

ISSN 2686-679X

ВЕСТНИК РГУ

Серия
«Информатика.
Информационная безопасность.
Математика»

Научный журнал

RSUH/RGGU BULLETIN

“Information Science.
Information Security. Mathematics”
Series

Academic Journal

Основан в 2018 г.
Founded in 2018

2
2021

RSUH/RGGU BULLETIN. "Information Science. Information Security. Mathematics" Series Academic Journal

There are 4 issues of the printed version of the journal a year.

Founder and Publisher
Russian State University for the Humanities (RSUH)

RSUH/RGGU BULLETIN. "Information Science. Information Security. Mathematics" series is included: in the Russian Science Citation Index; in the List of leading scientific journals and other editions for publishing PhD research findings peer-reviewed publications fall within the following research area:

20.00.00 Informatics

81.93.29 Information security, data protection

27.00.00 Mathematics

Objectives and areas of research

RSUH/RGGU BULLETIN. "Information Science. Information Security. Mathematics" series publishes the results of research by scientists from RSUH and other universities and other Russian and foreign academic institutions. The areas covered by contributions include theoretical and applied computer science, up-to-date IT, means and technologies of information protection and information security as well as the issues of theoretical and applied mathematics including analytical and imitation models of different processes and objects. Special emphasis is put on articles and reviews covering research in indicated directions in the areas of social and humanitarian problems and also issues of personnel training for these directions.

RSUH/RGGU BULLETIN. "Information Science. Information Security. Mathematics" series is registered by Federal Service for Supervision of Communications Information Technology and Mass Media. 25.05.2018, reg. No. FS77-72977

Editorial staff office: 6, Miusskaya sq., Moscow, Russia, 125047

tel: +7 (916) 250-90-85

e-mail: adkozlov@mail.ru

ВЕСТНИК РГГУ. Серия «Информатика. Информационная безопасность. Математика»

Научный журнал

Выходит 4 номера печатной версии журнала в год.

Учредитель и издатель – Российский государственный гуманитарный университет (РГГУ)

ВЕСТНИК РГГУ, серия «Информатика. Информационная безопасность. Математика», включен: в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ); в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим научным специальностям и соответствующим им отраслям науки:

20.00.00 Информатика

81.93.29 Информационная безопасность, защита информации

27.00.00 Математика

Цели и область

В журнале «Вестник РГГУ», серия «Информатика. Информационная безопасность. Математика», публикуются результаты научных исследований ученых и специалистов РГГУ, а также других университетов и научных учреждений России и зарубежных стран. Направления публикаций включают теоретическую и прикладную информатику, современные информационные технологии, методы, средства и технологии защиты информации и обеспечения информационной безопасности, а также проблемы теоретической и прикладной математики, включая разработку аналитических и имитационных моделей процессов и объектов различной природы. Особое внимание уделяется статьям и обзорам, посвященным исследованиям по указанным направлениям в области социальных и гуманитарных проблем, а также вопросам подготовки кадров по соответствующим специальностям для данных направлений.

ВЕСТНИК РГГУ, серия «Информатика. Информационная безопасность. Математика», зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций 25.05.2018 г., регистрационный номер ПИ № ФС77-72977.

Адрес редакции: 125047, Россия, Москва, Миусская пл., 6

Тел: +7 (916) 250-90-85

электронный адрес: adkozlov@mail.ru

Founder and Publisher

Russian State University for the Humanities (RSUH)

Editor-in-chief

V.V. Arutyunov, Dr. of Sci. (Engineering), Russian State University for the Humanities (RSUH), Moscow, Russian Federation

Editorial Board

V.K. Zharov, Dr. of Sci. (Pedagogy), professor, Russian State University for the Humanities (RSUH), Moscow, Russian Federation (*deputy editor-in-chief*)

A.D. Kozlov, Cand. of Sci. (Computer Science), associate professor, Russian State University for the Humanities (RSUH), Moscow, Russian Federation (*executive secretary*)

Sh.A. Alimov, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), professor, academician, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Republic of Uzbekistan

M.N. Aripov, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), professor, National University of Uzbekistan, Tashkent, Republic of Uzbekistan

G.S. Ivanova, Dr. of Sci. (Computer Science), professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

V.M. Maximov, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), professor, Russian State University for the Humanities (RSUH), Moscow, Russian Federation

I.Yu. Ozhigov, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), professor, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

E.A. Primenko, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), professor, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

S.M. Sokolov, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), professor, Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow, Russian Federation

Sh.K. Formanov, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), professor, academician, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Republic of Uzbekistan

V.A. Tsvetkova, Dr. of Sci. (Engineering), professor, Library for Natural Sciences of the RAS, Moscow, Russian Federation

Executive editor:

A.D. Kozlov, Cand. of Sci. (Computer Science), associate professor (RSUH)

Учредитель и издатель

Российский государственный гуманитарный университет (РГГУ)

Главный редактор

В.В. Арутюнов, доктор технических наук, Российский государственный гуманитарный университет (РГГУ), Москва, Российская Федерация

Редакционная коллегия

В.К. Жаров, доктор педагогических наук, профессор, Российский государственный гуманитарный университет (РГГУ), Москва, Российская Федерация (*заместитель главного редактора*)

А.Д. Козлов, кандидат технических наук, доцент, Российский государственный гуманитарный университет (РГГУ), Москва, Российская Федерация (*ответственный секретарь*)

Ш.А. Алимов, доктор физико-математических наук, профессор, академик Академии наук Узбекистана, Ташкент, Республика Узбекистан

М.М. Арипов, доктор физико-математических наук, профессор, Национальный университет Узбекистана, Ташкент, Республика Узбекистан

Г.С. Иванова, доктор технических наук, профессор, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

В.М. Максимов, доктор физико-математических наук, профессор, Российский государственный гуманитарный университет (РГГУ), Москва, Российская Федерация

И.Ю. Ожигов, доктор физико-математических наук, профессор, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ), Москва, Российская Федерация

