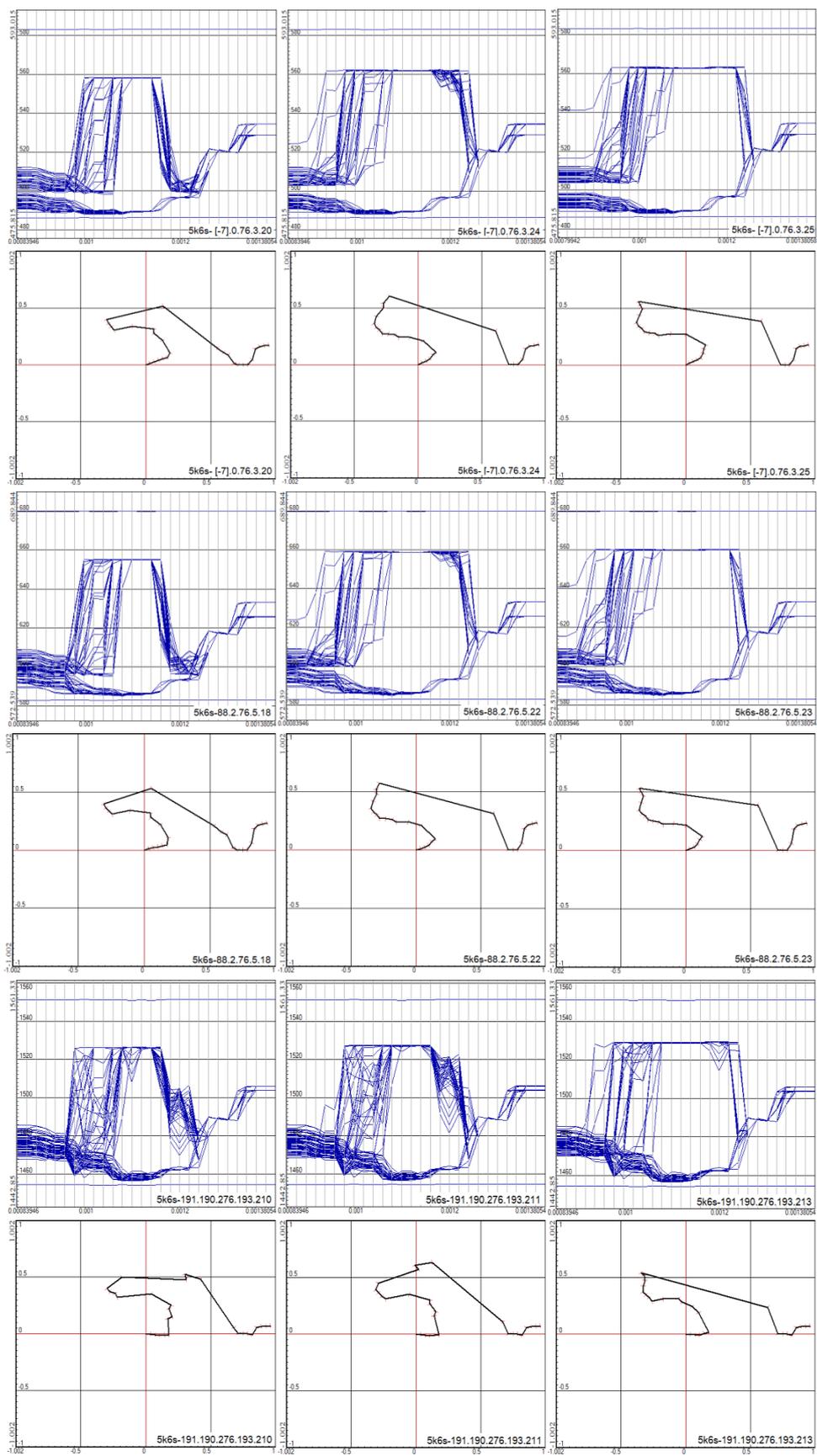


Рис. 4. Концептуальные пространственные представления на примере трёх животных DOG, BUL и CAT в широком диапазоне временных шкал обучающих наборов сигналов, поступающих на информационные входы сети. В первых двух рядах видно, что временные межсобытийные интервалы столь коротки, что суммарно все последовательности сигналов составляют 92, 96 и 97 у.е. времени для трех концептов, соответственно. Знак минус в данном выражении означает перекрытие 1-го и 2-го межсобытийных временных интервалов, а ноль — что между 2-м и 3-м событийными сигналами нет временного разрыва. Во втором случае сумма временных межсобытийных событийных интервалов составляла 189, 193 и 194 у.е., а в последнем — 1060, 1061 и 1063 у.е. Отметьте, что в последнем случае становятся заметны десинхронизированные фазовые кривые информационных единиц, что естественно сказывается на появляющихся искажениях пространственных изображений концептов (нижний ряд)

Fig. 4. Conceptual spatial representations using the example of three animals DOG, BUL and CAT in a wide range of time scales of training sets of signals arriving at the network inputs. In the first two rows of the figure, it can be seen that the time intervals between events are so short that in total all signal sequences are 92, 96, and 97 conventional units time for the three concepts, respectively. The minus sign in this expression means the overlap of the 1-st and 2-nd inter-event time intervals, and zero means that there is no time gap between the 2nd and 3rd event signals. In the second case, the sum of time inter-event event intervals was 189, 193, and 194 conventional time units, and in the latter — 1060, 1061 and 1063 conventional time units. Note that in the latter case, desynchronized curves of phase responses of information units begin to appear, which naturally affects the emerging distortions of spatial images of concepts (bottom row)

В заключение отметим, что определение расстояния обеспечивает внутреннюю меру подобия, принимая расстояние в концептуальном пространстве как индикатор семантического сходства. Понятие сходства — важная конструкция для моделирования категоризации и формирования концептов.

**2.3. Регуляция временных масштабов ментальных представлений концептов.** Понимание того, как связаны между собой различные объекты нашего физического окружения, а также обобщение этих знаний в разных контекстах, составляет одну из фундаментальных проблем человеческого познания. Такое обобщение является сложной задачей, когда реляционные паттерны входных сигналов совместно используются в разных контекстах и представлены в разных физических масштабах. В настоящем разделе показаны результаты исследования нейродинамики разномасштабных пространственных представлений модели, выполняющей задачу сравнения объектов, с целью обобщения понятий «больше» или «меньше» в контексте перцептивного восприятия «дальше» или «ближе». Особо подчеркнем, что здесь речь идет не о сравнительных амплитудах и временных параметрах входных информационных сигналов об объектах (символьные записи об объектах оставались неизменными).

Здесь показано, что общее управление механизмом временной гибкости, то есть управление переменным таймингом нейронов (в нашей модели ЕСИ-сетей управление фазами высокочастотных пачек в референтном тета-цикле), опосредуется общим нейросетевым контекстным входом. Амплитуда этого входа определяет общую продолжительность временного интервала контекстного входа, что приводит к модуляции скорости (см. рис. 5). Таким образом, современный и надежный вывод по многочисленным экспериментам заключается в том, что продуцирование временных интервалов опосредуется внутренним временным масштабированием нейронных сигналов, то есть контекстных сигналов вне зависимости от внешних сенсорных сигналов. В предыдущем разделе уже было показано, что сеть «понимает» поступающие входные сигналы в широком диапазоне временных шкал, что отражено в многочисленных изоморфных представлениях, полученных в вычислительных экспериментах (здесь показано на примере трех концептов). Фундаментальный признак ментальных способностей мозга, таких как воображение, ожидание, размышления состоит в том, что они не привязаны непосредственно к сенсорным или моторным событиям и могут разворачиваться в разных временных масштабах. Примерами такого гибкого поведения является управление координацией собственных движений у спортсменов или ораторов, которые могут контролировать темп своей речи. Люди могут точно внутренне управлять временем своих движений и быстро вносить изменения в соответствии с текущими потребностями или

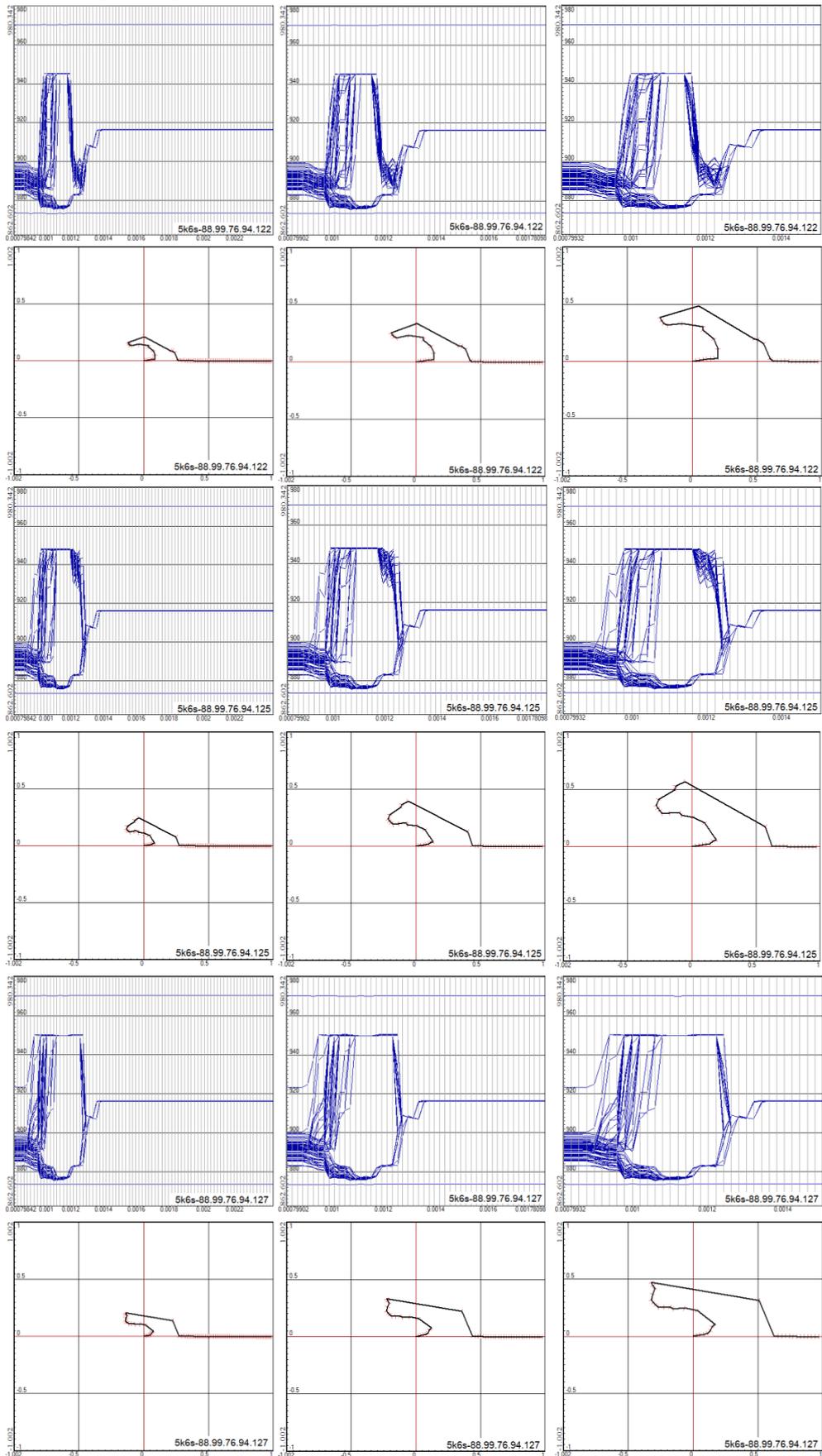


Рис. 5. Внутренние масштабные преобразования пространственных представлений объектов на примере трех концептов, при сохранении во всех трёх случаях амплитуд и межсобытийных временных интервалов внешних входов. Когда в сети устанавливаются более длинные временные интервалы, популяционная активность развивается в соответствии с тем же концептом по инвариантной нейронной траектории, но с меньшей скоростью. Диапазон величин контекстного входа для всех трёх концептов составлял слева направо: [0.0008...0.0024], [0.0008...0.0018], [0.0008...0.0015] с шагом амплитуд  $2 \cdot 10^{-5}$  (см. вертикальные линии на графиках кривых фазовых ответов нейронов)

Fig. 5. Internal large-scale transformations of imaginary objects using the example of three concepts, while maintaining in all three cases the amplitudes and inter-event time intervals of external inputs. When longer time intervals are established in the network, population activity develops in accordance with the same concept along an invariant neural trajectory, but at a lower rate. The range of contextual input values for all three concepts was from left to right: [0.0008...0.0024], [0.0008...0.0018], [0.0008...0.0015] with an amplitude step of  $2 \cdot 10^{-5}$  (see the vertical lines on the graphs of the phase responses of neurons)

инструкциями. Чтобы поддерживать такую временную гибкость, мозг должен контролировать динамику текущих паттернов нейронной активности, то есть тайминг (время) будущих движений, регулируя внутреннюю команду скорости. Таким образом, когнитивный контроль внутренних состояний может обеспечивать простой и общий механизм придания временной гибкости не только сенсомоторным, но и когнитивным функциям мозга [29, 30].

В рекуррентных нейросетевых моделях временное масштабирование возникает из-за нелинейностей в сети, а степень масштабирования контролируется силой внешнего входа. Ранее этот феномен экспериментально на животных также был установлен в соответствии с общим принципом временного масштабирования, который был очевиден как на одноклеточном, так и на популяционном уровне. В частности, на более длинных временных интервалах популяционная активность животных развивалась по инвариантной нейронной траектории, но с меньшей скоростью. Чтобы исследовать механизмы, лежащие в основе такого гибкого управления скоростью, авторы проанализировали нейродинамику рекуррентных сетей, используя градиентный вход для продуцирования различных временных интервалов. Анализ этих моделей показал, что степень масштабирования контролировалась входом, действующим на нелинейную функцию активации отдельных нейронов в сети [29].

Аналогичным образом в наших модельных экспериментах масштабные преобразования концептов DOG, BUL и CAT в контексте «дальше–ближе» были получены в результате обучения при сохранении во всех трёх случаях амплитуд и межсобытийных временных интервалов внешних входов (см. рис. 5), но популяционная активность развивалась в соответствии с тем или иным концептом по инвариантной нейронной траектории, однако с меньшей скоростью. Таким образом, масштабные преобразования концептуальных представлений реализуются *за счет изменений ширины фазового окна в референтном тета-цикле сети*, определяемом диапазоном величин контекстного входа, что физически приводит к пространственному представлению объекта «дальше–ближе».

**2.4. Демонстрация творческих возможностей реляционных нейронных сетей с четным циклическим торможением.** Путь к пониманию нейрокогнитивных составляющих творческого мышления лежит в создании модели, отвечающей определенным критериям и количественным измерениям ряда важных характеристик, относящихся к творческой деятельности мозга, в том числе реляционных отношений концептов, семантического пространства образов, семантической дистанции, масштабных преобразований, генерации распределенных в пространстве и времени нейросетевых представлений, вышеуказанные аспекты которых были описаны и продемонстрированы на сопровождающих рисунках здесь и в ранее представленном докладе на конференции НДКИ-2021 в Н. Новгороде. Подчеркнем, что фундаментальной проблемой остаются нейросетевые механизмы творческого познания мозга, на которых мы остановимся ниже. Важно, что решение данной проблемы будет опираться на большой когнитивный и нейроимиджинговый задел данных, свидетельствующий о том, что эпизодическая и семантическая память — память

автобиографических событий и концептуальных знаний, соответственно, — поддерживают различные аспекты творческого мышления и познания. Предполагается, что семантическая память поддерживает творческое мышление, обладая базой знаний фактов и концептов, которые можно комбинировать для решения творческих задач и генерации новых идей, независимо от времени и контекста [3], тогда как эпизодическая память хранит автобиографические воспоминания, которые зависят от времени и контекста [4]. Эпизодическая система считается конструктивной: вместо того, чтобы просто повторно активировать треки памяти в том виде, в котором они были закодированы, вызов эпизодической памяти включает в себя рекомбинацию эпизодических деталей для восстановления прошлого события. Считается, что эти гибкие рекомбинаторные процессы поддерживают эпизодическое мышление о будущем — воображение возможного будущего опыта, который еще не произошел — путем сходного вызова и комбинирования элементов прошлого опыта [34].