Э.А. Применко, кандидат физико-математических наук, профессор, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ), Москва, Российская Федерация

С.М. Соколов, доктор физико-математических наук, профессор, Институт прикладной математики им. М.И. Келдыша РАН, Москва, Российская Федерация

Ш.К. Форманов, доктор физико-математических наук, профессор, академик Академии наук Узбекистана, Ташкент, Республика Узбекистан

В.А. Цветкова, доктор технических наук, профессор, Библиотека по естественным наукам РАН, Москва, Российская Федерация

Ответственный за выпуск:

А.Д. Козлов, кандидат технических наук, доцент (РГГУ)

CONTENTS

Information Science

- Valerii V. Arutyunov, Nataliya V. Grishina*
Basic regional scientific clusters of Russia 8
- Anastasiya N. Zhukova, Marina S. Shapovalova*
Traffic flows modeling with inaccessible for driving road sections 19

Information Security

- Vladislav O. Blagov, Dmitry A. Mityushin,
Gennadiy Yu. Puchkov, Elena V. Remizova*
The main directions of creating an information system
for personal identification based on phenotypic signs of a person 37

Mathematics

- Sergey A. Obukhov, Valery P. Stepanov, Igor V. Rudakov*
Mathematical model of brain-computer interface based
on the analysis of P300 event related potentials 48

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика

- Валерий В. Арутюнов, Наталия В. Гришина*
Базовые региональные научные кластеры России 8
- Анастасия Н. Жукова, Марина С. Шаповалова*
Моделирование транспортных потоков с участками дороги,
недоступными для проезда 19

Информационная безопасность

- Владислав О. Благов, Дмитрий А. Митюшин,
Геннадий Ю. Пучков, Елена В. Ремизова*
Основные направления создания информационной системы
для идентификации личности по фенотипическим
признакам человека 37

Математика

- Сергей А. Обухов, Валерий П. Степанов, Игорь В. Рудаков*
Математическая модель нейрокомпьютерного интерфейса
на основе анализа вызванных потенциалов Р300 48

Базовые региональные научные кластеры России

Валерий В. Арутюнов

*Российский государственный гуманитарный университет,
Москва, Россия, warut698@yandex.ru*

Наталья В. Гришина

*Российский государственный гуманитарный университет,
Москва, Россия, gmat@rambler.ru*

Аннотация. В работе анализируется научная деятельность российских организаций в трех региональных научных кластерах России (Московском, Санкт-Петербургском и кластере Московской области), результаты которой в ряде отраслей наук отличаются высокими значениями индексов востребованности, цитируемости и Хирша, полученными на основе наукометрических показателей (публикационной активности, цитируемости, индекса Хирша) из базы данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ). При этом в Московском кластере выявлены 11 таких естественнонаучных отраслей (химические технологии и промышленность, геодезия и картография, биология, физика, связь, химия, биотехнология, астрономия, электротехника, электроника и радиотехника, география) и соответствующие организации в каждой из указанных отраслей наук, в Санкт-Петербургском – шесть (электротехника, физика, геология, электроника и радиотехника, геодезия и картография, механика), в кластере Московской области – пять (физика, приборостроение, химия, химические технологии и промышленность, ядерная техника).

В тройку лидеров по индексу востребованности итогов исследований в Московском кластере входят Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова (отрасль науки – химические технологии и промышленность), Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (геодезия и картография) и Институт микропроизводства (биология). В кластере Московской области лидируют Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН (физика), Объединенный институт ядерных исследований (приборостроение)

Арутюнов В.В., Гришина Н.В., 2021

и Институт инженерной иммунологии (химия). В число лидеров в Санкт-Петербургском кластере входят Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (электротехника), Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (физика) и ВНИИ геологии и минеральных ресурсов мирового океана им. акад. И.С. Грамберга (геология).

Ключевые слова: естественнонаучные отрасли наук, цитируемость, научный кластер, публикационная активность, результативность научной деятельности, востребованность итогов исследований

Для цитирования: Арutyunov В.В., Гришина Н.В. Базовые региональные научные кластеры России // Вестник РГГУ. Серия «Информатика. Информационная безопасность. Математика». 2021. № 2. С. 8–18. DOI: 10.28995/2686-679X-2021-2-8-18

Basic regional scientific clusters of Russia

Valerii V. Arutyunov

Russian State University for the Humanities, Moscow, Russia
warut698@yandex.ru

Nataliya V. Grishina

Russian State University for the Humanities, Moscow, Russia
grnat@rambler.ru

Abstract. The paper analyzes the scientific activity of Russian organizations in the three regional scientific clusters of Russia (Moscow, St. Petersburg and the cluster of the Moscow region), the results of which in a number of branches of science are characterized by high values of the demand, citation and Hirsch indices obtained on the basis of scientometric indicators (publication activity, citation, Hirsch index) from the database of the Russian Science Citation Index (RSCI). At the same time, 11 such natural science branches were identified in the Moscow cluster (chemical technologies and industry, geodesy and cartography, biology, physics, communications, chemistry, biotechnology, astronomy, electrical engineering, electronics and radio engineering, geography) and corresponding organizations in each of these branches of science, in St. Petersburg-six (electrical engineering, physics, geology, electronics and radio engineering, geodesy and cartography, mechanics), in the Moscow region cluster – five (physics, instrumentation, chemistry, chemical technologies and industry, nuclear engineering).

The three leaders in the index of demand for research results in the Moscow cluster include the L.Y. Karpov Research Institute of Physics and Chemistry

(branch of science – chemical technologies and industry), the Research and Design Institute of Information, Automation and Communication in Railway Transport (geodesy and cartography) and the Institute of Micro-Production (biology). The Moscow Region cluster is dominated by the Institute of Micro-electronics Technology and High-Purity Materials of the Russian Academy of Sciences (physics), the Joint Institute for Nuclear Research (instrumentation) and the Institute of Engineering Immunology (chemistry). Among the leaders in the St. Petersburg cluster are the M.A. Bonch-Bruевич St. Petersburg State University of Telecommunications (electrical engineering), Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (physics) and I.S. Gramberg Research Institute of Geology and Mineral Resources of the World Ocean (geology).

Keywords: natural science branches of sciences, citation, scientific cluster, publication activity, effectiveness of scientific activity, relevance of research results

For citation: Arutyunov, V.V. and Grishina, N.V. (2021), “Basic regional scientific clusters of Russia”, *RSUH/RGGU Bulletin. “Information Science. Information Security. Mathematics” Series*, 2021, no. 2, pp. 8–18, DOI: 10.28995/2686-679X-2021-2-8-18

Введение

В XXI в. в мире и России все в большей степени оценивают итоги работы ученых и специалистов в различных сферах науки и техники с учетом конкретных количественных результатов, базирующихся в том числе на наукометрических показателях их научной деятельности (публикационной активности I_p , цитируемости I_c и индексе Хирша I_h) [Арутюнов 2018, Grinev 2019].

Эти показатели в России с начала второго десятилетия XXI в. активно используются на основе ряда нормативно-правовых документов для оценки результатов научной деятельности вузов и научных организаций страны. При этом в наши дни значительный интерес представляют уже не только опубликованные итоги исследований, но и востребованность I_v научным сообществом и специалистами результатов научной деятельности ученых по различным направлениям наук, определяемая соотношением I_c / I_p . Примеры использования указанных индексов для оценки эффективности социотехнических систем и определения рейтинга цитируемости российских ученых по версии РИНЦ приводятся в ряде работ, например [Арутюнов 2014, Арутюнов 2015, Grinev 2019] и др.

В 2018 г. исследователями РГГУ была поставлена и в последующие годы выполнена задача [Арутюнов, Гришина 2018]: про-

анализировать публикационную активность российских ученых и специалистов, а также востребованность итогов их работ в 23 естественнонаучных отраслях (*математика, физика, химия, связь, информатика, кибернетика, автоматика и вычислительная техника, биология, биотехнология, механика, электроника и радиотехника, энергетика, электротехника, приборостроение, астрономия, география, геодезия и картография, геология, горное дело, геофизика, ядерная техника, химическая технология и химическая промышленность, общие и комплексные проблемы естественных и точных наук*) с целью выявления на основе наукометрических показателей организаций и персоналий – лидеров в соответствующей отрасли знаний (в том числе с учетом территориального расположения организаций, выполняющих исследования в соответствующих отраслях наук).

Ниже анализируются некоторые итоги этого выполненного в 2018–2020 гг. исследования на основе базы данных РИНЦ (Российского индекса научного цитирования) [РИНЦ 2018], дифференцированные по территориальным научным кластерам России.

Наукометрические показатели базовых территориальных кластеров России

В результате проведенного трехлетнего исследования всего на территории России было выявлено восемь региональных научных кластеров (организации, входящие в эти кластеры, отличались высокими показателями индекса востребованности итогов работ, а также цитируемости и Хирша). Ниже анализируются организации, входящие в три базовых научных кластера (Московский, Санкт-Петербургский и кластер Московской области); при этом учитывалось, чтобы индекс востребованности итогов исследований организаций, входящих в эти кластеры, был не менее 30.

Московский научный кластер организаций, отличающийся высокими значениями индексов востребованности I_v , представлен на рис. 1. На этом рисунке показаны выполняющие работы по различным направлениям научных исследований московские организации, имеющие также высокие показатели цитируемости I_c и индекса Хирша I_h . Такие высокие показатели достигнуты в этом кластере по 11 естественнонаучным направлениям из 23 исследованных областей: *Химические технологии и промышленность, Геодезия и картография, Биология, Физика, Связь, Химия, Биотехнология, Астрономия, Электротехника, Электроника и радиотехника, География.*

Максимальный показатель по индексу востребованности $I_v = 104$ был достигнут учеными в Научно-исследовательском физико-химическом институте им. Л.Я. Карпова в области *Химические технологии и промышленность*.

Следующий значительный результат по индексу востребованности был выявлен в отрасли наук *Геодезия и картография* у Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института информации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте: $I_v = 96$.

В области *Биология* высоких результатов удалось добиться ученым Института микропроизводства ($I_v = 74$).

Недалеко от них расположены результаты по индексу востребованности, достигнутые в отрасли *Физика* учеными Института физических проблем им. П.Л. Капицы РАН ($I_v = 69$).

В области *Связь* наилучший результат ($I_v = 63$) удалось получить ученым Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН.

В отрасли *Химия* в этом кластере лидирует Институт биоорганической химии им. акад. М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова РАН ($I_v = 54$).

Научное направление *Биотехнология* возглавляет Институт молекулярной биологии им. В.А. Энгельгардта РАН: $I_v = 36$.

В области *Астрономия* наилучшие результаты достигнуты в Московском инженерно-физическом институте: $I_v = 35$.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана – лидер среди московских организаций по направлению *Электротехника* – $I_v = 33$.

В области научных исследований *Электроника и радиотехника* наилучшего результата достигли ученые ЦНИИ экономики, систем управления и информации: $I_v = 32$.

Завершает реестр из 11 отраслей наук *География* и ученые ФИЦ «Информатика и управление» РАН, которые достигли по результатам своих исследований значения I_v , равного 31.

Из рис. 1 следует также, что области наук *Геодезия и картография*, *Физика*, *Химия* и *Астрономия* отличаются высокими индексами цитирования (более 15 тыс.) и Хирша (не менее 25). Последний факт свидетельствует о том, что научная активность российских ученых в этой сфере знаний значительно превышает минимальный мировой уровень научной активности, равный 16 [Ершова 2021].

На рис. 2 представлен научный кластер организаций – лидеров по максимальному индексу востребованности – для Московской области.