Как реализованы эти важные теоретические положения в нашем модельном исследовании, представлено в следующей серии экспериментов, где креативные возможности ЕСИ-сети, обученной единственному образу животного, демонстрирует «воображение» (в отсутствие внешних информационных входов) множества абстрактных представлений концептов (см. рис. 6). В отличие от ранее представленных серий экспериментов, где строго соблюдалась дирекциональная избирательность кластеров клеток, отмеченных черным и серым цветом на схеме сети как при обучении, так и декодировании при вызове из памяти, в данной серии экспериментов была реализована смешанная селективность нейронов, проще говоря, места в «одноцветных» кластерах клеток сети при вызове из памяти могли замещаться клетками с противоположной дирекциональностью. Таким образом, феномен творческого познания обусловлен тем, что «ментальное воображение» сети реализуется вследствие рекомбинации элементов события или концептуальных признаков, таких как нос (клюв), форма морды животного, переходящая в лицо и т. д. Отсюда можно заключить, что расширение семантического пространства нейросетевых представлений происходит не благодаря расширению обучающего набора входных данных (при обучении использовался единственный входной набор сигналов концепта BUL), а за счет внутренней рекомбинации фрагментов изображений, использования смешанной селективности нейронов, рекрутирования при вызове из памяти распределенных групп информационных единиц сети, что, в свою очередь, повышает уровень категоризации и, следовательно, обобщения ментальных представлений на более широкий класс объектов, несмотря на однократное обучение сети, как в данном примере.

Следующий важный атрибут, определяющий нейродинамику креативных возможностей ЕСИ-сетей — их структурная организация, включающая референтную систему некодирующих нейронов. Функциональное назначение этой субсети нейронов многозначно: а) эти нейроны обеспечивают устойчивость режимов генерации сетей с положительными обратными связями, сформированными вследствие известного феномена «торможение торможения»; б) эти нейроны генерируют внутреннее время сети (часовой механизм) когерентной тета-ритмической активностью, представленной на оси ординат графиков кривых фазовых ответов началом и концом референтного тета-цикла; в) диапазон фаз значений кривых фазовых ответов всех информационных нейронов ограничен референтным тета-циклом независимо от размерности сети (см. на примере 5-контурных и 7-контурных ЕСИ-сетей); г) эта субсеть участвует в координации доступа к хранилищу семантических знаний, обеспечивая последним связанность нейронов в распределенных группах.

Важно подчеркнуть координирующую роль данной субсети нейронов в вызове памяти, отметив при этом, что подобная система в мозге была впервые обнаружена и описана Marcus Raichle в 2015 году [31], получив названия Default Mode Network (DMN) — нейронная сеть оперативного покоя, сеть режима мозга по умолчанию (в переводе с англ.). В целом, в многочисленных исследованиях было показано, что DMN состоит из дискретных, билатеральных

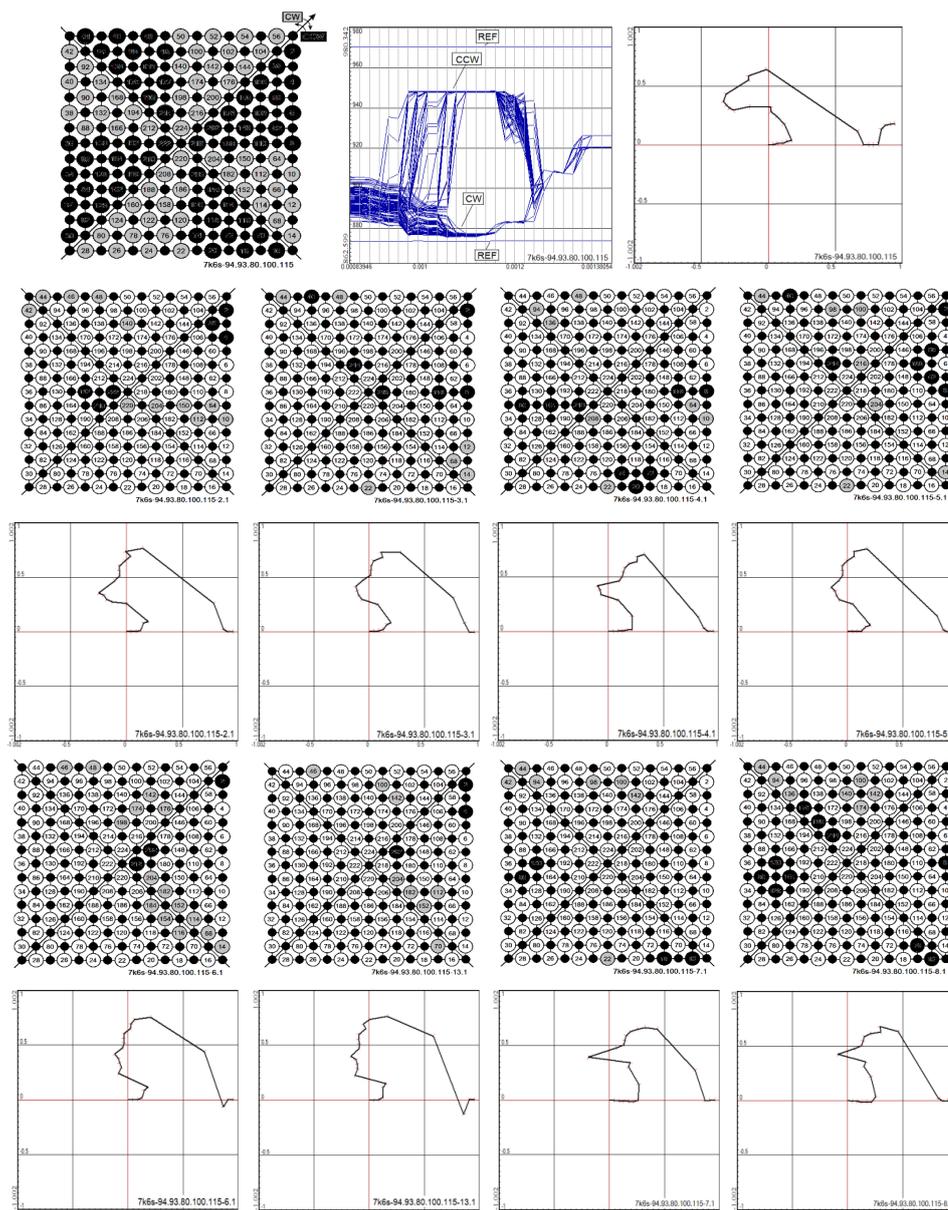


Рис. 6. Воображение многочисленных образов рекрутированием распределенных групп нейронов. Обученная набором данных концепта BUL, 7k ECI-сеть «ментально» представляет различными группами меченных нейронов на схеме сети в 1 и 3 ряду рисунка многочисленные концепты животных, птиц и даже человека (2 и 4 ряд рисунка). Генерация воображаемых образов сетью, обученной единственному концепту BUL, свидетельствует о её способности к обобщениям на целый класс живых организмов, тем самым значительно расширяя собственное семантическое концептуальное пространство. Обратите внимание, что такое расширение семантического пространства произошло из-за нарушения исходной избирательности нейронов к право- и левосторонним поворотам при обучении (см. верхний ряд рисунка) и первые три серии экспериментов, то есть благодаря смешанной селективности при считывании из памяти выделенных групп нейронов

Fig. 6. Imagination of multiple images by recruiting distributed groups of neurons. Trained by the BUL concept dataset (Fig. 1), the 7k ECI network “mentally” represents various groups of labeled neurons on the network diagram in rows 1 and 3 of the figure, numerous concepts of animals, birds, and even humans (rows 2 and 4 of the figure). The generation of imaginary images by a network trained in a single BUL concept testifies to its ability to generalize to a whole class of living organisms, thereby significantly expanding its own semantic conceptual space. Please note that such an expansion of the semantic space occurred due to a violation of the initial selectivity of neurons for right- and left-sided turns during learning (see the top row of the figure) and the first three series of experiments, i.e. due to the mixed selectivity when reading the selected groups of neurons from the memory

и симметричных областей в париетальной, префронтальной, энторинальной коре и гиппокампе [4, 19, 31, 32]. В процессах вызова эпизодической и семантической памяти мозга участвуют обширные и в значительной степени перекрывающиеся сетевые регионы режима по умолчанию и различаются, главным образом, разными вкладками гиппокампальных и парагиппокампальных регионов в вызове эпизодической памяти [19].

Один из характерных признаков нейродинамики, хорошо заметный на всех графиках кривых фазовых ответов, свидетельствует о том, что паттерны активности информационных единиц группировались в два синхронизированных противоположно направленных (CCW и CW) кластера. Предполагается, что кластеризация — это геометрическая структура, позволяющая использовать важную и ясную форму обобщения, которую можно использовать для определения, *когда нейронный ансамбль представляет переменную в абстрактном формате*. Этот формат поддерживает способность обобщать на новые ситуации. Способность обобщать в новых условиях аналогична возможности декодировать переменную в экспериментальных условиях, которые не использовались для обучения [18]. Поясним это заключение нашими примерами. Наш линейный декодер отслеживал фазовые изменения двух противоположных кластеров клеток на каждом шаге изменения контекста (вертикальные линии на всех фазовых графиках), продуцируя результирующее пространственное представление концепта, которому исходно обучалась сеть (см. рис. 6, верхний ряд). Затем в новых условиях смешанной селективности декодер считывал фазовые значения рекрутированных клеток с измененной фазовой ориентацией в тета-цикле (то есть смещениями к началу вместо конца тета-цикла или наоборот), что в результате представляло собой новую ситуацию для декодера. В этих условиях группированное геометрическое расположение точек пространственных представлений концептов было обеспечено успешным *обобщением декодера на новые условия «ментальных» экспериментов*, поскольку исходный обучающий набор данных был направлен на получение единственного концепта BUL.

**2.5. Абстрактные пространственные представления воображаемых концептов — внутренняя ментальная модель обобщения объектов.** Современные представления о том, как формируются новые знания, воображение и творческое мышление основаны на двух фундаментальных процессах структурирования знаний в виде когнитивных карт и когнитивных графов. Когнитивные карты и когнитивные графы могут сосуществовать у одних и тех же людей, причем их доступность и использование зависят от характеристик окружающей среды и целевых потребностей организма. Когнитивные карты и когнитивные графы создаются частично различными, но частично перекрывающимися нейронными системами в гиппокампальной формации, фронтальных (лобных) долях и избирательных к сценам кортикальных областях. Обе системы представлений, вероятно, могут поддерживать абстрактное мышление [7, 17]; когнитивные карты релевантны концептуальным представлениям, изменяющимся вдоль непрерывных измерений, тогда как когнитивные графы — представлениям переходов между состояниями и дискретными ассоциациями между элементами [33]. Что даёт нам знание абстрактных «когнитивных» переменных или концептов, примеры которых были приведены в результате рассмотренных выше модельных исследований? Знание абстрактных переменных позволяет обобщить и сразу сделать выводы о вновь встреченных жизненных обстоятельствах. Гиппокамп и энторинальная кора мозга образуют реляционные когнитивные карты, которые способствуют не только эпизодической памяти, но также поддерживают формирование концептов, представляя релевантные признаки для различения связанных понятий. Кроме того, функция памяти не только в запоминании важных деталей индивидуального опыта, но и в способности связывать новую информацию между событиями, чтобы создавать новое знание. Навигация внутри гиппокампальных когнитивных карт, которые руководствуются решетчатым гексагональным кодированием в энторинальной коре и реализованное моделированием в ЕСИ-сетях, способствует воображению концептов, представленных в настоящем исследовании и дальнейшему развитию исследований в данном направлении.

## Заключение

Результаты экспериментов свидетельствуют о широком разнообразии полученных абстрактных концептуальных представлений в семантическом пространстве реляционных нейронных сетей с четным циклическим торможением. Показано, что феномен творческого познания обусловлен тем, что «ментальное» воображение этих сетей реализуется вследствие: а) понимания языка (кода) «мыслей», на котором были представлены входные обучающие последовательности; б) возможности рекомбинации элементов концептуальных признаков объектов посредством рекрутирования малых распределенных групп нейронов сети; в) расширения семантического пространства за счет смешанной селективности при вызове из памяти распределенных групп нейронов; г) наличия в структуре ЕСИ-сетей субсети некодирующих, референтных нейронов — аналога сети режима по умолчанию (Default Mode Network, DMN) в мозге — выполняющих объединяющую роль при вызове из памяти распределенных информационных единиц сети. Подчеркнем также, что рассмотренная модель ЕСИ-сетей обучается представлениям, которые адаптируются и компактно фиксируют важные детали кодированных объектов без какой-либо семантики, встроенной изначально в архитектуру сетей. Задачей будущих исследований является дальнейшее развитие творческого потенциала ЕСИ-сетей, которое включает: 1. Расширение языка «мыслей» на различные классы физических объектов и зрительных сцен; 2. Комбинаторное обучение, воображение и понимание зрительных сцен, как следствие понимания языка «мыслей», на котором должны быть представлены входные обучающие последовательности сигналов.

## Список литературы

1. *Abraham A.* The promises and perils of the neuroscience of creativity // *Front. Hum. Neurosci.* 2013. Vol. 7. P. 246. DOI: 10.3389/fnhum.2013.00246.
2. *Benedek M., Fink A.* Toward a neurocognitive framework of creative cognition: the role of memory, attention, and cognitive control // *Curr. Opin. Behav. Sci.* 2019. Vol. 27. P. 116–122. DOI: 10.1016/j.cobeha.2018.11.002.
3. *Kenett Y.N., Faust M.* A semantic network cartography of the creative mind // *Trends Cogn. Sci.* 2019. Vol. 23, no. 4. P. 271–274. DOI: 10.1016/j.tics.2019.01.007.
4. *Beatty R.E., Chen Q., Christensen A.P., Kenett Y.N., Silvia P.J., Benedek M., Schacter D.L.* Default network contributions to episodic and semantic processing during divergent creative thinking: A representational similarity analysis // *NeuroImage.* 2020. Vol. 209. P. 116499. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2019.116499.
5. *Viganó S., Piazza M.* Distance and direction codes underlie navigation of a novel semantic space in the human brain // *J. Neurosci.* 2020. Vol. 40, no. 13. P. 2727–2736. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.1849-19.2020.
6. *Theves S., Fernández G., Doeller C.F.* The hippocampus maps concept space, not feature space // *J. Neurosci.* 2020. Vol. 40, no. 38. P. 7318–7325. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.0494-20.2020.
7. *Behrens T.E.J., Muller T.H., Whittington J.C.R., Mark S., Baram A.B., Stachenfeld K.L., Kurth-Nelson Z.* What is a cognitive map? Organizing knowledge for flexible behavior // *Neuron.* 2018. Vol. 100, no. 2. P. 490–509. DOI: 10.1016/j.neuron.2018.10.002.
8. *Bottini R., Doeller C.F.* Knowledge across reference frames: Cognitive maps and image spaces // *Trends Cogn. Sci.* 2020. Vol. 24, no. 8. P. 606–619. DOI: 10.1016/j.tics.2020.05.008.
9. *Kay K., Chung J.E., Sosa M., Schor J.S., Karlsson M.P., Larkin M.C., Liu D.F., Frank L.M.* Constant sub-second cycling between representations of possible futures in the hippocampus // *Cell.* 2020. Vol. 180, no. 3. P. 552–567. DOI: 10.1016/j.cell.2020.01.014.
10. *Raffaelli Q., Wilcox R., Andrews-Hanna J.* The neuroscience of imaginative thought: An integrative framework // In: *Abraham A. (Ed.) The Cambridge Handbook of the Imagination.* Cambridge: Cambridge University Press, 2020. P. 332–353. DOI: 10.1017/9781108580298.021.
11. *Amalric M., Wang L., Pica P., Figueira S., Sigman M., Dehaene S.* The language of geometry:

- Fast comprehension of geometrical primitives and rules in human adults and preschoolers // *PLoS Comput. Biol.* 2017. Vol. 13, no. 1. P. e1005273. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1005273.
12. *Цукерман В. Д., Чешков Г. Н.* Основы нелинейной динамики сенсорного восприятия. I. Фазовое кодирование в осцилляторных сетях // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение.* 2002. № 7–8. С. 65–72.
  13. *Цукерман В. Д.* Математическая модель фазового кодирования событий в мозге // *Математическая биология и биоинформатика.* 2006. Т. 1, № 1. С. 97–107. DOI: 10.17537/2006.1.97.
  14. *Цукерман В. Д., Еременко З. С., Каримова О. В., Кулаков С. В., Сазыкин А. А.* Когнитивная нейродинамика двух стратегий навигационного поведения организмов // *Известия вузов. ПНД.* 2011. Т. 19, № 6. С. 96–108. DOI: 10.18500/0869-6632-2011-19-6-96-108.
  15. *O'Keefe J., Dostrovsky J.* The hippocampus as a spatial map. Preliminary evidence from unit activity in the freely-moving rat // *Brain Res.* 1971. Vol. 34, no. 1. P. 171–175. DOI: 10.1016/0006-8993(71)90358-1.
  16. *Hafting T., Fyhn M., Molden S., Moser M.-B., Moser E. I.* Microstructure of a spatial map in the entorhinal cortex // *Nature.* 2005. Vol. 436, no. 7052. P. 801–806. DOI: 10.1038/nature03721.
  17. *Bellmund J. L. S., Gärdenfors P., Moser E. I., Doeller C. F.* Navigating cognition: Spatial codes for human thinking // *Science.* 2018. Vol. 362, no. 6415. P. eaat6766. DOI: 10.1126/science.aat6766.
  18. *Bernardi S., Benna M. K., Rigotti M., Munuera J., Fusi S., Salzman C. D.* The geometry of abstraction in hippocampus and prefrontal cortex // *Cell.* 2020. Vol. 183, no. 4. P. 954–967. DOI: 10.1016/j.cell.2020.09.031.
  19. *Kim H.* Default network activation during episodic and semantic memory retrieval: A selective meta-analytic comparison // *Neuropsychologia.* 2016. Vol. 80. P. 35–46. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2015.11.006.
  20. *Marron T. R., Lerner Y., Berant E., Kinreich S., Shapira-Lichter I., Hendler T., Faust M.* Chain free association, creativity, and the default mode network // *Neuropsychologia.* 2018. Vol. 118. P. 40–58. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2018.03.018.
  21. *Doeller C. F., Barry C., Burgess N.* Evidence for grid cells in a human memory network // *Nature.* 2010. Vol. 463, no. 7281. P. 657–661. DOI: 10.1038/nature08704.
  22. *Sharp P. E., Blair H. T., Cho J.* The anatomical and computational basis of the rat head-direction cell signal // *Trends Neurosci.* 2001. Vol. 24, no. 5. P. 289–294. DOI: 10.1016/S0166-2236(00)01797-5.
  23. *Sargolini F., Fyhn M., Hafting T., McNaughton B. L., Witter M. P., Moser M.-B., Moser E. I.* Conjunctive representation of position, direction, and velocity in entorhinal cortex // *Science.* 2006. Vol. 312, no. 5774. P. 758–762. DOI: 10.1126/science.1125572.
  24. *Taube J. S.* The head direction signal: Origins and sensory-motor integration // *Annu. Rev. Neurosci.* 2007. Vol. 30. P. 181–207. DOI: 10.1146/annurev.neuro.29.051605.112854.
  25. *Rolls E. T., Stringer S. M.* Spatial view cells in the hippocampus, and their idiothetic update based on place and head direction // *Neural Networks.* 2005. Vol. 18, no. 9. P. 1229–1241. DOI: 10.1016/j.neunet.2005.08.006.
  26. *Rolls E. T., Xiang J.-Z.* Spatial view cells in the primate hippocampus and memory recall // *Rev. Neurosci.* 2006. Vol. 17, no. 1–2. P. 175–200. DOI: 10.1515/REVNEURO.2006.17.1-2.175.
  27. *Цукерман В. Д., Харьбина З. С., Кулаков С. В.* Математическая модель пространственного кодирования в гиппокампальной формации. II. Нейродинамические корреляты ментальных траекторий и проблема принятия решений // *Математическая биология и биоинформатика.* 2014. Т. 9, № 1. С. 216–256. DOI: 10.17537/2014.9.216.
  28. *Цукерман В. Д.* К творческому познанию: креативные начала реляционных нейронных сетей с четным циклическим торможением // *Труды VII Всероссийской конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях-2021».* Нижний Новгород, 20-24 сентября 2021. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2021. С. 186–189.

29. Wang J., Narain D., Hosseini E. A., Jazayeri M. Flexible timing by temporal scaling of cortical responses // *Nat. Neurosci.* 2018. Vol. 21, no. 1. P. 102–110. DOI: 10.1038/s41593-017-0028-6.
30. Egger S. W., Remington E. D., Chang C.-J., Jazayeri M. Internal models of sensorimotor integration regulate cortical dynamics // *Nat. Neurosci.* 2019. Vol. 22, no. 11. P. 1871–1882. DOI: 10.1038/s41593-019-0500-6.
31. Raichle M. E. The brain's default mode network // *Annu. Rev. Neurosci.* 2015. Vol. 38. P. 433–447. DOI: 10.1146/annurev-neuro-071013-014030.
32. Higgins C., Liu Y., Vidaurre D., Kurth-Nelson Z., Dolan R., Behrens T., Woolrich M. Replay bursts in humans coincide with activation of the default mode and parietal alpha networks // *Neuron.* 2021. Vol. 109, no. 5. P. 882–893. DOI: 10.1016/j.neuron.2020.12.007.
33. Peer M., Brunec I. K., Newcombe N. S., Epstein R. A. Structuring knowledge with cognitive maps and cognitive graphs // *Trends Cogn. Sci.* 2021. Vol. 25, no. 1. P. 37–54. DOI: 10.1016/j.tics.2020.10.004.
34. Schacter D. L., Addis D. R., Buckner R. L. Remembering the past to imagine the future: the prospective brain // *Nat. Rev. Neurosci.* 2007. Vol. 8, no. 9. P. 657–661. DOI: 10.1038/nrn2213.

## References

1. Abraham A. The promises and perils of the neuroscience of creativity. *Front. Hum. Neurosci.* 2013;7:246. DOI: 10.3389/fnhum.2013.00246.
2. Benedek M, Fink A. Toward a neurocognitive framework of creative cognition: the role of memory, attention, and cognitive control. *Curr. Opin. Behav. Sci.* 2019;27:116–122. DOI: 10.1016/j.cobeha.2018.11.002.
3. Kenett YN, Faust M. A semantic network cartography of the creative mind. *Trends Cogn. Sci.* 2019;23(4):271–274. DOI: 10.1016/j.tics.2019.01.007.
4. Beaty RE, Chen Q, Christensen AP, Kenett YN, Silvia PJ, Benedek M, Schacter DL. Default network contributions to episodic and semantic processing during divergent creative thinking: A representational similarity analysis. *NeuroImage.* 2020;209:116499. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2019.116499.
5. Viganó S, Piazza M. Distance and direction codes underlie navigation of a novel semantic space in the human brain. *J. Neurosci.* 2020;40(13):2727–2736. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.1849-19.2020.
6. Theves S, Fernández G, Doeller CF. The hippocampus maps concept space, not feature space. *J. Neurosci.* 2020;40(38):7318–7325. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.0494-20.2020.
7. Behrens TEJ, Muller TH, Whittington JCR, Mark S, Baram AB, Stachenfeld KL, Kurth-Nelson Z. What is a cognitive map? Organizing knowledge for flexible behavior. *Neuron.* 2018;100(2):490–509. DOI: 10.1016/j.neuron.2018.10.002.
8. Bottini R, Doeller CF. Knowledge across reference frames: Cognitive maps and image spaces. *Trends Cogn. Sci.* 2020;24(8):606–619. DOI: 10.1016/j.tics.2020.05.008.
9. Kay K, Chung JE, Sosa M, Schor JS, Karlsson MP, Larkin MC, Liu DF, Frank LM. Constant sub-second cycling between representations of possible futures in the hippocampus. *Cell.* 2020;180(3):552–567. DOI: 10.1016/j.cell.2020.01.014.
10. Raffaelli Q, Wilcox R, Andrews-Hanna J. The neuroscience of imaginative thought: An integrative framework. In: Abraham A, editor. *The Cambridge Handbook of the Imagination.* Cambridge: Cambridge University Press; 2020. P. 332–353. DOI: 10.1017/9781108580298.021.
11. Amalric M, Wang L, Pica P, Figueira S, Sigman M, Dehaene S. The language of geometry: Fast comprehension of geometrical primitives and rules in human adults and preschoolers. *PLoS Comput. Biol.* 2017;13(1):e1005273. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1005273.
12. Tsukerman VD, Cheshkov GN. Fundamentals of nonlinear dynamics of sensory perception. I. Phase coding in oscillatory networks. *Neurocomputers: Development, Application.* 2002; (7–8):65–72 (in Russian).

13. Tsukerman VD. Mathematical model of phase coding of events in the brain. *Mathematical Biology and Bioinformatics*. 2006;1(1):97–107 (in Russian). DOI: 10.17537/2006.1.97.
14. Tsukerman VD, Eremenko ZS, Karimova OV, Kulakov SV, Sazykin AA. Cognitive neurodynamics two strategies navigation behavior of organisms. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2011;19(6):96–108 (in Russian). DOI: 10.18500/0869-6632-2011-19-6-96-108.
15. O’Keefe J, Dostrovsky J. The hippocampus as a spatial map. Preliminary evidence from unit activity in the freely-moving rat. *Brain Res*. 1971;34(1):171–175. DOI: 10.1016/0006-8993(71)90358-1.
16. Hafting T, Fyhn M, Molden S, Moser MB, Moser EI. Microstructure of a spatial map in the entorhinal cortex. *Nature*. 2005;436(7052):801–806. DOI: 10.1038/nature03721.
17. Bellmund JLS, Gärdenfors P, Moser EI, Doeller CF. Navigating cognition: Spatial codes for human thinking. *Science*. 2018;362(6415):eaat6766. DOI: 10.1126/science.aat6766.
18. Bernardi S, Benna MK, Rigotti M, Munuera J, Fusi S, Salzman CD. The geometry of abstraction in hippocampus and prefrontal cortex. *Cell*. 2020;183(4):954–967. DOI: 10.1016/j.cell.2020.09.031.
19. Kim H. Default network activation during episodic and semantic memory retrieval: A selective meta-analytic comparison. *Neuropsychologia*. 2016;80:35–46. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2015.11.006.
20. Marron TR, Lerner Y, Berant E, Kinreich S, Shapira-Lichter I, Hendler T, Faust M. Chain free association, creativity, and the default mode network. *Neuropsychologia*. 2018;118:40–58. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2018.03.018.
21. Doeller CF, Barry C, Burgess N. Evidence for grid cells in a human memory network. *Nature*. 2010;463(7281):657–661. DOI: 10.1038/nature08704.
22. Sharp PE, Blair HT, Cho J. The anatomical and computational basis of the rat head-direction cell signal. *Trends Neurosci*. 2001;24(5):289–294. DOI: 10.1016/S0166-2236(00)01797-5.
23. Sargolini F, Fyhn M, Hafting T, McNaughton BL, Witter MP, Moser MB, Moser EI. Conjunctive representation of position, direction, and velocity in entorhinal cortex. *Science*. 2006;312(5774):758–762. DOI: 10.1126/science.1125572.
24. Taube JS. The head direction signal: Origins and sensory-motor integration. *Annu. Rev. Neurosci*. 2007;30:181–207. DOI: 10.1146/annurev.neuro.29.051605.112854.
25. Rolls ET, Stringer SM. Spatial view cells in the hippocampus, and their idiothetic update based on place and head direction. *Neural Networks*. 2005;18(9):1229–1241. DOI: 10.1016/j.neunet.2005.08.006.
26. Rolls ET, Xiang JZ. Spatial view cells in the primate hippocampus and memory recall. *Rev. Neurosci*. 2006;17(1–2):175–200. DOI: 10.1515/REVNEURO.2006.17.1-2.175.
27. Tsukerman VD, Kharybina ZS, Kulakov SV. A mathematical model of hippocampal spatial encoding. II. Neurodynamic correlates of mental trajectories and decision-making problem. *Mathematical Biology and Bioinformatics*. 2014;9(1):216–256 (in Russian). DOI: 10.17537/2014.9.216.
28. Tsukerman VD. Towards creative cognition: the creative beginnings of relational neural networks with even cyclic inhibition. In: *Proceedings of the VII All-Russian Conference «Nonlinear Dynamics in Cognitive Research-2021»*. Nizhny Novgorod, 20-24 September 2021. Nizhny Novgorod: IAP RAS; 2021. P. 186–189 (in Russian).
29. Wang J, Narain D, Hosseini EA, Jazayeri M. Flexible timing by temporal scaling of cortical responses. *Nat. Neurosci*. 2018;21(1):102–110. DOI: 10.1038/s41593-017-0028-6.
30. Egger SW, Remington ED, Chang CJ, Jazayeri M. Internal models of sensorimotor integration regulate cortical dynamics. *Nat. Neurosci*. 2019;22(11):1871–1882. DOI: 10.1038/s41593-019-0500-6.
31. Raichle ME. The brain’s default mode network. *Annu. Rev. Neurosci*. 2015;38:433–447. DOI: 10.1146/annurev-neuro-071013-014030.

32. Higgins C, Liu Y, Vidaurre D, Kurth-Nelson Z, Dolan R, Behrens T, Woolrich M. Replay bursts in humans coincide with activation of the default mode and parietal alpha networks. *Neuron*. 2021;109(5):882–893. DOI: 10.1016/j.neuron.2020.12.007.
33. Peer M, Brunec IK, Newcombe NS, Epstein RA. Structuring knowledge with cognitive maps and cognitive graphs. *Trends Cogn. Sci.* 2021;25(1):37–54. DOI: 10.1016/j.tics.2020.10.004.
34. Schacter DL, Addis DR, Buckner RL. Remembering the past to imagine the future: the prospective brain. *Nat. Rev. Neurosci.* 2007;8(9):657–661. DOI: 10.1038/nrn2213.



*Цукерман Валерий Давидович* – родился в Баку (1945). После окончания средней школы (1963) служил в Советской армии (1964–1967). Окончил физический факультет Ростовского государственного университета с отличием по специальности физик-биофизик (1973). После окончания университета работал в НИИ нейрокибернетики им. А. Б. Когана Ростовского университета. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата биологических наук по специальности биофизика (Ленинградский государственный университет, 1982). Был руководителем лаборатории Математического моделирования биологических навигационных систем. Опубликовал более 70 научных работ в отечественной и зарубежной печати. Почетный работник высшего образования России. В настоящее время внештатный сотрудник Академии биологии и биотехнологии имени Д. И. Ивановского Южного федерального университета.

Россия, 344090 Ростов-на-Дону, пр. Стачки 194/1  
Академия биологии и биотехнологии имени Д. И. Ивановского  
Южного Федерального университета  
E-mail: vtsukerman17@gmail.com  
AuthorID (eLibrary.Ru): 109808



Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2022. Т. 30, № 3  
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2022;30(3)

Научная статья

УДК 159.922; 159.99; 57.022; 57.024; 004.81

DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-3-358-372

## «Метафора компьютера», межполушарная асимметрия и видовое (спонтанное) знание *Homo sapiens*

*Н. Ш. Александрова*

Общество «Языковой мост», Берлин, Германия

E-mail: nina.alexandrova@gmx.net

Поступила в редакцию 16.11.2021, принята к публикации 14.03.2022,

опубликована 31.05.2022

**Аннотация.** Цель настоящей статьи — дополнить дискуссию в области исследований и моделирования процесса познания I — данными нейропсихологии и межполушарной асимметрии и II — размышлениями о видовом (спонтанном) знании *Homo sapiens*. I. Данные нейропсихологии и межполушарной асимметрии свидетельствуют о двух разнонаправленных и взаимодополняющих способах обработки информации и регуляции функций, присущих мозгу. Один из этих способов — аналитическая, компьютероподобная обработка информации, необходимая при произвольном обучении, второй способ обеспечивает целостно-симультанную, образную, бессознательную и непроизвольную обработку. Двойственность познавательных стратегий ярко проявляется при психологическом анализе синдромов в случае мозговых поражений, а также различных состояний у здоровых людей (например, в случае билингвизма). II. Биологическое существование, являющееся основой для всех других пластов жизни, обеспечивается видоспецифическим поведением и знаниями. Предположительно, видовое знание проявляется как I — постоянная непроизвольная оценка окружающего мира и адекватные реакции на изменения в мире: от обыденных реакций (посторониться, прибавить шаг и т. п.) до способности без раздумий реагировать в опасных ситуациях. 2 — Способность понимать связи между явлениями без научных расчетов. О существовании такой способности говорит вся история человечества. Люди выживали без науки и попутно науку создавали. 3 — Глубинное знание (часто без возможности логически объяснить), что является естественным, полезным для нас, как для представителей вида *Homo Sapiens*, а что является противоестественным и вредным. Есть основания предположить, что видовое знание является основой, которая определяет общее в поведении людей разных эпох и культур во всем, что связано с продолжением рода и возвращением нового поколения. Видовые знания сливаются воедино в процессе развития со знаниями, полученными при обучении.

**Ключевые слова:** познание, человеческое общение, человеческое поведение, метафора компьютера, видовое знание *Homo Sapiens*, нейропсихология, межполушарная асимметрия.