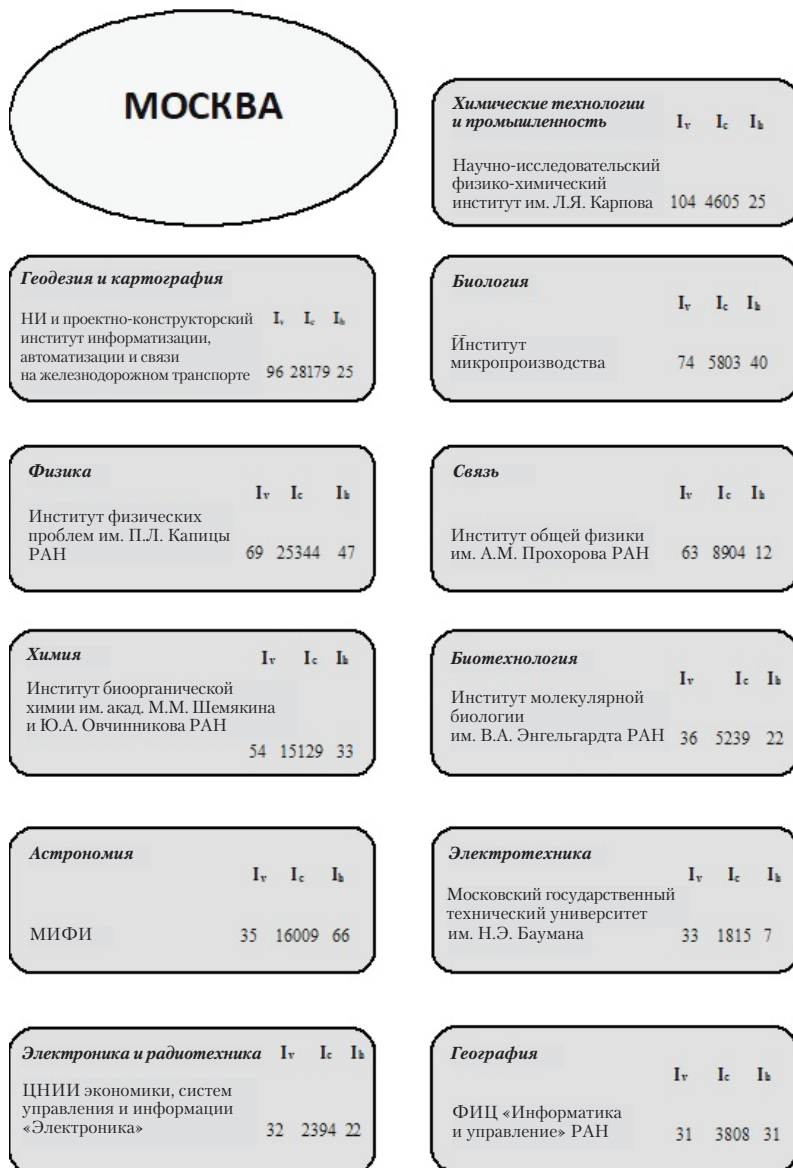


Рис. 1. Московский научный кластер



Рис. 2. Научный кластер Московской области

Здесь необходимо отметить выдающийся результат в области *Физика*, достигнутый учеными Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН. Индекс востребованности для этого института превышает 500. Это действительно весомый результат, поскольку он значительно превышает все ранее рассмотренные индексы востребованности в других отраслях наук.

На втором месте по индексу востребованности в Московской области – отрасль *Приборостроение*. Лучшие результаты в этой области наук были получены учеными Объединенного института ядерных исследований: $I_v = 55$.

Учеными из Института инженерной иммунологии также достигнуты значительные показатели по индексу востребованности в области *Химия*: $I_v = 51$.

В отрасли наук *Химические технологии и промышленность* выделяется среди других организаций Московский физико-технический институт (государственный университет): $I_v = 46$.

Завершает перечень организаций-лидеров с индексом востребованности более 30 Институт физики высоких энергий в области *Ядерная техника*. Для него максимальный индекс востребованности достиг значения 32.

В этом научном кластере высокие индексы цитируемости (от более 18 тыс. до практически 60 тыс.) отмечаются в трех отраслях наук: *Ядерная техника*, *Химия* и *Физика*; для этих же отраслей характерны высокие значения индекса Хирша (от 35 до 60), что также свидетельствует о том, что научная активность российских

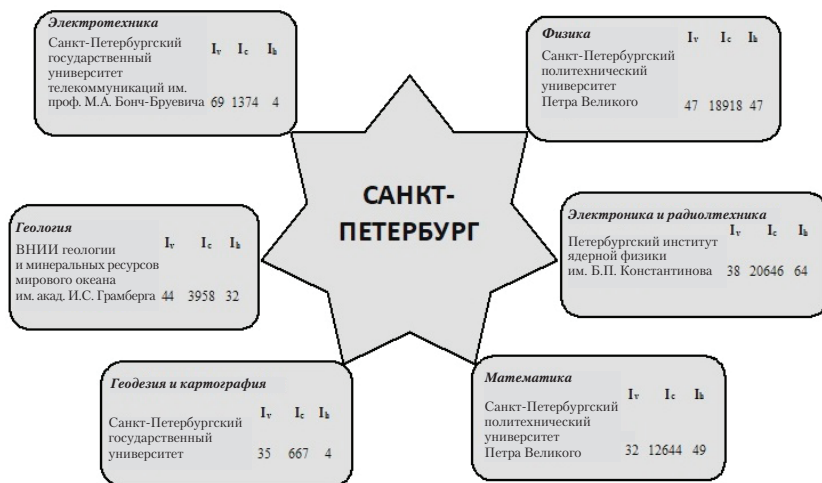


Рис. 3. Санкт-Петербургский научный кластер

ученых из организаций данного кластера значительно превышает минимальный мировой уровень научной активности, равный 16.

В Санкт-Петербургском научном кластере (рис. 3) на первое место выходит область исследования *Электротехника*. Высокий результат в этой области наук достигнут учеными Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича: $I_v = 69$. Следующее достижение в этом кластере относится к области *Физика* и соответственно к Санкт-Петербургскому политехническому университету Петра Великого: $I_v = 47$.

В отрасли наук *Геология* также незаурядный результат получен учеными ВНИИ геологии и минеральных ресурсов мирового океана им. акад. И.С. Грамберга: $I_v = 44$.

Ученые Санкт-Петербургского государственного университета добились значимых результатов по индексу востребованности ($I_v = 35$) в области *Геодезия*.

Ученым Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого в отрасли *Механика* удалось достичь значения I_v , равного 32.

В этом кластере также выделяются три отрасли наук: *Механика*, *Физика*, *Электроника и радиотехника*, отличающиеся высокими индексами цитируемости (от более 12 тыс. до более 20 тыс.) и индексами Хирша (от 47 до 49).

Самые высокие наукометрические показатели в рассмотренных трех региональных кластерах получены в следующих отраслях наук: *Физика, Химические технологии и промышленность, Геодезия и картография, Биология, Электротехника, Связь, Приборостроение, Химия, Химические технологии, Геология, Электроника и радиотехника, Биотехнология, Астрономия, Геодезия, Электротехника, Ядерная техника, Механика, Электроника и радиотехника, География* (в порядке уменьшения индекса востребованности).

Заключение

По итогам выполненного исследования в России выявлены три базовых региональных научных кластера (Московский, кластер Московской области, Санкт-Петербургский), где расположены организации, отличающиеся высокими показателями востребованности итогов исследований, отраженных в публикациях, а также максимальными индексами цитируемости и Хирша.

В Московском научном кластере высокие показатели востребованности итогов исследований достигнуты организациями по 11 научным направлениям из 23 исследованных естественнонаучных отраслей наук: *Химические технологии и промышленность, Геодезия и картография, Биология, Физика, Связь, Химия, Биотехнология, Астрономия, Электротехника, Электроника и радиотехника, География*.

При этом для четырех отраслей (*Геодезия и картография, Физика, Химия, Астрономия*) отмечаются высокие значения индексов цитирования (от ~15 тыс. для *Химии* до 28,2 тыс. для *Геодезии и картографии*) и Хирша (от 25 для *Геодезии и картографии* до 66 для *Астрономии*). Следует отметить, что научная активность российских ученых в этих сферах знаний значительно превышает минимальный мировой уровень научной активности, равный 16.

В научном кластере Московской области высокие показатели востребованности итогов исследований достигнуты организациями по пяти научным направлениям: *Химические технологии и промышленность, Физика, Химия, Приборостроение, Ядерная техника*. В этом кластере для трех отраслей наук (*Физика, Химия, Ядерная техника*) отмечаются также значительные индексы цитирования (от 18,5 тыс. для *Ядерной техники* до 58,5 для *Физики*) и Хирша (от 35 для *Физики* до 60 для *Ядерной техники*).

В Санкт-Петербургском научном кластере высокие показатели востребованности итогов исследований достигнуты организациями по шести отраслям наук (*Геодезия и картография, Физика, Электротехника, Электроника и радиотехника, Геология, Механика*).

При этом для трех отраслей (*Физика, Электроника и радиотехника, Механика*) отмечаются высокие значения индексов цитирования (от 12,6 тыс. для *Механики* до 20 тыс. для *Электроники и радиотехники*) и Хирша (от 47 для *Физики* до 64 для *Электроники и радиотехники*).

Пятерку отраслей – лидеров по индексу востребованности в рассмотренных трех научных кластерах – составляют *Физика* (кластер Московской области): $I_v = 505$, *Химические технологии и промышленность* (Московский кластер): $I_v = 104$, *Геодезия и картография* (Московский кластер): $I_v = 96$, *Биология* (Московский кластер): $I_v = 96$, *Физика* (Московский кластер): $I_v = 69$.

Высокие значения индекса Хирша, выявленные в трех региональных научных кластерах практически для всех вышеуказанных организаций этих кластеров, свидетельствуют о том, что научная активность российских ученых в рассмотренных отраслях знаний значительно (в несколько раз) превышает минимальный мировой уровень научной активности, равный 16.

Литература

- Арутюнов 2014 – Арутюнов В.В. Показатели эффективности эрготехнических систем // Научные и технические библиотеки. 2014. № 6. С. 5–14.
- Арутюнов 2015 – Арутюнов В.В. Особенности рейтинга цитируемости российских ученых по версии РИНЦ // Научные и технические библиотеки. 2015. № 5. С. 28–43.
- Арутюнов 2018 – Арутюнов В.В. Сравнительный анализ результативности научной деятельности федеральных государственных и национальных исследовательских университетов России // Научные и технические библиотеки. 2018. № 1. С. 80–91.
- Арутюнов, Гришина 2018 – Арутюнов В.В., Гришина Н.В. Оценка результативности научной деятельности российских ученых: кластерный анализ (на примере естественнонаучных отраслей) // Научные и технические библиотеки. 2018. № 9. С. 76–91.
- Гринёв 2019 – Гринёв А.В. Использование наукометрических показателей при оценке публикационной активности в современной России // Вестник Российской Академии наук. 2019. Т. 89. № 5. С. 993–1002.
- Ершова 2021 – Ершова С.К. Инструкция по использованию РИНЦ [Электронный ресурс]. URL: <https://rf-gk.ru/profil-avtora-v-rinc-funktionalnye-vozmozhnosti-rossiiskii/> (дата обращения 25 февраля 2021).
- РИНЦ 2018 – РИНЦ (Российский индекс научного цитирования) [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/querybox.asp?scope=newquery> (дата обращения 20 января 2018).