**Для цитирования:** Александрова Н. Ш. «Метафора компьютера», межполушарная асимметрия и видовое (спонтанное) знание *Homo sapiens* // Известия вузов. ПНД. 2022. Т. 30, № 3. С. 358–372. DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-3-358-372

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

## “Computer metaphor”, interhemispherical asymmetry and species (spontaneous) knowledge of Homo sapiens

N. Sh. Aleksandrova

Sprachbrücke e.V. Berlin, Germany

E-mail: nina.alexandrova@gmx.net

Received 16.11.2021, accepted 14.03.2022, published 31.05.2022

**Abstract.** The purpose of this article is to supplement the discussion in the field of research and modeling of the process of cognition first with data from neuropsychology and interhemispheric asymmetry, and second with reflections on species' (spontaneous) knowledge of Homo sapiens. *I. The data* of neuropsychology and interhemispheric asymmetry signify two differently directed and complementary ways of processing information and regulating the functions inherent in the brain. One of these methods is analytical computer-like information processing, which is necessary for voluntary learning, the other method provides holistic-simultaneous, imaginative, unconscious, and involuntary processing. The duality of cognitive strategies is clearly manifested in the psychological analysis of syndromes in the case of brain lesions, as well as various conditions in healthy people (for example, in the case of bilingualism). *II. Biological existence*, which is the basis for all other layers of life, is provided by species-specific behavior and knowledge. Presumably species knowledge manifests itself as 1 – Constant involuntary assessment of the surrounding world and adequate reactions to changes in the world: from ordinary reactions (step aside, add a step, etc.) to the ability to react without hesitation in dangerous situations. 2 – The ability to understand connections between phenomena without scientific calculations. The entire history of mankind speaks of the existence of such an ability. People survived without science and created science along the way. 3 – Deep knowledge (often without the ability to logically explain) of what is natural and useful for us as representatives of the Homo Sapiens species, and of what is unnatural and harmful. There are reasons to assume that species knowledge is the basis that determines the common behavior of people of different eras and cultures in everything related to the continuation of the family and the cultivation of a new generation. Species knowledge merges together in the process of development with the knowledge gained during training.

**Keywords:** cognition, human behaviour, human communication, metaphor of a computer, species knowledge of Homo sapiens, neuropsychology, brain asymmetry.

**For citation:** Aleksandrova NSh. “Computer metaphor”, interhemispherical asymmetry and species (spontaneous) knowledge of Homo sapiens. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2022;30(3):358–372.

DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-3-358-372

*This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).*

### Введение

Разработки в области искусственного интеллекта и нейронных сетей стимулируют интерес к природе человеческого разума и сознания, к организации когнитивных функций человека. Последние работы, обобщающие исследования в области нервных основ сознания (К. Анохин 2021) [1], познания и когнитивных процессов (R. Maffei 2021) [2], показывают, что человек еще весьма далек от понимания своей способности мыслить и чувствовать. Исследования в области познания, по мнению Р. Маффей [2], оказались в тупике, спорными вопросами являются взаимосвязь между эмоциями и разумом, роль тела в познании, объяснительные возможности нейровизуализации. Современные исследования познания [3–11] можно разделить на два противоположных поля, каждое из которых неоднородно и является семейством взглядов: 1) когнитивизм, который рассматривает мозг как машину для обработки данных, центральную нервную систему как командный и контролирующий центр всего организма, а тело как простой инструмент центральной нервной системы и 2) различные версии теории воплощения (Embodied Cognition), разделяющие идею о том, что тело и его взаимодействия с центральной нервной системой и с окружающей средой играют решающую роль в человеческом поведении, знаниях и когнитивных процессах. Человеческое

тело в теориях воплощения рассматривается как коллектив, живое существо, которое использует мозг для опосредования взаимодействий. Эти взаимодействия могут происходить как внутри человеческого тела, так и между человеческим телом и окружающей средой. Разум предстает не как продукт мозга, а как деятельность живого существа; деятельность, которая интегрирует мозг в повседневные функции человеческого тела. С точки зрения когнитивизма человек — познающая система, а протекающие в этой системе процессы — поэтапная переработка информации по аналогии с переработкой информации в компьютере. Эта аналогия получила специальное название — компьютерная метафора. Р. Маффей подводит итог обзору существующих взглядов: «...мы чувствуем, что вычислительный подход, алгоритмические объяснения и метафора компьютера не могут ответить на все вопросы; мы чувствуем, что нецифрованные аспекты действительно существуют... вопрос дуализма ... это больше ощущение, чем утвержденная реальность; и надежная модель, которая фактически является альтернативой когнитивистской метафоре компьютера, еще не предложена». В статье М. Фаликман [12] говорится о возможности конвергенции когнитивной науки и подходов, сложившихся в отечественной психологии — культурно-исторической психологии и психологической теории деятельности. Для построения адекватной модели, по всей видимости, необходимо сведение воедино результатов наблюдений и исследований из многих областей знаний. В современных работах о познании и когнитивных процессах отсутствуют данные нейрпсихологии и межполушарной асимметрии. В первой части данной статьи сделана попытка восполнить этот пробел. Вторая часть посвящена биологической составляющей человеческого существования, анализируется становление и проявление в повседневной жизни спонтанного (видового) знания *Homo sapiens*. Поднимается вопрос о мозговом обеспечении данных функций.

## 1. Нейрпсихология и межполушарная асимметрия

Нейрпсихология — наука, которая исследует связи структуры и функций мозга с психическими процессами и поведением. В рамках этой дисциплины накоплен материал о нарушении познавательных процессов при различных поражениях мозга. Становление отечественной нейрпсихологии опиралось на исследование локальных очаговых поражений мозга (работы Л. Выготского, А. Лурия и их последователей). Важнейшей характеристикой организации мозга человека является межполушарная асимметрия: правое и левое полушария мозга различаются как морфологически, так и функционально. Как известно, у взрослых людей право- и левосторонние поражения мозга стабильно приводят к разным синдромам, которые в нейрпсихологии известны как право- и левополушарные синдромы. В докомпьютерную эпоху результаты нейрпсихологических тестов использовались для определения места очага поражения (правое или левое полушарие, горизонтальная и вертикальная локализация внутри полушария) при операциях на мозге. В настоящее время возможны исследования с помощью компьютерной томографии (КТ), магнитно-резонансной томографии (МРТ), позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ), электроэнцефалографии (ЭЭГ) и т. д. Данные методики позволяют выявлять функциональные и анатомические корреляты различных процессов у здоровых людей.

Осмысление феномена межполушарной асимметрии имеет долгую историю [13–24] и оно не закончено, оно продолжается. Левое полушарие, поражения которого нередко приводят к нарушениям речи, чтения, письма и счета, долгое время считалось доминантным, то есть основным в психической деятельности человека. Поражения правого полушария обычно не сопровождаются явными расстройствами устной и письменной речи и поэтому его считали субдоминантным, «немым» или даже «пустым». В то же время при правополушарных поражениях наблюдаются такие тяжелые и плохо компенсируемые расстройства как лицевая агнозия (центральным симптомом является нарушение узнавания лиц, то есть пациент перестает узнавать лица знакомых

людей, но углубленный анализ [25,26] показал, что при данном синдроме нарушается способность запоминать и опознавать индивидуальные особенности всех зрительных стимулов), анозогнозия (отрицание своего заболевания, то есть человек не может оценить свое состояние), игнорирование левой стороны пространства и т. д. Поведение и поступки пациентов с тяжелой правополушарной патологией нередко неадекватны. Правополушарные синдромы долгое время не были известны широкому кругу специалистов и не всегда диагностировались. То есть специфика деятельности левого полушария — вербально-аналитические функции и коммуникация — отчетливо страдала при патологии левого полушария, а оценить вклад правого полушария в психическую деятельность оказалось значительно сложнее. Д. Джексон [15] отметил связь правого полушария с произвольными автоматическими процессами. Изучение расщепленного мозга показало, что правое полушарие специализируется на целостно-синтетической, вневременной и конструктивной обработке информации [27]; при поражениях левого полушария обеспечивает понимание речи [28]. Есть данные о вкладе правого полушария в решении творческих задач [29]. Принципиально новый и перспективный для дальнейших исследований взгляд на функции правого молчащего полушария на основе обзора литературы провозглашает Ян МакГилхрист [30] в своей работе «Господин и его эмиссар: разделенный мозг и созидание западного мира» (2009): в правом полушарии зарождаются мысли, поэтому именно оно является хозяином, господином, а роль левого говорящего полушария — связь с внешним миром.

Осмысление межполушарной асимметрии проходит путь от представления «полушария обрабатывают разные стимулы, разную информацию» к пониманию, что дело не в стимулах, а в способах обработки: каждому полушарию свойственна своя специфическая стратегия обработки информации и все когнитивные функции обеспечиваются двойственным процессом. Предположение о существовании функциональных систем, которые имеют представительство в двух полушариях в симметричных областях и совместно обеспечивают некоторые виды зрительного гнозиса (узнавания), содержится в работе Е. Кок [31]. В 1970-х годах были сформулированы основные положения теории системно-динамической организации высших психических функций. Основоположник отечественной нейропсихологии А. Лурия [32] писал: «...мы должны отказаться от упрощенных представлений, согласно которым одни (речевые) процессы осуществляются только левым (у правой) полушарием, в то время как другие (неречевые) — только правым полушарием. Психологический анализ показал, что практически все психические процессы являются сложными по их функциональной организации, ибо они могут совершаться на разных уровнях (произвольном и произвольном, неосознанном и осознанном, непосредственном и опосредованном). Это позволяет достаточно обоснованно предполагать, что существует тесное взаимодействие обоих полушарий, причем роль каждого из них может меняться в зависимости от задачи, на решение которой направлена психическая деятельность, и от структуры ее организации». Современный взгляд на проблему представлен в работе Е. А. Азарова, Б. С. Котик-Фридгут [24]: «С позиции системно-динамического подхода к организации психических функций проблема доминантности предстает не как вопрос о преимуществе того или другого полушария в осуществлении речевой функции, а как проблема специфики «вклада» каждого полушария в процессы реализации целостной функции». Далее: «...асимметрия — побочный феномен полушарной специализации, характерный для мозговой организации человеческой психики».

В настоящее время с большой долей уверенности можно утверждать, что мозг представляет собой единый парный орган, а деятельность каждого из полушарий имеет свою специфику и вносит свой особый вклад в осуществление любой психической функции. Нормальное функционирование мозга возможно лишь при взаимодействии полушарий. Другими словами: каждому полушарию свойственен особый способ (или стратегия) обработки информации и регуляции функций. Левое полушарие обеспечивает вербально-логическую, абстрактно-схематическую, аналитическую, сукцессивную, с участием сознания, произвольную обработку и регуляцию,

правое — наглядно-образную, конкретную, непосредственную, синтетическую, симультанную, бессознательную и произвольную. Оба способа обработки информации, дополняя друг друга, сливаются в развитии психики и при нормальном функционировании трудноразделимы.

Но межполушарная организация функций, как и все процессы живого организма, характеризуется не только устойчивостью (организация функций повторяется от человека к человеку и от поколения к поколению), но и изменчивостью: полушария и присущие им стратегии обработки информации не связаны абсолютно жестко. Так, при раннем удалении одного из полушарий сохранное перенимает практически все функции удаленного, то есть начинает обеспечивать обе стратегии обработки информации. Возможна зеркальная организация функций у левой и некоторые индивидуальные вариации, которые ранее обозначали как «расхождение доминантности».

Двойственность познавательных стратегий ярко проявляется при психологическом анализе синдромов в случае мозговых поражений, а также различных состояний у здоровых людей (например, в случае билингвизма). О двойственности познавательных стратегий человеческого мозга нередко говорили и говорят как об очевидном природном феномене без связи с полушариями [33–35].

В настоящее время нет общепринятой теории, объясняющей возникновение межполушарной асимметрии в фило- и онтогенезе. Есть данные, что приобретение культурных навыков, особенно освоение письменной речи, значительно изменяет организацию функций мозга [36–38]. Неврологи рубежа XIX–XX веков, которые нередко наблюдали неграмотных пациентов, утверждали, что у неграмотных не бывает тяжелых афазий либо афазия вообще не развивается. Высказывались предположения, что доминантность левого полушария связана с освоением грамоты [39]. Несмотря на то, что специализация полушарий достаточно устойчива (повторяется от человека к человеку и от поколения к поколению), она не является строго определенной от рождения и неизменной в течение жизни. Скорее, специализация складывается по мере развития ребенка и приобретения им культурных навыков. Также возможны изменения при поражениях мозга благодаря пластичности.

Вернемся к вопросу, который обозначен в начале статьи: как позиции когнитивистов и сторонников теорий воплощения соотносятся с данными нейropsychологии и межполушарной асимметрии? Для сторонников «метафоры компьютера» компьютероподобная обработка информации — единственный способ действия, присущий мозгу. В то же время данные нейropsychологии и межполушарной асимметрии свидетельствуют о двух разнонаправленных и взаимодополняющих способах обработки информации и регуляции функций, присущих мозгу. Аналитическая, то есть компьютероподобная обработка информации мозгом существует и, как правило, связана с деятельностью левого полушария. Благодаря этой способности возможно произвольное обучение и научный прогресс. Компьютер создан человеческим разумом в определенной степени по образу и подобию человеческого разума. Вернее, по образу и подобию той части разума, которая логична и доступна анализу. Но этот способ обработки информации мозгом не единственный и, вероятно, не основной для повседневной жизни человека. Вклад правого полушария в общемозговую деятельность изучен недостаточно, а предположение о его важнейшей роли, высказанное Я. МакГилхрист [30], вполне правдоподобно. Представление о мозге и разуме как о «метафоре компьютера» переключается с представлением о безусловном доминировании левого полушария в общемозговой деятельности, которое в недавнем времени было весьма распространенным. В обоих случаях аналитическая обработка информации, которая проявляется ярко и без которой невозможно обучение, воспринимается как ведущая или даже единственная деятельность мозга. При этом второй (или первый по значимости для человека?) неявный путь познания, связанный, по всей видимости, с правым полушарием, остается в тени. Вероятно, дальнейшее развитие науки привнесет ясность в этот вопрос. Несмотря на то, что компьютер можно наделить нечеловеческой памятью и недоступной человеку скоростью обработки информации, человеческий

разум неизмеримо больше, чем самый современный компьютер. Человек — существо, прежде всего, биологическое; как известно, далеко не все процессы и явления, присущие живой материи, поддаются анализу. Также важнейшими для человека являются высшие смыслы бытия, духовная жизнь, а в этой сфере компьютер также беспомощен. Компьютероподобная обработка информации человеческим мозгом — не весь разум, а, вероятно, лишь один из инструментов разума.

Идею о решающей роли тела в познании, которую развивают теории воплощения, сложно совместить с данными о нарушениях когнитивных функций: как известно, к когнитивным проблемам приводят только поражения мозга, а при самых тяжелых телесных травмах и болезнях когнитивная сфера остается сохранной, что позволяет многим инвалидам успешно учиться, работать, участвовать в паралимпийских играх. Психологические проблемы инвалидов могут подавляюще влиять на когнитивную сферу, но это другой уровень влияния, отличный от влияния мозговых поражений. В то же время мысль о том, что мозг не командует, получая информацию, а используется какой-то другой силой (в теориях воплощения эта сила — тело), может возникать при осмыслении некоторых феноменов, в частности — феномена мозговой пластичности. Способность мозга изменять свою структуру и функции, приспосабливаясь к изменяющимся внешним и внутренним факторам, создает впечатление наличия руководящего центра над самим мозгом. Но также возможно, что командовать собой, переделывать себя мозг может сам. В настоящее время мало известно о том, какие силы заставляют мозг реагировать тем или иным образом. Важным также является понимание роли телесного контакта в младенческом возрасте. Грудное вскармливание — это не только пища, это природная гарантия близкого и длительного телесного контакта младенца и матери. Этот контакт, вероятно, является необходимым для развития ребенка в доречевой период и подготавливает языковое развитие.

## **2. Видовые характеристики человека (спонтанные знания и поведенческие особенности)**

Биологическая составляющая человеческого существования чаще всего пребывает в тени явлений социальной и духовной жизни, она выходит на первый план обсуждений лишь в связи с болезнями и неотвратимостью ухода в мир иной. Нет смысла перечислять отличия человека разумного от братьев наших меньших, но, как бы ни была огромна пропасть между человеком и зверем, биологическая канва жизни отдельной особи у диких высших животных и у человека как представителя вида *Homo sapiens*, практически одинакова. Рождаемся, взрослеем, производим на свет потомство, вскармливаем его и заботимся о нем, стареем. Человек, как и все животные, подвержен болезням и смертен. Жизни отдельных особей составляют жизнь биологического вида. Каждый вид приспособлен для выживания в определенной среде и наделен даром по возможности избегать опасности, обустроить жилище, оберегать потомство и т. д. и т. п. Наблюдая за общением кошки с подрастающими котятками или взрослых птиц с птенцами, можно предположить, что родители учат детей охотиться или искать корм. Возможно, часть навыков в животном мире действительно передается от родителей детям. Но ясно, что далеко не все: так, птицы строят гнезда до появления на свет птенцов, поэтому повзрослевшие птенцы не могут использовать опыт родителей в своей самостоятельной жизни. Представители многих видов живых существ вообще не встречаются с родителями, но, появившись на свет (вылупившись из яйца, из икринки и т. п.), начинают вести жизнь, характерную для данного вида. Логично предположить, что существует видовое знание, то есть знание, которое изначально, от рождения присуще всем здоровым особям данного вида. Примером такого видового знания может служить знание о подходящей данному виду пище, оценка запахов как «вкусных» либо неприемлемых. Известно, что одни и те же субстанции по вкусу и запаху могут быть привлекательны для одного

вида и оцениваться как несъедобные другим видом. Итак, очевидно, что в животном мире существует видовое (видоспецифическое) знание, которое во многом определяет жизнь каждой особи и способствует сохранению данного вида. А у человека есть знание, которое не надо учить за школьной партой, которое дается нам природой так же, как, к примеру, способность слышать и видеть? Или все, что мы знаем и умеем, выучено благодаря компьютероподобному разуму?