References

- Arutyunov, V.V. (2014), "Indicators of the ergo-technical systems effectiveness", *Scientific and technical libraries*, no. 6, pp. 5–14.
- Arutyunov, V.V. (2015), "Features of the citation rating of Russian scientists according to the RSCI", *Scientific and technical libraries*, no. 5, pp. 28–43.
- Arutyunov, V.V. (2018), "Comparative analysis of the scientific performance of federal state and national research universities of Russia", *Scientific and technical libraries*, no. 1, pp. 80–91.
- Arutyunov, V.V. and Grishina, N.V. (2018), "Evaluation of the scientific performance of Russian scientists. Cluster analysis (on the example of the field of natural Sciences)", *Scientific and technical libraries*, no. 9, pp. 76–91.
- Ershova, S.K. (2021), "Instructions for using the RSCI", [Online], available at: <https://elibrary.ru/querybox.asp?scope=newquery> (Accessed 25 February 2021).
- Grinev, A.V. (2019), "The use of scientometric indicators to evaluate publishing activity in modern Russia", *Herald of the Russian Academy of Sciences*, vol. 89, no. 5, pp. 993–1002.
- RSCI (2018), *Russian Science Citation Index*, [Online], available at: <https://elibrary.ru/querybox.asp?scope=newquery> (Accessed 20 January 2018).

Информация об авторах

Валерий В. Арутюнов, доктор технических наук, профессор, Российский государственный гуманитарный университет, Москва, Россия; Россия, Москва, 125047, Миусская пл., д. 6; warut698@yandex.ru

Наталья В. Гришина, кандидат технических наук, доцент, Российский государственный гуманитарный университет, Москва, Россия; Россия, Москва, 125047, Миусская пл., д. 6; grnat@rambler.ru

Information about the authors

Valerii V. Arutyunov, Dr. of Sci. (Computer Science), Professor, Russian State University for the Humanities, Moscow, Russia; bld. 6, Miusskaya Sq., Moscow, Russia, warut698@yandex.ru

Nataliya V. Grishina, Cand. of Sci. (Computer Science), associate professor, Russian State University for the Humanities, Moscow, Russia; bld. 6, Miusskaya Sq., Moscow, Russia, grnat@rambler.ru

Моделирование транспортных потоков с участками дороги, недоступными для проезда

Анастасия Н. Жукова

*Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия, zhan16u370@student.bmstu.ru*

Марина С. Шаповалова

*Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия, mshapovalova84@gmail.com*

Аннотация. Компьютерное моделирование транспортных потоков дает возможность выяснять потребности в модификации дорожной сети, производить оценку автомобильного потока на дорогах и обнаруживать проблемные участки с целью принятия своевременных мер для их устранения. Грамотное составление плана формирования дорожной сети на основе приобретенных сведений дает возможность уменьшить нагрузку на автотранспортную линию, избежать пробок, а также сократить среднее время пребывания водителей на дорогах. Для реализации компьютерной модели проанализированы макроскопические и микроскопические модели анализа потока автомобилей. Рассмотрена модель клеточных автоматов (Нагеля–Шрекенберга), в которую было внесено дополнение, учитывающее наличие недоступных для проезда участков дорог. Реализована необходимость в модификации алгоритма смены полосы: добавилось условие необходимости в смене полосы при встрече с недоступным участком дороги. Для объезда недоступных участков при большой плотности транспортных потоков был предложен алгоритм «вежливых» водителей. Данная модель реализована средствами языка Python. На основе модификации данной модели был проведен анализ поведения автомобилей при разной плотности транспортного потока и расположения недоступных участков дороги для двух- и трехполосных дорог.

Ключевые слова: модель клеточных автоматов, автомобильный поток, препятствия на автодорогах

Для цитирования: Жукова А.Н., Шаповалова М.С. Моделирование транспортных потоков с участками дороги, недоступными для проезда // Вестник РГГУ. Серия «Информатика. Информационная безопасность. Математика». 2021. № 2. С. 19–36. DOI: 10.28995/2686-679X-2021-2-19-36

© Жукова А.Н., Шаповалова М.С., 2021

Traffic flows modeling with inaccessible for driving road sections

Anastasiya N. Zhukova

*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia,
zhan16u370@student.bmstu.ru*

Marina S. Shapovalova

*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia,
mshapovalova84@gmail.com*

Abstract. Computerized traffic modeling makes it possible to find out the modification needs to assess the traffic flow on the roads and detect likely problem areas in order to take timely measures to eliminate them. Competent preparation of a road network formation plan based on the acquired information makes it possible to reduce the load on the road transport line, avoid traffic jams, and also reduce the average time spent by drivers on the roads. The macroscopic and microscopic models of the cars flow were analyzed by authors to implement the computer model. The article considered the model of the cellular automata by Nagel–Schreckenberg, with the author’s addition that takes into account the presence of the road sections inaccessible for driving in.

The need to modify the lane change algorithm was implemented: the condition of the need to change the lane when car is meeting an inaccessible road section was added. And also the “polite” drivers algorithm for bypassing inaccessible areas with a high density of the traffic flows was proposed. Such a model is realized on Python programming language. An analysis of vehicles behavior with different traffic density and location of inaccessible road sections for two- and three-lane roads was carried out based on that model modification.

Keywords: cellular automata model, traffic flow, road obstructions

For citation: Zhukova, A.N. and Shapovalova, M.S. (2021), “Traffic flows modeling with inaccessible for driving road sections”, *RSUH/RGGU Bulletin. “Information Science. Information Security. Mathematics” Series*, no. 2, pp. 19–36, DOI: 10.28995/2686-679X-2021-2-19-36

Введение

В современном мире невозможно представить себе жизнь без автомобиля. С каждым годом машин на дорогах городов становится все больше и больше, что приводит к необходимости поиска способов эффективного использования улично-дорожной системы. Основными причинами проблем на дорогах являются низкая

пропускная способность, качество дорог, неудобные автомобильные развязки, а также человеческий фактор.

Для решения таких вопросов, как изменчивость транспортной системы, ее зависимость от случайных факторов, непредсказуемость действий водителей, используются технологии моделирования, также создаются компьютерные программы, демонстрирующие полученные результаты на моделях реальных дорожных полос и перекрестков. В работе проводятся анализ и программная реализация одной из самых распространенных микроскопических математических моделей транспортных потоков.