**2.1. Э. Леннеберг о дихотомии специфика вида — пластичность мозга.** Леннебергом [40] описано принципиальное различие поведенческих характеристик, наблюдаемых у высших живых существ. Это, с одной стороны, видоспецифическое поведение (то есть обязательное для здорового представителя вида (прим. авт. — *Н. А.*) и, с другой стороны, поведение, которое может быть сформировано на основе пластичности мозга, оно не является обязательным. Так, все кошки мяукают, а собаки лают, это поведение является видоспецифическим, но возможно изменение индивидуального поведения, к примеру, в результате дрессировки. Приобретение тех или иных дополнительных навыков не изменит видоспецифических характеристик, то есть собаки всегда будут лаять, а кошки мяукать. Пластичность — эволюционный феномен, продукт биологических условий, который в эволюции живых существ приходит на смену регенерации, присущей низшим видам. Дихотомия специфика вида — пластичность прослеживается и в поведенческих характеристиках человека. Особенно важно, подчеркивает Леннеберг, что языковое развитие ребенка (вербальная коммуникация (прим. авт. — *Н. А.*) является видоспецифическим для *Homo sapiens*, то есть ребенок дозревает до вербальной коммуникации, никаких особых упражнений для этого не существует. Языковую среду вокруг ребенка Леннеберг сравнивает с пищей: для роста ребенка пища необходима, но не пища определяет закономерности роста и развития. Также и языковая среда необходима для становления языка, но оно происходит как созревание по своим внутренним законам. Многообразие современных языков Леннеберг связывает с пластичностью мозга. Леннеберг также проводит аналогию с двигательной сферой: человеческая способность ходить — видоспецифический навык.

Термин «видоспецифический» имеет два значения. Иногда этот термин употребляют, подчеркивая, что поведенческая характеристика присуща только одному конкретному виду. Так, голосовое общение животных (ворона каркает, собака лает и т. п.) является видоспецифическим в том смысле, что оно уникально для каждого вида. В данной работе этот термин означает поведение, которое обязательно для здорового представителя вида. Это способность летать для птиц, бегать для зайцев, нырять для уток и т. д. и т. п. А также каркать для вороны, мяукать для кошки, лаять для собаки. В данном контексте важно подчеркнуть, что у каждого вида есть набор поведенческих характеристик, без которых представитель вида, как минимум, инвалид: утка, которая не может летать или собака, которая не может бегать и т. п. Также и человек, который не может видеть, слышать, ходить или говорить — инвалид. Некоторые видоспецифические характеристики врожденны, а до формирования других детеныши должны дозреть. Для человека врожденными видоспецифическими характеристиками являются зрение, слух, тактильные ощущения и т. п., а до ходьбы и вербальной коммуникации младенец дозревает. На каждом уровне, достигнутом в результате созревания, пластичность предоставляет окружающей среде возможность развивать и совершенствовать речевые и двигательные навыки. Дети растут в разной социальной среде. Одних учат иностранным языкам, музыке или акробатике, другие не посещают никаких дополнительных занятий, но любой здоровый ребенок в определенное природой время начинает ходить и говорить.

В настоящее время общепризнанно, что пластичность мозга проявляется как способность к приобретению знаний и навыков, как адаптация и восстановление нарушенных функций. Пластичность мозга можно определить как генетически обусловленные реакции на изменения внутренней или внешней среды. «Генетическая программа, наряду с обеспечением общего плана развития нервной системы, как бы предусматривает и предвидит вероятные средовые

воздействия, которые могут встретиться организму ребенка на пути его развития и заранее готовит адекватные поведенческие реакции» [41]. Исходя из теории Леннеберга, логично предположить, что первоочередная цель пластичных перестроек при изменениях внутренней или внешней среды — поддержание форм поведения, которые являются спецификой вида [42]. Видоспецифическими являются не только такие «заметные» поведенческие характеристики человека как способность ходить и говорить, но и менее осязаемые, как, к примеру, формирование спонтанных (житейских) понятий и адекватное поведение.

**2.2. Л. С. Выготский о дихотомии спонтанные понятия — научные понятия.** Выготский в своих работах много внимания уделяет спонтанным понятиям, которые непроизвольно формируются у ребенка раньше научных, но осознаются позже. Сравнивая логический и натуральный пути освоения языка, Выготский [33] отмечает их взаимозависимость и противоположную направленность и проводит аналогию с развитием научных и спонтанных (житейских) понятий. «...между этими противоположно направленными путями развития существует обоюдная взаимная зависимость, точно так же, как между развитием научных и спонтанных понятий...». Спонтанные (житейские) понятия приобретаются и используются в быту, а научные понятия — это термины, встроенные в систему знаний. Выготский подчеркивает, что значения научных понятий осознаются первыми и осознанность значений научных понятий постепенно распространяется и на житейские. Приведем несколько цитат: «Научные понятия прорастают вниз через житейские. Житейские понятия прорастают вверх через научные», «Анализ спонтанного понятия ребёнка убеждает нас, что ребёнок в гораздо большей степени осознал предмет, чем самоё понятие. Анализ научного понятия убеждает нас, что ребёнок в самом начале гораздо лучше осознаёт самоё понятие, чем представленный в нём предмет». Также Выготский подчеркивает, что развитие научных понятий является частью общего процесса развития, который обеспечивается систематическим обучением: «... гипотетический путь развития научных понятий представляет собой только частный случай более обширной группы процессов развития, относящийся к развитию, источником которого является систематическое обучение...» [33].

Выготский фактически говорит о двух путях познания:

- 1) *натуральный, природный путь, генерирующий спонтанные понятия; и*
- 2) *процессы развития, источником которых является систематическое обучение. Первый путь непроизвольный, не поддается регуляции со стороны человека. На втором пути — процессы произвольные, здесь возможно сознательное управление. Оба пути сливаются в развитии психики.*

**2.3. Адекватное поведение.** Адекватное поведение — неотъемлемое условие выживания, оно возможно благодаря способности человека постоянно оценивать окружающий мир и свое положение в нем. Несомненно, что во многом адекватное поведение воспитывается в социуме: ребенка с раннего возраста знакомят с опасными предметами, учат правильно вести себя в разных ситуациях, но некоторые заболевания, например, ранний детский аутизм, нарушают способность воспринять это научение и одним из симптомов заболевания является неспособность ребенка оценить общий контекст происходящего, намерения других людей и т. п. То есть существуют природные задатки, биологическая основа, которая необходима для формирования адекватного поведения, как и всех других видоспецифических характеристик. Видоспецифические характеристики мы видим сформированными в социуме, их проявления могут различаться, так как зависят от условий жизни. Различия в определенной мере маскируют биологическую основу, выдвигая на первый план социальную раскраску. Следует признать правоту А. Н. Северцова [43] в том, что наследственной является только «способность к определенным действиям, но самые действия не предопределены наследственно и могут быть крайне разнообразными».

**2.4. Видоспецифические характеристики.** Для видоспецифического поведения (знания) характерно следующее.

1. Становление видоспецифического поведения (знания) протекает как созревание (непроизвольно), нет никаких особых упражнений.
2. Четкие сроки формирования в онтогенезе. В науках, изучающих развитие ребенка, данные сроки определяются как норма. Значительное отклонение от обычных сроков говорит о нездоровье.
3. Видоспецифическое поведение (знание) не может быть забыто, здоровый человек не может разучиться ходить, говорить, адекватно реагировать. Только болезнь нарушает эти функции. Нарушение любой видоспецифической характеристики ведет к инвалидизации.

Сравним с навыками и знаниями, которые не являются видоспецифическими, то есть обязательными для здорового человека, а приобретаются посредством пластичности мозга, например, выученные стихи, иностранный язык и спортивные навыки.

- Приобретаются произвольно, осознанно в процессе обучения.
- Нет четких сроков формирования, только благоприятный период.
- Сформированные навыки у здорового человека могут быть утрачены без повторения или тренировок.

**2.5. Как проявляется и что дает нам спонтанное (видовое) знание?** Предположительно:

- Постоянная произвольная оценка окружающего мира и себя в этом мире, понимание намерений других людей, общего контекста происходящего, способность адекватно реагировать на меняющийся мир: от самых обыденных реакций — посторониться, прибавить или убавить шаг (скорость) до способности реагировать без раздумий в экстремальных ситуациях. В работе Д. Канеман [44] отмечается, что в процессе эволюции выживание больше зависит от способности быстро реагировать, чем от способностей к рассуждению, которые требуют времени. Культура и цивилизация приходят позже и строятся на этих реакциях.
- Способность понимать связи между явлениями без научных расчетов. О существовании такой способности говорит вся история человечества. Люди выживали без науки и попутно науку создавали. Возможно, именно такой способ познания эффективен при контакте со сверхсложными системами, из которых, как известно, и состоит окружающая природная среда.
- Глубинное знание (часто без возможности логически объяснить), что является естественным, полезным для нас, как для представителей вида *Homo sapiens*, а что является противоестественным и вредным.

Как пример видового (спонтанного) знания у человека можно привести следующее наблюдение: любой взрослый человек понимает, что значительная задержка при освоении ребенком родного языка связана с нездоровьем, а нарушение или потеря родного языка — с тяжелой болезнью. Сравним: никто не назовет человека больным на том основании, что он плохо владеет иностранным языком или забыл его. Заметим, что различие когнитивных механизмов родного и иностранного языков в науке четко не сформулировано, но наше видовое знание безошибочно определяет это различие.

Вероятно, спонтанное знание изменяется, развивается с возрастом в процессе взаимодействия с навыками и знаниями, приобретенными в течение жизни.

**2.6. Продолжение рода и выживание вида.** Выживание вида теснейшим образом связано со способностью произвести на свет потомство и вырастить новое здоровое поколение. Известно, что количество детенышей (яиц, икринок) у разных видов животных соответствует их образу жизни и оптимально с точки зрения сохранения вида. Там, где выжить смогут лишь единицы, потенциальных продолжателей рода будет много, например, икринок у рыб. А если потомство

нужно вскармливать, защищать, учить, то количество детенышей невелико. У женщины чаще всего рождается только один ребенок и это говорит о том, что младенец в первые годы жизни требует всех сил матери. Для того чтобы ребенок вырос здоровым, у него должны сформироваться видоспецифические характеристики (способность ходить и говорить, способность адекватно оценивать окружающий мир и т. д.). Младенец всецело зависит от родителей, он нуждается во вскармливании, защите, уходе, руководстве. Казалось бы, все это — социальная практика. Ведь родители своим умом решают, как лучше воспитывать малыша. Конечно, помогают книги «для мам», «мамины школы», опытные бабушки и т. п. Но и дикие животные успешно растят свое потомство. Без книг, школ и бабушек. У животных, как мы знаем, это называется инстинкт продолжения рода. А у человека его нет совсем? Или он незаметно руководит нами и определяет многие наши «собственные» решения и поступки? Логично предположить, что природа обеспечивает оптимальные реакции родителей в отношении своих детей. Желание иметь детей, желание оградить их от всяческих бед любой ценой, даже ценой своей жизни, трепетное отношение к младенцам — все это совершенно необходимо для выживания вида, поэтому заложено в нас природой. Именно эти личностные установки оцениваются обществом как нормальные, а противоположные воззрения большинством в обществе не приветствуются, так как они представляют угрозу самому существованию вида. Можно предположить, что биологическое начало выступает как глубинное побуждение, во многом обуславливающее поведение человека по отношению к младенцам, а социальные условия придают этому побуждению ту или иную окраску.

### Обсуждение

Можно ли предположить, что ведущую роль в обеспечении видоспецифических характеристик у человека играет правое полушарие? Исходя из симптоматики поражений правого полушария [17, 18, 25, 25, 26, 31] такое предположение сделать можно. Несомненно, что опираться на данные поражений мозга нужно с осторожностью: еще Д. Джексоном замечено, что локализация поражения, разрушающего функцию и локализация функции — разные вещи (цит. по памяти — *Н.А.*). Помочь в решении этого вопроса может анализ симптоматики поражений правого полушария, на сегодняшний день многие правополушарные синдромы описаны лишь на феноменологическом уровне. Также исследования здоровых людей с применением инструментальных методов могут выявить функциональные и анатомические корреляты. Один из самых сложных вопросов, с которым сталкиваются исследователи познания и когнитивных процессов — истоки нравственности и духовной жизни. Есть ли в биологическом фундаменте, который получает человек при рождении, задатки сопереживания, совести, чувства справедливости?

### Заключение

Данные нейропсихологии и межполушарной асимметрии свидетельствуют о существовании двух разнонаправленных и взаимодополняющих способов обработки информации и регуляции функций, присущих мозгу. При этом аналитическая компьютероподобная обработка информации мозгом — только часть познавательной способности человека, необходимая при произвольном обучении, необходимая для научного прогресса. Но в повседневной жизни человек прибегает к ней нечасто, без нее можно обойтись так же, как обходятся в быту без компьютера. Эволюционная цель видового (спонтанного) знания — сохранение вида в целом через сохранение каждого индивида. Видовое знание бережет нас и будущие поколения. Любые спонтанные (видовые) знания формируются произвольно в процессе развития ребенка и настолько обыденны для человека, что мы их обычно не замечаем. Более того, мы и есть во многом эти глубинные знания. Нарушение любой видоспецифической характеристики ведет к инвалидизации.

## Список литературы

1. *Анохин К. В.* Когнитом: в поисках фундаментальной нейронаучной теории сознания // Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. 2021. Т. 71, № 1. С. 39–71. DOI: 10.31857/S0044467721010032.
2. *Maffei R.* Between instincts and reason: understanding a critical relationship [Electronic resource] // 2021. Academia Letters. Available from: [https://www.academia.edu/51621276/Between\\_instincts\\_and\\_reason\\_understanding\\_a\\_critical\\_relationship](https://www.academia.edu/51621276/Between_instincts_and_reason_understanding_a_critical_relationship).
3. *Piccinini G.* The first computational theory of mind and brain: A close look at McCulloch and Pitts's "Logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity" // *Synthese*. 2004. Vol. 141, no. 2. P. 175–215. DOI: 10.1023/B:SYNT.0000043018.52445.3e.
4. *Miłkowski M.* Why think that the brain is not a computer? // *APA Newsletter. Philosophy and Computers*. 2017. Vol. 16, no 2. P. 22–28.
5. *Miłkowski M.* Objections to computationalism: A survey // *Roczniki Filozoficzne*. 2018. Vol. 66, no 3. P. 57–75. DOI: 10.18290/rf.2018.66.3-3.
6. *Piccinini G.* *Neurocognitive Mechanisms: Explaining Biological Cognition*. Oxford: Oxford University Press, 2020. 416 p. DOI: 10.1093/oso/9780198866282.001.0001.
7. *Niedenthal P. M., Barsalou L. W., Winkielman P., Krauth-Gruber S., Ric F.* Embodiment in attitudes, social perception, and emotion // *Personality and Social Psychology Review*. 2005. Vol. 9, no. 3. P. 184–211. DOI: 10.1207/s15327957pspr0903\_1.
8. *Barsalou L. W.* Grounded cognition // *Annu. Rev. Psychol.* 2008. Vol. 59. P. 617–645. DOI: 10.1146/annurev.psych.59.103006.093639.
9. *Wilson R. A., Foglia L.* Embodied cognition [Electronic resource] // In: Zalta E. N. (ed.) *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Stanford: CSLI, Stanford University, 2016. Available from: <https://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/embodied-cognition/>.
10. *Adams F.* Embodied cognition // *Phenomenology and the Cognitive Sciences*. 2010. Vol. 9, no. 4. P. 619–628 DOI: 10.1007/s11097-010-9175-x.
11. *Fuchs T.* *Ecology of the Brain: The Phenomenology and Biology of the Embodied Mind*. Oxford: Oxford University Press, 2017. 368 p. DOI: 10.1093/med/9780199646883.001.0001.
12. *Фаликман М. В.* Когнитивная наука в XXI веке: организм, социум, культура // *Психологический журнал Международного университета природы, общества и человека «Дубна»*. 2012. № 3. С. 31–37.
13. *Broca P.* Remarques sur le siège de la faculté du langage articulé, suivies d'une observation d'aphémie (perte de la parole) // *Bulletin et Mémoires de la Société Anatomique de Paris*. 1861. Vol. 36. P. 330–357.
14. *Jackson J.* *Ambidexterity: Or Two-Handedness And Two-Brainedness, An Argument For Natural Development And Rational Education*. London: Kegan Paul, 1905. 258 p.
15. *Джексон Дж.* О природе двойственности мозга // *Нейропсихология: Хрестоматия*. 3-е изд. / Под ред. Е. Д. Хомской. СПб.: Питер, 2011. С. 162–164.
16. *Выготский Л. С.* Психология и учение о локализации психических функций // *Собрание сочинений: В 6 т. Т. 1. Вопросы теории и истории психологии*. М.: Педагогика, 1982. С. 168–174.
17. *Лурия А. Р.* Мозг человека и психические процессы. В 2 т. Т. 2. *Нейропсихологический анализ сознательной деятельности*. М.: Педагогика, 1970. 496 с.
18. *Доброхотова Т. А., Брагина Н. Н.* Функциональная асимметрия и психопатология очаговых поражений мозга. М.: Медицина, 1977. 360 с.
19. *Симерницкая Э. Г.* Нейропсихологический подход к изучению доминантности полушарий // *Доминантность полушарий*. М.: Издательство Московского университета, 1978. С. 49–68.
20. *Брагина Н. Н., Доброхотова Т. А.* Функциональные асимметрии человека. М.: Медицина, 1981. 288 с.