Компьютерное моделирование позволяет проанализировать потребности в строительстве новых автодорог либо расширении старых, размещении новых светофоров. Также оно позволяет производить оценку эффективности планируемых работ, обнаруживать проблемные участки движения транспорта, чтобы принять своевременные меры для их устранения. Грамотное составление плана формирования дорожной сети на основе приобретенных сведений дает возможность уменьшить нагрузку на автотранспортную линию и сократить среднее время пребывания водителей на дорогах. Область применения модели транспортных потоков – транспортная инфраструктура, например, системы управления перевозок пассажиров.

Макроскопические модели

Макроскопические модели (модели-аналоги) [Lighthill, Whitham 1955; Кравченко, Омарова 2014] – это модели, которые описывают движение автомобилей как физический поток (гидро- и газодинамические модели). Это связано с тем, что у транспортного потока существует зависимость между скоростью и плотностью потока. Под плотностью потока подразумевается количество автомобилей на одной полосе на единицу длины трассы в фиксированный момент времени в окрестности заданной точки трассы. Макроскопические модели нужны для моделирования довольно протяженных дорог при достаточной концентрации транспортных средств, что позволяет вводить усредненные характеристики, подобные характеристикам газа или жидкости. В таких условиях всем водителям необходимо придерживаться одних и тех же правил, подчиняться общим закономерностям, поэтому в данной ситуации справедливо приближение сплошной среды, используемой в динамике жидкости и газа.

Микроскопические модели

Микроскопические модели (модели следования за лидером) [Гасников, Кленов, Нурминский, Холодов, Шамрай 2013; Швецов 2003; Кравченко, Омарова 2014] – модели, в основе которых лежит идея соблюдения безопасной дистанции до лидера при движении. Первые микроскопические модели появились в 1950-х годах. Главное отличие от макроскопических моделей в том, что в микроскопических явно моделируется движение каждого транспортного средства, у всех автомобилей есть свой маршрут, текущая скорость, которая может изменяться со временем и иметь собственное ограничение. Все это дает возможность достичь более точного описания движения транспортных средств, но такой подход требует больше вычислительных ресурсов.

В микромоделях подразумевается, что скорость каждого транспортного средства обусловлена состоянием располагающихся рядом машин, причем основное воздействие оказывается впереди идущим автомобилем. В рамках микроскопического подхода были созданы и предложены разными авторами такие модели, как модель следования за лидером, модель оптимальной скорости, модель разумного водителя и др. В рамках данной работы дальнейшее развитие получила микроскопическая модель, основанная на теории клеточных автоматов, являющаяся обобщением одномерной модели Нагеля–Шрекенберга [Nagel, Schreckenberg 1992].

Клеточные автоматы

Теория клеточных автоматов была предложена Джоном фон Нейманом в 50-х годах при разработке теории самовоспроизводящихся систем [фон Нейман Дж. 2010]. Впервые идея применения клеточных автоматов для моделирования транспортных потоков была предложена в работе [Cremer, Ludwig 1986]. Однако активная разработка и исследования в данном направлении начались только после публикации К. Нагеля и М. Шрекенберга (Nagel–Schreckenberg) [Nagel, Schreckenberg 1992].

Классический клеточный автомат – это двумерная сетка произвольного размера, состоящая из ячеек. Конфигурация сетки обновляется с течением времени, причем состояние каждой конкретной ячейки в следующий момент времени зависит от состояния ее соседних ячеек. Количество возможных состояний ячейки конечно [Тоффоли, Марглоус 1991; фон Нейман Дж. 2010]. Обновление конфигурации происходит параллельно, в соответствии с определенными для данной модели правилами.

Свойства конечных автоматов.

Однородность системы. Все части системы неотличимы друг от друга по каким-либо правилам. Тем не менее ячейки на краю области могут иметь отличающиеся правила из-за отсутствия некоторых соседей.

Локальность правил. Только сама клетка и ее соседние клетки могут воздействовать на состояние клетки.

Конечность множества возможных состояний клетки. Это необходимое условие нужно для того, чтобы при получении нового состояния требовалось конечное число операций.

Одновременный переход в новое состояние для всех клеток. Значения во всех клетках меняются одновременно в конце последующей итерации, а не по мере вычисления, иначе от порядка вычислений зависит результат итерации.

Однако для решения конкретных практических задач некоторые из свойств могут быть отброшены.

Пусть переменные x_i, v_i, l_i – координата, скорость и длина i -го автомобиля соответственно; $g_i = x_{i+1} - l_i - x_i$ – дистанция до лидера. Длина автомобиля в этой модели всегда равна единице. Скорость может принимать одно из $(v_{max} + 1)$ допустимых целочисленных значений $v = 0, 1, 2, \dots, v_{max}$. На каждом временном шаге $t \rightarrow t + 1$ состояние всех автомобилей в системе обновляется в соответствии со следующими правилами:

1. *Ускорение.* Если $v_i(t) = \min(v_i(t-1) + 1, v_{max})$, то скорость i -го автомобиля не изменяется, иначе скорость увеличивается на единицу.

2. *Торможение.* Если новая скорость равна или больше расстояния до впереди идущего автомобиля, то скорость i -го автомобиля уменьшается до

$$v_i(t) = \min(v_i(t), g_i(t-1)).$$

3. *Случайные возмущения.* Если $v_i(t) > 0$, то скорость i -го автомобиля может быть уменьшена на единицу с вероятностью p ; иначе скорость не изменяется:

$$v_i(t) = \max(v_i(t) - 1, 0).$$

4. *Движение.* Каждый автомобиль продвигается вперед на количество ячеек, соответствующее его новой скорости, после выполнения шагов 1–3 [Долгушин, Мызникова 2012]:

$$n_i(t) = n_i(t - 1) + v_i(t).$$

Первое правило описывает единое стремление всех водителей ехать с наибольшей скоростью. Второе – обеспечивает отсутствие столкновений с лидером. Третье правило вносит элемент стохастичности, рассматривающий случайности в поведении водителей и другие вероятностные факторы. Четвертым правилом определяется число ячеек, на которое продвинется автомобиль за одну итерацию.

Рассмотренная модель применима к однополосной дороге, поскольку в ней нет дополнительных условий для перестроения автомобилей.