21. *Котик Б. С.* Межполушарное взаимодействие у человека. Ростов-на-Дону: Издательство Ростовского университета, 1992. 176 с.
22. *Хомская Е. Д.* Об асимметрии блоков мозга // *Нейропсихология сегодня* / Под ред. Е. Д. Хомской. М.: Издательство Московского университета, 1995. С. 14–27.
23. *Визель Т. Г.* О характере полушарных интеграций // *Асимметрия*. 2015. Т. 9, № 4. С. 39–47. DOI: 10.18454/ASY.2015.34.735.
24. *Азарова Е. А., Котик-Фридгут Б. С.* Межполушарное взаимодействие у человека. Учебное пособие. Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2021. 158 с.
25. *Александрова Н. Ш.* Зрительные агнозии и двойственность зрительного опознания // Труды VI Всероссийской конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях — 2019». 23–27 сентября 2019, Нижний Новгород. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2019. С. 22–26.
26. *Александрова Н. Ш.* Схематичный рисунок как когнитивный процесс и почему пациенты с лицевой агнозией не узнают лица // Первый Национальный конгресс по когнитивным исследованиям, искусственному интеллекту и нейроинформатике «IX международная конференция по когнитивной науке». Сборник научных трудов. В двух частях. Ч. 1. 10–16 октября, Москва, Россия. М.: НИЯУ МИФИ, 2021. С. 285–288.
27. *Sperry R. W.* Some general aspects of interhemispheric integration // In: Mountcastle V. B. (ed.) *Interhemispheric Relations and Cerebral Dominance*. Baltimore: Johns Hopkins Press, 1962. P. 43–49.
28. *Zaidel E.* Lexical organisation in right hemisphere // In: Buser P. A., Rougeul-Buser A. (eds.) *Cerebral Correlates of Conscious Experience*. Netherlands: Elsevier, 1978. P. 177–196.
29. *Jung-Beeman M., Bowden E. M., Haberman J., Frymiare J. L., Arambel-Liu S., Greenblatt R., Reber P. J., Kounios J.* Neural activity when people solve verbal problems with insight // *PLoS Biol*. 2004. Vol. 2, no. 4. P. e97. DOI: 10.1371/journal.pbio.0020097.
30. *McGilchrist I.* *The Master and His Emissary: The Divided Brain and the Making of the Western World*. New Haven: Yale University Press, 2009. 608 p.
31. *Кок Е. П.* Зрительные агнозии. Л.: Медицина, 1967. 224 с.
32. *Лурия А. П.* Предисловие // *Симерницкая Э. Г.* Доминантность полушарий. М.: Издательство Московского университета, 1978. С. 5–6.
33. *Выготский Л. С.* Мышление и речь. М.-Л.: Государственное социально-экономическое издательство, 1934. 362 с.
34. *Alexandrova N. S., Antonets V. A., Kuzenkov O. A., Nuidel I. V., Shemagina O. V., Yakhno V. G.* Bilingualism as an unstable state // In: Velichkovsky B. M., Balaban P. M., Ushakov V. L. (eds) *Advances in Cognitive Research, Artificial Intelligence and Neuroinformatics*. Intercognsci 2020. Vol. 1358 of *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Cham: Springer, 2021. P. 359–367. DOI: 10.1007/978-3-030-71637-0\_41.
35. *Александрова Н. Ш., Александрова О. А.* Импрессивная (сенсорная) алалия // *Журнал неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова*. 2016. Т. 116, № 11. С. 114–120. DOI: 10.17116/jnevro201611611114-120.
36. *Dehaene S., Cohen L.* Cultural recycling of cortical maps // *Neuron*. 2007. Vol. 56, no. 2. P. 384–398. DOI: 10.1016/j.neuron.2007.10.004.
37. *Dundas E. M., Plaut D. C., Behrmann M.* The joint development of hemispheric lateralization for words and faces // *J. Exp. Psychol. Gen*. 2013. Vol. 142, no. 2. P. 348–358. DOI: 10.1037/a0029503.
38. *Castro-Caldas A., Reis A.* Neurobiological substrates of illiteracy // *The Neuroscientist*. 2000. Vol. 6, no. 6. P. 475–482. DOI: 10.1177/107385840000600610.
39. *Джексон Дж. Х.* Избранные работы по афазии. СПб.: Нива, 1996. 72 с.
40. *Lenneberg E. H.* *Biologische Grundlagen der Sprache*. Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1972. 597 s.

41. *Скворцов И. А., Ермоленко Н. А.* Развитие нервной системы у детей в норме и патологии. М.: МЕДпресс-информ, 2003. 368 с.
42. *Александрова Н. Ш.* Обеспечение видоспецифических форм поведения — первоочередная цель пластичности мозга? // Труды конференции «Когнитивные исследования на современном этапе». 19-22 ноября 2018, Архангельск. Архангельск: САФУ, 2018. С. 14–17.
43. *Северцов А. Н.* Эволюция и психика. М.: Издательство Сабашниковых, 1922. 54 с.
44. *Kahneman D.* Thinking, Fast and Slow. New York: Farrar, Straus and Giroux, 2011. 499 p.

## References

1. Anokhin KV. The cognitome: Seeking the fundamental neuroscience of a theory of consciousness. *Neuroscience and Behavioral Physiology*. 2021;51(7):915–937. DOI: 10.1007/s11055-021-01149-4.
2. Maffei R. Between instincts and reason: understanding a critical relationship [Electronic resource]. 2021. Academia Letters. Available from: [https://www.academia.edu/51621276/Between\\_instincts\\_and\\_reason\\_understanding\\_a\\_critical\\_relationship](https://www.academia.edu/51621276/Between_instincts_and_reason_understanding_a_critical_relationship).
3. Piccinini G. The first computational theory of mind and brain: A close look at McCulloch and Pitts's "Logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity". *Synthese*. 2004;141(2):175–215. DOI: 10.1023/B:SYNT.0000043018.52445.3e.
4. Miłkowski M. Why think that the brain is not a computer? *APA Newsletter. Philosophy and Computers*. 2017;16(2):22–28.
5. Miłkowski M. Objections to computationalism: A survey. *Roczniki Filozoficzne*. 2018;66(3):57–75. DOI: 10.18290/rf.2018.66.3-3.
6. Piccinini G. *Neurocognitive Mechanisms: Explaining Biological Cognition*. Oxford: Oxford University Press; 2020. 416 p. DOI: 10.1093/oso/9780198866282.001.0001.
7. Niedenthal PM, Barsalou LW, Winkielman P, Krauth-Gruber S, Ric F. Embodiment in attitudes, social perception, and emotion. *Personality and Social Psychology Review*. 2005;9(3):184–211. DOI: 10.1207/s15327957pspr0903\_1.
8. Barsalou LW. Grounded cognition. *Annu. Rev. Psychol.* 2008;59:617–645. DOI: 10.1146/annurev.psych.59.103006.093639.
9. Wilson RA, Foglia L. Embodied cognition [Electronic resource]. In: Zalta EN, editor. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Stanford: CSLI, Stanford University; 2016. Available from: <https://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/embodied-cognition/>.
10. Adams F. Embodied cognition. *Phenomenology and the Cognitive Sciences*. 2010;9(4):619–628. DOI: 10.1007/s11097-010-9175-x.
11. Fuchs T. *Ecology of the Brain: The Phenomenology and Biology of the Embodied Mind*. Oxford: Oxford University Press; 2017. 368 p. DOI: 10.1093/med/9780199646883.001.0001.
12. Falikman MV. Cognitive science in the 21st century: organism, society, culture. *Psychological Journal of the International University of Nature, Society and Man «Dubna»*. 2012;(3):31–37 (in Russian).
13. Broca P. Remarques sur le siège de la faculté du langage articulé, suivies d'une observation d'aphémie (perte de la parole). *Bulletin et Mémoires de la Société Anatomique de Paris*. 1861;36:330–357 (in French).
14. Jackson J. *Ambidexterity: Or Two-Handedness And Two-Brainedness, An Argument For Natural Development And Rational Education*. London: Kegan Paul; 1905. 258 p.
15. Jackson JH. On the nature of the duality of the brain. *The Medical Press and Circular*. 1874;1:41–44.
16. Vygotsky LS. Psychology and the doctrine of the localization of mental functions. In: *Collected Works*. In 6 Volumes. Vol. 1. Questions of Theory and History of Psychology. Moscow: Pedagogika; 1982. P. 168–174 (in Russian).

17. Luriya AR. The Human Brain and Mental Processes. In 2 Volumes. Vol. 2. Neuropsychological Analysis of Conscious Activity. Moscow: Pedagogika; 1970. 496 p. (in Russian).
18. Dobrokhotova TA, Bragina NN. Functional Asymmetry and Psychopathology of Focal Brain Lesions. Moscow: Meditsina; 1977. 360 p. (in Russian).
19. Simernitskaya EG. Neuropsychological approach to the study of dominance of the hemispheres. In: Dominance of the Hemispheres. Moscow: Moscow University Press; 1978. P. 49–68 (in Russian).
20. Bragina NN, Dobrokhotova TA. Functional Human Asymmetries. Moscow: Meditsina; 1981. 288 p. (in Russian).
21. Kotik BS. Interhemispheric Interaction in Humans. Rostov-on-Don: Rostov University Publishing; 1992. 176 p. (in Russian).
22. Khomskaya ED. On the asymmetry of brain blocks. In: Khomskaya ED, editor. Neuropsychology Today. Moscow: Moscow University Press; 1995. P. 14–27 (in Russian).
23. Vazel' TG. On the nature of hemispheric integrations. *Asymmetry*. 2015;9(4):39–47 (in Russian). DOI: 10.18454/ASY.2015.34.735.
24. Azarova EA, Kotik-Fridgut BS. Interhemispheric Interaction in Humans. Tutorial. Rostov-on-Don: Southern Federal University Publishing; 2021. 158 p. (in Russian).
25. Aleksandrova NS. Visual agnosia and duality of visual recognition. In: Proceedings of the VI All-Russian Conference «Nonlinear Dynamics in Cognitive Research – 2019». 23-27 September 2019, Nizhny Novgorod. Nizhny Novgorod: IAP RAS; 2019. P. 22–26 (in Russian).
26. Aleksandrova NS. Schematic drawing as a cognitive process and why patients with facial agnosia do not recognize faces. In: First National Congress on Cognitive Research, Artificial Intelligence and Neuroinformatics «IX International Conference on Cognitive Science». Collection of Scientific Papers. In 2 Parts. P. 1. 10-16 October, Moscow, Russia. Moscow: NRNY MEPHI; 2021. P. 285–288 (in Russian).
27. Sperry RW. Some general aspects of interhemispheric integration. In: Mountcastle VB, editor. Interhemispheric Relations and Cerebral Dominance. Baltimore: Johns Hopkins Press; 1962. P. 43–49.
28. Zaidel E. Lexical organisation in right hemisphere. In: Buser PA, Rougeul-Buser A, editors. Cerebral Correlates of Conscious Experience. Netherlands: Elsevier; 1978. P. 177–196.
29. Jung-Beeman M, Bowden EM, Haberman J, Frymiare JL, Arambel-Liu S, Greenblatt R, Reber PJ, Kounios J. Neural activity when people solve verbal problems with insight. *PLoS Biol*. 2004;2(4): e97. DOI: 10.1371/journal.pbio.0020097.
30. McGilchrist I. The Master and His Emissary: The Divided Brain and the Making of the Western World. New Haven: Yale University Press; 2009. 608 p.
31. Kok EP. Visual Agnosia. Leningrad: Meditsina; 1967. 224 p. (in Russian).
32. Luriya AR. Foreword. In: Simernitskaya EG. Dominance of the Hemispheres. Moscow: Moscow University Press; 1978. P. 5–6 (in Russian).
33. Vygotsky LS. Thinking and Speaking. Cambridge, Massachusetts: The M.I.T. Press; 1962. 246 p.
34. Alexandrova NS, Antonets VA, Kuzenkov OA, Nuidel IV, Shemagina OV, Yakhno VG. Bilingualism as an unstable state. In: Velichkovsky BM, Balaban PM, Ushakov VL, editors. Advances in Cognitive Research, Artificial Intelligence and Neuroinformatics. Intercognsci 2020. Vol. 1358 of Advances in Intelligent Systems and Computing. Cham: Springer; 2021. P. 359–367. DOI: 10.1007/978-3-030-71637-0\_41.
35. Aleksandrova NS, Alexandrova OA. Impressive (sensory) alalia. *S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*. 2016;116(11):114–120 (in Russian). DOI: 10.17116/jnevro201611611114-120.

36. Dehaene S, Cohen L. Cultural recycling of cortical maps. *Neuron*. 2007;56(2):384–398. DOI: 10.1016/j.neuron.2007.10.004.
37. Dundas EM, Plaut DC, Behrmann M. The joint development of hemispheric lateralization for words and faces. *J. Exp. Psychol. Gen.* 2013;142(2):348–358. DOI: 10.1037/a0029503.
38. Castro-Caldas A, Reis A. Neurobiological substrates of illiteracy. *The Neuroscientist*. 2000;6(6): 475–482. DOI: 10.1177/10738584000600610.
39. Jackson JH. *Selected Works on Aphasia*. St. Petersburg: Niva; 1996. 72 p. (in Russian).
40. Lenneberg EH. *Biologische Grundlagen der Sprache*. Frankfurt am Main: Suhrkamp; 1972. 597 s. (in German).
41. Skvortsov IA, Ermolenko NA. *Development of the Nervous System in Children in Normal and Pathological Conditions*. Moscow: MEDpress-Inform; 2003. 368 p. (in Russian).
42. Aleksandrova NS. Ensuring species-specific forms of behavior – the primary goal of brain plasticity? In: *Proceedings of the Conference «Cognitive Research at the Present Stage»*. 19–22 November 2018, Arkhangelsk. Arkhangelsk: NArFU; 2018. P. 14–17 (in Russian).
43. Severtsov AN. *Evolution and the Psyche*. Moscow: Izdatel'stvo Sabashnikovykh; 1922. 54 p. (in Russian).
44. Kahneman D. *Thinking, Fast and Slow*. New York: Farrar, Straus and Giroux; 2011. 499 p.



*Александрова Нина Шалваевна* — родилась в городе Кашине Калининской области (1951). Окончила Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена. Работает логопедом (1977 – по настоящее время). Научные интересы: когнитивные функции и их нарушения, билингвизм в ракурсе нейролингвистики и нелинейной динамики.

Германия, Берлин, Общество «Языковой мост»

E-mail: [nina.alexandrova@gmx.net](mailto:nina.alexandrova@gmx.net)

ORCID: 0000-0002-8373-8259

AuthorID (eLibrary.Ru): 185301



Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2022. Т. 30, № 3  
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2022;30(3)

Персоналии

DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-3-373-382

## К 75-летию Владимира Григорьевича Яхно

*И. В. Нуйдель*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

E-mail: [nuidel@awp.nnov.ru](mailto:nuidel@awp.nnov.ru)

*Поступила в редакцию 16.11.2021, принята к публикации 10.04.2022,  
опубликована 31.05.2022*

*Для цитирования:* Нуйдель И. В. К 75-летию Владимира Григорьевича Яхно // Известия вузов. ПНД. 2022. Т. 30, № 3. С. 373–382. DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-3-373-382

*Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).*

### ***Поздравляем!***

Уже много лет доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией автоволновых процессов ИПФ РАН Владимир Григорьевич Яхно является членом редакционной коллегии журнала «Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика». В нынешнем 2022 году Владимир Григорьевич отметил свое семидесятипятилетие. Бодрости, активности и энергии, оптимистического настроения и упорства в отстаивании научной тематики ему не занимать. Мы, его ученики и коллеги, сердечно поздравляем его с днем рождения и желаем здоровья, исполнения личных и творческих планов!

Владимир Григорьевич отличается удивительной способностью предвидеть направление научных исследований, которые на уровне идеи могут вызывать определенный скепсис у кого угодно, но только не у Яхно, но в будущем это направление оказывается пионерским и чрезвычайно актуальным. Например, однородные распределенные нейроноподобные системы, исследование коллективной активности



в которых под руководством В. Г. Яхно было начато в восьмидесятые годы, осуществляют по сути операции свертки сигнала с пространственным распределением весов в «рецептивных полях» и нелинейные преобразования, лежащие в основе клеточных нейронных сетей (CNN). А сейчас CNN входят в состав технологий глубокого обучения и систем распознавания. Разработка биологоправдоподобных (нейроморфных) систем распознавания — это одна из ведущих тематик в группе автоволновых процессов.

Владимир Григорьевич является неисправимым оптимистом, считающим, что саморазвитие в научном исследовании и просто в жизни — есть главное. «Жизнь прекрасна!» — на этой ноте заканчиваются все наши семинары и дискуссии.

Редколлегия журнала попросила меня подготовить статью к юбилею Владимира Григорьевича. Она написана в форме интервью.

**— Владимир Григорьевич, когда и где Вы родились? Скажите несколько слов о Вашей семье.**

— Родился я в городе Токмаке в Киргизии 1 января 1947 года. В 1949 году мы переехали в город Арзамас Горьковской области. Мама Евгения Николаевна и папа Григорий Семенович работали учителями, мама потом работала директором школы, а затем заведующей РОНО. Последнее место работы отца — декан физико-математического факультета, заведующий кафедрой астрономии в Арзамасском педагогическом институте. Он был очень творческим человеком: прекрасно пел, декламировал стихи, нарисованные им картины украшают наши дома. В семье четверо детей: старший брат Николай 1942 года рождения и две сестры младше меня Валентина и Ирина.

**— Кто и что оказало влияние на ваш выбор профессии?**

— 1963 год. Николай учился уже в университете на радиофизическом факультете Горьковского госуниверситета (ГГУ). Николай стимулировал меня пойти учиться в ГГУ. Он посоветовал мне уйти в школу рабочей молодежи после 9 класса, поработать год и пойти в университет, сэкономив целый год (в школе в 60-е годы обучались 11 лет). Школу рабочей молодежи я окончил и в 1964 году поступил на радиофизический факультет ГГУ. Этот факультет не вызывал у меня никаких отторжений, интересно было. В 1969 году я его окончил.

Из детства запомнилось мне одно из описаний, что мотивацией для А. Эйнштейна было его представление, как он «летит» за светом. И у меня после чтения научно-популярных статей возникали мысли, о том, что хорошо бы знать, как устроены живые системы, вещество на ядерном уровне и механизмы влияния электромагнитных полей. Но мне казалось нескромным упоминать о стимулирующих образах, как у великих. Сейчас же я понимаю, что такие образы внутренней мотивации, ведущие людей по жизни, наверняка, даются всем. Просто не все о них говорят.

**— Какими задачами Вы занимались, будучи студентом?**

— Когда учился на радиофизическом факультете, не до исследований было, все силы отнимала учеба, хотя на последних курсах занимался интересной тематикой. Курсовую делал под руководством Льва Ароновича Островского. Надо было рассчитать профили пограничного слоя, который формируется при выбросе плазменной струи из сопла. Затем была поставлена задача об аналитическом описании возможного механизма колебаний звезд. Рассматривалась упрощенная модель взаимодействия излучения в слое с частично ионизированным газом. Автоколебания могут возникать, когда поглощение излучения увеличивается при сжатии (под действием гравитации) и поток излучения высвечивается из переизлучающей среды при расширении слоя. Тема моего диплома была «О колебаниях излучающего газа в гравитационном поле».

На последних курсах радиофизического факультета с интересом слушал лекции Михаила Адольфовича Миллера, ходил на его занятия. В конце 60-х он рассказывал нам на занятиях об открытии эффекта самофокусировки при распространении мощного электромагнитного излучения в нелинейной среде. Тогда я впервые услышал про базовые модели, решения которых использовались для объяснения эффекта распада плоской волны на нити света с повышенной энергией.

После окончания университета был принят на работу в НИРФИ. Занимался под руководством Льва Ароновича поиском самомодуляционных нелинейных процессов в воде и ряде других нелинейных сред. Очень благодарен Льву Ароновичу. Он многому меня научил.

**— Кто повлиял на Ваш выбор тематики, начиная с разработки математических моделей в биофизике, до описания когнитивных процессов и разработки симуляторов живых систем?**

— В 1972 году прочитал книгу Что такое математическая биофизика? (Романовский Ю. М., Степанова Н. В., Чернавский Д. С., [1]). Потом она была расширена и переиздана теми же авторами: Математическое моделирование в биофизике (М.: Наука, 1975) [2] и Математическая биофизика (М.: Наука, 1984) [3].

Эти книги оказали сильное воздействие на меня, в них делался упор на базовые модели типа «реакция–диффузия». Когда я уже имел представление, что с помощью базовых моделей можно получить широкий спектр динамических режимов, мне стало интересно, какие базовые модели можно предложить для описания различных процессов и явлений в неравновесных системах, к которым относятся биологические системы.

Тогда проходили школы по нелинейным колебаниям, и меня привлекали к их организации. Была возможность встречаться с участниками этих школ. В частности, встречи с Валентином Израилевичем Кринским из Пушинского Института биофизики АН СССР вдохновили меня на анализ решений нелинейных распределенных систем с помощью базовых моделей типа «реакция–диффузия». В. И. Кринский еще в середине 60-х годов на аксиоматических моделях показывал, что в возбудимых средах могут реализоваться разнообразные пространственно-временные процессы. Как описывать динамические процессы в распределенных сильно релаксационных средах? Тогда мне это было непонятно. Встреча с В. И. Кринским помогла мне, опираясь на результаты Я. Б. Зельдовича, Г. И. Баренблатта, Д. А. Франка-Каменецкого и других, найти пути продвижения в этом направлении. Результаты были опубликованы, например, в статьях Формирование импульсов в возбудимой среде (Островский Л. А., Яхно В. Г., [4]) и Спиральные волны возбуждения в сердечной мышце (Кринский В. И., Яхно В. Г., [5]).

В 1977 году я защитил в ИБФ АН СССР диссертацию «Автоволновые процессы в возбудимых средах». Лев Аронович у меня был руководителем. Термин «автоволновые процессы» уже стал общепринятым. После защиты я теснее познакомился с Юрием Михайловичем Романовским, который совместно с Рэмом Хохловым ввел понятие «автоволновые процессы».

Юрий Михайлович Романовский организовал нас с В. А. Васильевым, и мы втроем сначала написали обзор Автоволновые процессы в распределенных кинетических системах в УФН (Васильев В. А., Романовский Ю. М., Яхно В. Г., [6]), а потом по этому обзору написали книгу *Autowave processes in kinetic systems. Spatial and temporal self-organization in physics, chemistry, biology, and medicine*, [7]. Русский сокращенный вариант вышел в виде книги Автоволновые процессы (Васильев В. А., Романовский Ю. М., Яхно В. Г., [8]).

В 1977 году Мария Тихоновна Грехова пригласила меня работать в ее отделе «Радиофизические методы в медицине». Работа под ее началом оказала огромное влияние на мое развитие как исследователя. Нам была предоставлена свобода в выборе тематик и проведения исследо-

ваний, самостоятельность в принятии решений и ответственность за них, конечно. Ее доверие и страховка позволили молодым еще сотрудникам, В. А. Антонцу, А. Д. Мансфельду и мне, организовать в ИПФ АН СССР публикации сборников работ по интересующим нас тематикам. В автоволновой области интересов были выпущены два сборника: «Автоволновые процессы в системах с диффузией» [9] и «Коллективная динамика возбуждений и структурообразование в биологических тканях» [10].

В СССР тогда был всплеск интереса к таким неравновесным системам, а также техническим и биологическим возбудимым средам, в которых существуют структуры коллективной активности, отражающие функциональные состояния живой системы. Например, распространение волны в сердечной мышце, активность нейронных ансамблей в тканях мозга. То время было очень богатое для моих научных контактов. Например, на Первом биофизическом съезде в 1980 г. я встретился с Галиной Дмитриевной Кузнецовой из Института высшей нервной деятельности. О некоторых результатах ее работ по пространственно-временной активности тканей мозга я знал до этого. Она проводила измерения медленных волн в коре головного мозга, и они проявляли необычное для известных тогда автоволн поведение. Было очень интересно разобраться в причинах этого.

Контакт с Галиной Дмитриевной стимулировал меня на поиск другой базовой модели с нелокальными пространственными связями, чтобы объяснить эффекты, которые она наблюдала в эксперименте для волн распространяющейся депрессии в нейрофизиологии. В нашей команде мы пытались формализовать описание результатов ее экспериментов для малых эпилептиформных припадков (абсансов). Использовали базовые модели, которые включали пути прохождения сигналов по сенсорным входам, таламусу, коре и ретикулярным ядрам таламуса. На элементах этой модели мы получили результаты в начале 90-х годов. Основной мой интерес был связан с тем, чтобы сопоставлять решения базовых моделей с тем валом экспериментальных фактов, которые были мне доступны, а также результаты, обсуждавшиеся на конференциях по самоорганизации в Пущино. Тематика по пространственно-временной активности в неравновесных средах оказалась очень широкой и интересной для изучения разнообразия возможных автоволновых процессов.

**— Тогда уже сложилась Ваше научное направление — разработка базовых моделей описания живых систем?**

— Важно было найти такие базовые модели, с помощью которых можно было бы описать целый спектр динамических процессов в неравновесных средах.

Была разработана модель однородных нейроноподобных систем. Нейроноподобные системы представляют собой слои из взаимодействующих активных элементов (нейронных ансамблей) с пространственно распределенными активирующими и угнетающими (тормозными) воздействиями. Особенности вывода уравнений для усредненной активности нейроноподобных элементов с классическим типом связей впервые приведены в работе Распространение областей повышенной импульсной активности в нейронной сети (Кудряшов А. В., Яхно В. Г., [11]).

Известно существование однородных участков в нервной системе головного мозга. Таким образом, например, организованы периферические отделы анализаторных систем. Представления об однородности могут быть с успехом распространены на стабильные по функциональной организации участки нервной системы, предназначенные для параллельной обработки потока сенсорной информации. При создании однородной модели эти структуры представляются состоящими из плоских слоев, образованных одинаковыми по своим свойствам элементами, которые связаны определенным образом с соседями. Изучение решений этих моделей проводилось вместе с В. Н. Толковым, С. О. Кузнецовым и И. В. Нуйдель.

Первые простейшие идеи, как организовать параллельную обработку сигналов, были выполнены на таких базовых моделях нейроноподобной среды. Стало понятно, что за счет изменений

внутренних параметров модели можно осуществить весь необходимый спектр преобразований входного сигнала. Через эти модели была объяснена бывшая для меня загадкой проблема, как из одинаковых элементов можно построить столь разнообразные системы, которые выполняют множество требуемых операций для распознавания сигналов, приспособления к целям системы, состояниям внешней среды.

— *Какие свои работы, проекты Вы хотели бы особо отметить?*

— В конце 1980-х – начале 1990-х менялись общество и страна, в которой мы жили, вернее выживали, но было интересно. Под влиянием В. А. Антонца мы стали думать, какие наши знания можно реализовать в возможных технических устройствах, как это можно делать. Например, можно ли распознавать человека по форме руки. Версии таких устройств были реализованы, и демонстрация их работоспособности проводилась нами всем заинтересованным лицам.

Тогда к нам приезжал и Р. Хехт-Нильсен, один из пионеров нейрокомпьютерных разработок, и другие американские партнеры, которым мы рассказывали о наших подходах и демонстрационных реализациях. В итоге мы были приглашены в США, где представляли нашу распознающую систему. После было предложено разработать версии аналогичных систем в рамках проекта с BNL (Brookhaven National Laboratory). Это позволило заниматься разработками систем распознавания, ориентированных на коммерческое использование, с 2001 по 2008 год. Энтузиазм был большой. Перспективность нейроподобного подхода (широкий спектр возможных преобразований и настроечных перестроек) была подтверждена, но в «железе» удалось реализовать лишь только элементы этого подхода. Примерно за год у нас сформировался большой коллектив, около двадцати сотрудников. Сделали систему распознавания музыкальных сигналов, отладили систему распознавания дактоотпечатков, систему распознавания руки, систему распознавания лица. Эти алгоритмы были объединены при создании интегральной системы: решения по потокам сигналов разных модальностей объединяются для принятия системой более точного решения, чем по какой-либо одной из модальностей.

Фактически к 2008 году мы сделали такую систему и передали ее в BNL. Далее нам следовало самим коммерциализировать разработку или передавать права на нее заинтересованным лицам. Модификация коммерческой разработки и продвижение ее на рынок относится к разряду весьма специфичной деятельности. Оценив свои ресурсы, участники разработки не стали интенсифицировать усилия в этом направлении, запатентовав результаты.

Более приоритетной представлялась дальнейшая модификация разработанных моделей распознающих систем. Например, тех, с помощью которых можно было бы объяснить разные психологические реакции поведения живых систем. Надо сказать, что одним из мотивирующих факторов, для меня, во всяком случае, было то, что к концу 90-х годов было много фактов, свидетельствующих о том, что одним из важных признаков живой системы является ее способность предсказывать входной сигнал и предварительно настраиваться на него. Это значит, что в технической системе должна быть возможность не только кодирования сигнала, но и восстановления имитации входного образа. Возникает множество режимов настройки, повышающих точность распознавания, улучшающих процедуру восприятия этих сигналов. В азарте мы запатентовали эти идеи.

Видно, что развитие таких модельных реализаций можно превратить в систему, в которой возможно переключение между «более простыми» моделями. Такой путь вполне реалистичен при разработке версий симуляторов живых систем. Качественно было понятно, как управлять модельной системой и настраивать соответствующие технические реализации на множество возможных режимов, которые наблюдаются в биологической системе. Такой подход принято называть модельным.

Мне кажется важным выделить, по крайней мере, три типа модельных нейросетей:

- нейросети, настраиваемые на большом объеме данных;
- базовые нейроподобные модели, когда параметры можно настроить на основе опыта разработчика (его знаниях о выборе конкретных решений для сопоставления с экспериментом);
- базовые модели с использованием функций приспособленности, когда более точное сопоставление можно делать при рассмотрении новых гипотез, связанных с мотивациями и целевыми функциями систем.

Если реализована модель типа ветвящихся структур, аналогом которой являются модели глубокого нейронного обучения (Deep Learning Model), то будут точно распознаваться сигналы, на которые обучена система. Но проблемой остается большой объем данных для обучения. В нашей команде Александр Тельных увлекся и разработал очень интересные версии таких систем.

В подходе на основе базовых моделей ситуация другая. Базовые модели строятся на основе экспериментальных данных, которым обучается разработчик-исследователь в течение своей профессиональной деятельности. Он сам выбирает модель, которая соответствует объекту изучения, основываясь на своем личном опыте. Он выбирает те динамические режимы, которые соответствуют физическим условиям и его представлениям о здравом смысле. При этом формируется еще и язык описания таких систем. Такой подход широко распространен при описании физических объектов. Самое трудное при описании живых систем заключается в том, что большинство параметров изучаемой системы либо просто недоступно нашим измерениям, либо об этих параметрах нам (пока?) ничего не известно. Вот тут-то на первый план и выступают соображения здравого смысла, что фактически тесно связано с опытом разработчика. Именно на этот факт обращал внимание слушателей Дмитрий Сергеевич Чернавский на наших конференциях «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях»: «...самое важное в нашей работе — разработка новых адекватных базовых моделей...».

Дополнительным подспорьем при изучении живых объектов могут служить гипотезы о мотивациях и целях изучаемых живых объектов. Разработчик вводит дополнительные уравнения и условия, соответствующие его представлениям о целях и мотивациях изучаемой системы, и меняя параметры созданной им (разработчиком) функции приспособленности, добивается наилучших совпадений полученных решений базовой модели с данными даже единичного эксперимента (об этом я узнал из работ Олега Анатольевича Кузенкова). Получается, что введение функции приспособленности позволяет активировать знания разработчика для объяснения данных даже единичного эксперимента с помощью выбора подходящей базовой модели.

**— Почему вы все-таки делаете такой упор на разработку базовых моделей при описании живых систем?**

— Лаборатория автоволновых процессов была организована в 1999 году. Это удачное название. Все, чем наша команда занималась до этого и делает до сих пор, полностью подпадает под это определение. Автоволновые процессы это коллективная динамика активных элементов, в которых внутренняя сложность механизмов управления определяющими переменными (энергетическими ресурсами, обработкой воспринимаемых ими сигналов и т. п.) может быть произвольной. Вижу обширнейшие области исследований в этом направлении. Адекватные модели коллективной динамики когнитивных элементов могут описывать и социальные процессы, и многие естественно-научные процессы. На их основе можно строить технические системы, которые будут настраиваться на выбранные ими целевые функции, учитывать состояние окружающей среды. Однако для осмысленных действий желательно иметь инструментарий из упрощенных моделей. Фактически на их основе создается язык описания сложных систем. Именно такой язык делает понятным путь решения сложных задач. С его помощью формируются образы, отражающие качественные особенности поведения элементов действительности. Формализованное описание

можно строить, получая ответы на вопросы, как должен работать один элемент, и как он обучается в зависимости от внешнего сигнала и своего окружения, как изменяется характер обучения, если учитывать взаимодействие между когнитивными агентами. Агенты по-разному обучены, имеют разные целевые функции, разное энергетическое обеспечение, что, естественно, приводит к большому разнообразию. При этом целевым функциям и состояниям окружающей среды отводится роль ограничителей разнообразия и выбора лишь «предпочтительного» режима поведения. Если мы хотим адекватно отражать реальную действительность, мы должны учитывать эти факторы, которые влияют на коллективную динамику элементов.

Например, в 1995 году мне повезло быть на Окинаве на конференции, включавшей тематику по разработке электронных устройств на новых принципах. Там, Роберт Хехт-Нильсен в своем докладе рассказал о режимах прерывания информационных потоков в мозговых структурах. Он использовал ту же самую схему «сенсорный сигнал–таламус–кора–ретикулярные ядра таламуса», которая обсуждалась с Г. Д. Кузнецовой для моделирования абсансов. При этом Р. Хехт-Нильсен рассматривал режимы стробирования сенсорных сигналов при нормальном режиме обработки информации. Такое расширение наших знаний о возможностях базовой модели таламокортикальных модулей из распределенных нейроноподобных сред позволило в совместной работе с И. Нуйдель, П. Хурлаповым, А. Ивановым, М. Соколовым провести расчеты режимов выделения искомым признаков (линии заданных направлений, объекты заданных размеров и т. п.) в режимах стробирования (то есть продемонстрировать существование нормальных режимов функционирования), а при сдвигах значений параметров системы увидеть появление патологических режимов самовозбуждения. По моим понятиям, это — вполне наглядная версия симулятора элемента живой системы. Эти работы в нашей команде проводились с середины 90-х годов, и на протяжении 2000-х годов. Отмечу, что продолжение демонстрационных расчетов для таких модулей из распределенных подсистем остаются актуальными и сейчас.

— *Как возникла идея конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях»?*

— Мы разрабатывали работающие прототипы систем распознавания, но в заинтересованном нижегородском сообществе продолжали обсуждать идеи Петра Кузьмича Анохина, результаты выдающихся нейрофизиологов и наших земляков Александра Васильевича Зевеке и Виталия Ивановича Щербакова. Вольно или невольно с помощью базовых моделей когнитивных систем строили гипотезы о природе сознательного, бессознательного и интуитивного. Происходило осознание процесса, как с помощью моделей получать динамические режимы, соответствующие конкретным нейрофизиологическим либо психологическим экспериментальным данным.

Этот интерес означает и продвижение к разработкам симуляторов живых систем. В меру наших сил мы участвовали в конференциях по когнитивной науке (Казань (2004), Санкт-Петербург (2006), Москва (2008), и т. д.), которые проводятся раз в два года Межрегиональной ассоциацией когнитивных исследований (МАКИ). Тогда у меня, С. А. Полевой, С. Б. Парина, В. А. Антонца, И. В. Нуйдель сложилось впечатление, что мы вполне можем предлагать схемы систем, симулирующих процессы в живых системах. Мы обсуждали реальность выполнения работ по формализованному описанию режимов функционирования живых систем. Мы понимали необходимость организации более широких обсуждений с 2007 года.

В 2009 г. подготовили и провели первую конференцию «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях» в Нижнем Новгороде. Мы проводим эти конференции по нечетным годам, начиная с 2009 года, и считаем их сопутствующими конференциям по когнитивной науке, проходящим в четные годы. Огромная благодарность дирекции ИПФ РАН, которая всячески помогает нам в этом деле. В прошлом 2021 году в Нижнем, в ИПФ РАН прошла седьмая по счету конференция. Мне кажется, проведение этих конференций помогает, с одной стороны,



лучше осознать возможности нижегородских разработчиков, а с другой стороны, общение с лучшими российскими исследователями, несомненно, всем приносит пользу. Видна необходимость функционирования такой площадки для практического тестирования общего научного языка при взаимопонимании между специалистами пока еще из разных узких областей науки. Плодотворность таких интереснейших встреч и обсуждений подтверждается результатами обмена мнениями с коллегами и участниками конференций.

*— Какие у Вас планы на будущее?*

— Живые системы, исходя из моего понимания, формулируют свои планы на основе неудач своего прошлого опыта (для меня это — отсутствие внятного ответа в выбранной области исследований) и рассмотрения возможностей получения новых знаний в этих областях. Меня радует, что многие ранее непонятные для меня природные процессы сейчас имеют свои версии описаний. Однако, как все знают, чем больше знаешь, тем обширнее границы непознанного. Сказать в этом интервью кратко о возможных направлениях исследований, обсуждаемых в нашей команде, будет выглядеть скромно. Однако о них можно прочитать, в частности, в статьях [12–14].

Особо отмечу, что мучившая меня многие десятилетия проблема о механизмах «активации» воды нашла весьма разумное объяснение в серии работ под руководством Татьяны Анатольевны Яхно. Оказалось, что водные растворы и при нормальных условиях представляют собой дисперсную систему, а процессы агрегации — дезагрегации дисперсной фазы отражаются в похожих изменениях физических параметров раствора при разных внешних воздействиях. Правда, осталась проблема преодоления стереотипов у ряда «классически» воспитанных исследователей.

Искренне благодарю Вас за интервью! Чем больше живешь, тем больше интересных задач. Как учат нас мудрые люди, любая живая система имеет семилетние этапы развития. Но с возрастом энергия кончается, и система начинает вести себя более спокойно. Как пишет Ошо (Багван Шри Раджниш), на этапе после 70-ти лет люди (усредненно) уходят от суеты, вызванной социальными процессами. Они уже накопили свой опыт жизни, понимают преимущества детского восприятия жизненных событий и готовятся к переходу в другую фазу существования. Как протекает эта фаза развития живых систем, я с интересом сейчас и наблюдаю.

## Список литературы

1. Романовский Ю. М., Степанова Н. В., Чернавский Д. С. Что такое математическая биофизика? М.: Просвещение, 1971. 136 с.
2. Романовский Ю. М., Степанова Н. В., Чернавский Д. С. Математическое моделирование в биофизике. М.: Наука, 1975. 344 с.
3. Романовский Ю. М., Степанова Н. В., Чернавский Д. С. Математическая биофизика. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1984. 304 с.
4. Островский Л. А., Яхно В. Г. Формирование импульсов в возбудимой среде // Биофизика. 1975. Т. 20, № 3. С. 489–493.
5. Кринский В. И., Яхно В. Г. Спиральные волны возбуждения в сердечной мышце // В кн.: Нелинейные волны / Отв. ред. М. И. Рабинович. Горький: ИПФ АН СССР, 1980. С. 200–214.
6. Васильев В. А., Романовский Ю. М., Яхно В. Г. Автоволновые процессы в распределенных кинетических системах // УФН. 1979. Т. 128, № 4. С. 625–666.  
DOI: 10.3367/UFNr.0128.197908c.0625.
7. Vasiliev V. A., Romanovskii Y. M., Chernavskii D. S., Yakhno V. G. Autowave Processes in Kinetic Systems: Spatial and Temporal Self-Organisation in Physics, Chemistry, Biology, and Medicine. Dordrecht: Springer, 1987. 262 p. DOI: 10.1007/978-94-009-3751-2.
8. Васильев В. А., Романовский Ю. М., Яхно В. Г. Автоволновые процессы. М.: Наука, 1987. 240 с.
9. Автоволновые процессы в системах с диффузией / Под ред. М. Т. Греховой. Горький: ИПФ АН СССР, 1981. 288 с.
10. Коллективная динамика возбуждений и структурообразование в биологических тканях / Под ред. В. Г. Яхно. Горький: ИПФ АН СССР, 1988. 225 с.
11. Кудряшов А. В., Яхно В. Г. Распространение областей повышенной импульсной активности в нейронной сети // Динамика биологических систем. 1978. Т. 2. С. 45–59.
12. Яхно В. Г., Макаренко Н. Г. Поможет ли нам создание «Цифрового двойника человека» лучше понимать друг друга? // В кн.: Подходы к моделированию мышления / Под ред. В. Г. Редько. Глава 6. М.: ЛЕНАНД, 2014. С. 169–202.
13. Yakhno V. G., Parin S. B., Polevaya S. A., Nuidel I. V., Shemagina O. V. Who says formalized models are appropriate for describing living systems? // In: Kryzhanovsky B., Dunin-Barkowski W., Redko V., Tiumentsev Y. (eds) Advances in Neural Computation, Machine Learning, and Cognitive Research IV. NEUROINFORMATICS 2020. Vol. 925 of Studies in Computational Intelligence. Cham: Springer, 2021. P. 10–33. DOI: 10.1007/978-3-030-60577-3\_2.
14. Alexandrova N. S., Antonets V. A., Kuzenkov O. A., Nuidel I. V., Shemagina O. V., Yakhno V. G. Bilingualism as an unstable state // In: Velichkovsky B. M., Balaban P. M., Ushakov V. L. (eds) Advances in Cognitive Research, Artificial Intelligence and Neuroinformatics. Vol. 1358 of Intercognsci 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing. Cham: Springer, 2021. P. 359–367. DOI: 10.1007/978-3-030-71637-0\_41.

## References

1. Romanovskii YM, Stepanova NV, Chernavskii DS. What is Mathematical Biophysics? Moscow: Prosveshchenie; 1971. 136 p. (in Russian).
2. Romanovskii YM, Stepanova NV, Chernavskii DS. Mathematical Modeling in Biophysics. Moscow: Nauka; 1975. 344 p. (in Russian).
3. Romanovskii YM, Stepanova NV, Chernavskii DS. Mathematical Biophysics. Moscow: Nauka, Glavnaya Redaktsiya Fiziko-Matematicheskoy Literatyry; 1984. 304 p. (in Russian).

4. Ostrovskii LA, Yakhno VG. Formation of impulses in an excitable medium. *Biophysics*. 1975;20(3): 489–493 (in Russian).
5. Krinskii VI, Yakhno VG. Spiral waves of excitation in the heart muscle. In: Rabinovich MI, editor. *Nonlinear Waves*. Gorky: Institute of Applied Physics of the Academy of Sciences of the USSR; 1980. P. 200–214 (in Russian).
6. Vasil'ev VA, Romanovskii YM, Yakhno VG. Autowave processes in distributed kinetic systems. *Sov. Phys. Usp.* 1979;22(8):615–639. DOI: 10.1070/PU1979v022n08ABEH005591.
7. Vasiliev VA, Romanovskii YM, Chernavskii DC, Yakhno VG. *Autowave Processes in Kinetic Systems: Spatial and Temporal Self-Organisation in Physics, Chemistry, Biology, and Medicine*. Dordrecht: Springer; 1987. 262 p. DOI: 10.1007/978-94-009-3751-2.
8. Vasiliev VA, Romanovskii YM, Yakhno VG. *Autowave Processes*. Moscow: Nauka; 1987. 240 p. (in Russian).
9. Grekhova MT, editor. *Autowave Processes in Systems With Diffusion*. Gorky: Institute of Applied Physics of the Academy of Sciences of the USSR; 1981. 288 p. (in Russian).
10. Yakhno VG, editor. *Collective Dynamics of Excitations and Structure Formation in Biological Tissues*. Gorky: Institute of Applied Physics of the Academy of Sciences of the USSR; 1988. 225 p. (in Russian).
11. Kudryashov AV, Yakhno VG. Propagation of areas of increased impulse activity in a neural network. *Dynamics of Biological Systems*. 1978;2:45–59 (in Russian).
12. Yakhno VG, Makarenko NG. Will the creation of the «digital human twin» help us better understand each other? In: Red'ko VG, editor. *Approaches to the Modeling of Thinking*. Chapter 6. Moscow: LENAND; 2014. P. 169–202 (in Russian).
13. Yakhno VG, Parin SB, Polevaya SA, Nuidel IV, Shemagina OV. Who says formalized models are appropriate for describing living systems? In: Kryzhanovsky B, Dunin-Barkowski W, Redko V, Tiumentsev Y, editors. *Advances in Neural Computation, Machine Learning, and Cognitive Research IV. NEUROINFORMATICS 2020*. Vol. 925 of *Studies in Computational Intelligence*. Cham: Springer; 2021. P. 10–33. DOI: 10.1007/978-3-030-60577-3\_2.
14. Alexandrova NS, Antonets VA, Kuzenkov OA, Nuidel IV, Shemagina OV, Yakhno VG. Bilingualism as an unstable state. In: Velichkovsky BM, Balaban PM, Ushakov VL, editors. *Advances in Cognitive Research, Artificial Intelligence and Neuroinformatics*. Vol. 1358 of *Intercognsci 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Cham: Springer; 2021. P. 359–367. DOI: 10.1007/978-3-030-71637-0\_41.

## EDITOR-IN-CHIEF

*Yu. V. Gulyaev*, Ph.D., Professor, Member of the RAS,  
Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS, Moscow

## DEPUTY EDITORS

*I. V. Sysoev*, Ph.D., Professor Saratov State University, Saratov  
*A. N. Chumachenko*, Ph.D., Professor, Saratov State University, Saratov

## EDITORIAL BOARD

*V. M. Anikin*, Ph.D., Professor, Saratov State University, Saratov  
*B. P. Bezruchko*, Ph.D., Professor, Saratov State University, Saratov  
*S. V. Gonchenko*, Ph.D., Professor, Lobachevsky State University of Nizhny  
Novgorod, Nizhny Novgorod  
*N. S. Ginzburg*, Ph.D., Professor, Corresponding Member of the RAS, Institute of Applied  
Physics of the RAS, Nizhny Novgorod  
*A. S. Dmitriev*, Ph.D., Professor, Institute of Radioengineering and Electronics  
of the RAS, Moscow  
*S. A. Kashchenko*, Ph.D., Professor, P.G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl  
*P. S. Landa*, Ph.D., Professor, Moscow State University, Moscow  
*G. G. Malinetskii*, Ph.D., Professor, Institute of Applied Mathematics of the RAS, Moscow  
*V. V. Matrosov*, Ph.D., Professor, Lobachevsky State University of Nizhny  
Novgorod, Nizhny Novgorod  
*V. I. Nekorkin*, Ph.D., Professor, Institute of Applied Physics of the RAS,  
Nizhny Novgorod  
*A. V. Porubov*, Ph.D., Professor, Institute for Problems in Mechanical Engineering  
of the RAS, St. Petersburg  
*Yu. M. Romanovsky*, Ph.D., Professor, Moscow State University, Moscow  
*V. V. Tuchin*, Ph.D., Professor, Corresponding Member of the RAS,  
Saratov State University, Saratov  
*A. M. Feigin*, Ph.D., Professor, Institute of Applied Physics of the RAS, Nizhny Novgorod  
*V. A. Tsarev*, Ph.D., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov  
*M. V. Shitikova*, Ph.D., Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh  
*V. G. Yakhno*, Ph.D., Professor, Institute of Applied Physics of the RAS, Nizhny Novgorod  
*S. Boccaletti*, Ph.D., Senior Researcher of Institute for Complex Systems  
of the National Research Council (CNR), Sesto Fiorentino, Italy  
*A. V. Kraskov*, Ph.D., Principal Investigator, UCL Institute of Neurology,  
Sobell Department, London, UK  
*N. V. Kuznetsov*, Visiting Professor, University of Jyväskylä, Finland  
*G. van Luijtelaar*, Professor, Radboud University Nijmegen, Nijmegen, The Netherlands  
*A. K. Lüttjohann*, Ph.D., Postdoctoral researcher, Institut für Physiologie I, Westfälische  
Wilhelms-Universität, Münster, Germany  
*A. B. Neiman*, Dr. of Sciences, Physics and Mathematics, Associate professor  
of Department of Physics and Astronomy, Ohio University, USA  
*A. S. Pikovsky*, Dr. rer. Nat. habil., Professor, Universität Potsdam, Germany  
*A. N. Pisarchik*, Ph.D., Professor, Universidad Politecnica de Madrid,  
Centre for Biomedical Technology, Spain  
*V. A. Vakorin*, Ph.D., Data Scientist, NeuroInformatics and NeuroAnalytics  
Lead, ImageTech Lab, Simon Fraser University, Vancouver, Canada

«Жизнь прекрасна!»

хорошо бы знать,  
как устроены живые  
системы. Это искусство  
находить сходства и  
механизмы действия  
электрических и магнитных  
полей.

«Жизнь прекрасна!»



**75 лет Владимиру Григорьевичу Яно  
(1 января 1947 года)**

На передней обложке использована эмблема Межрегиональной ассоциации когнитивных исследований.

ISSN 0869-6632



9 770869 663203 >