Расширенная модель клеточных автоматов

Главным достоинством клеточных автоматов является простота моделирования транспортных потоков, что важно при переходе к многополосным моделям, которые усложняют систему. Многорядные микромодели позволяют получить более реалистичную картину при моделировании транспортных потоков [Кравченко, Омарова 2014]. В таких моделях трасса представляет собой двумерную сетку, в которой количество ячеек в поперечном направлении соответствует числу полос трассы. В модели разрешены смены полос [Rickert, Nagel, Schreckenberg, Latour 1996].

За основу многополосной модели взят набор правил для однополосной дороги, дополненный условиями смены полосы движения. Причиной смены полосы может быть то, что на соседней полосе выше скорость или меньше плотность.

В расширенной модели смена полосы происходит в два этапа:

1. Проверка возможности смены полосы. Автомобиль может сменить полосу, если выполнены следующие условия:

- впереди, на расстоянии равном или меньшем, чем безопасное, движется другая машина;
- на соседней полосе впереди на безопасном расстоянии отсутствуют другие машины;
- на соседней полосе сзади на безопасном расстоянии нет другого автомобиля, которому текущий автомобиль может помешать при перестроении.

2. Производится смена полосы, перемещение машины по диагонали, так как машины не способны двигаться в поперечном направлении.

Смена полос должна происходить за один временной шаг. Возможна ситуация, при которой на дороге с количеством полос больше двух в одном направлении может возникнуть конфликт,

когда две машины с крайних полос хотят сместиться в среднюю и занять одну и ту же ячейку. Этой ситуации можно избежать, если разрешить перестроение вправо только на нечетных шагах, а влево – на четных.

Предлагаемая модель

Для построения модели многополосного участка проезжей части предлагается использовать расширенную версию модели клеточного автомата. При моделировании дорожного движения с помощью клеточных автоматов в качестве модели дорожного полотна используется прямоугольная сетка размером $n \times m$. В определенные моменты времени каждая из клеток сетки может находиться в одном из состояний, которые входят в определение конкретного клеточного автомата.

Обычно в модели клеточных автоматов для моделирования транспортных потоков множество допустимых состояний для каждой клетки автомата представлено двумя состояниями: 0 – участок свободен; 1 – участок занят автомобилем. Для моделирования ситуаций, более близких к реальным, было добавлено третье состояние, соответствующее недоступности участка дороги для проезда (например, ремонт дороги, ДТП, яма, открытый люк и т. д.). Наличие в модели этого состояния позволяет исследовать зависимость плотности или средней скорости от случайных факторов, подобных ДТП или работам, проводимым на дороге. При моделировании транспортных потоков состояние любых клеток, кроме недоступных, может меняться в каждый момент времени.

Если при проезде по трассе автомобилю попадает недоступный для проезда участок, то для объезда машина должна притормозить и сменить полосу. Если смена дорожной полосы невозможна, то остановиться и ждать, пока проезд не станет доступным.

Время в модели дискретно и измеряется в количестве итераций, на каждом шаге сетка изменяет свое состояние. При переходе к следующей итерации происходит преобразование матрицы состояний дорожного полотна в соответствии с правилами перехода, которые задают конфигурацию клеточного автомата.

Алгоритмы

С учетом описанных выше особенностей предметной области и предлагаемой модели транспортных потоков на основе клеточных автоматов были модифицированы некоторые алгоритмы, в основе

которых лежит модель К. Нагеля и М. Шрекенберга. Для каждого из алгоритмов представлена его реализация на языке Python.

Алгоритм простого передвижения

Для перемещения на прямолинейном участке дороги происходит следующая последовательность действий.

Вычисляется дистанция до ближайшей преграды. Рассчитывается скорость по модели для однополосной дороги К. Нагеля и М. Шрекенберга с одним отличием: автомобиль может уменьшить свою скорость с определенной вероятностью, только если она больше единицы. В зависимости от скорости происходит перемещение автомобиля.

Листинг 1 – Общий алгоритм передвижения

```
#для каждого непрерывного участка дороги
for road in REPLACE:
#двигаемся направо
if road[3] == 0:
#установка счетчиков
SM = 0
#строка
i = road[0]
#начало участка
j0 = road[1]
#конец участка
jn = road[2]
j = jn
#пока участок не кончился
while j >= j0:
#если в этой клетке появляются машины
if (M[i][j].generate == 1 and M[i][j].status == 0):
#если вероятность больше сгенерированного числа
if (random.random() < P):
#создаем экземпляр класса машины и помещаем в эту ячейку
M[i][j].car = Car()
#координаты отрисовки за пределами, для вида выезда
M[i][j].car.old_x = (j - M[i][j].car.speed)*s
M[i][j].car.old_y = i*s
#метка перемещения машины устанавливается в 1
M[i][j].car.change = 1
#статус ячейки изменяется на занят
```

```

M[i][j].status = 1
#направление движения машины – направо
M[i][j].car.direct = 0
N += 1
#если ячейка занята и еще не перемещалась
if (M[i][j].status == 1 and M[i][j].car.change == 0):
#если движение автомобиля направо
if (M[i][j].car.direct == 0):
#общий алгоритм передвижения
find_way_0(M, i, j)
j -= 1
def run_0(M, i, j, v):
#для упрощения помещаем в переменную экземпляр класса машины
c = M[i][j].car
#поиск преграды
d = find_0(M, i, j)
#нахождение скорости по модели Нагеля–Шрекенберга
c.speed = min(c.speed + 1, V_MAX)
c.speed = min(c.speed, d - 1)
if (c.speed > 1):
if (random.random() < P_DECREASE_SPEED):
c.speed = max(c.speed - 1, 0)
#метка перемещения
c.change = 1
#ограничение скорости
if v > -1 and c.speed > v:
c.speed = v
#перемещение машины, если скорость больше 0
if (c.speed > 0):
#если вышли за пределы
if j+c.speed >= len(M[i]):
#перемещаем машину на последнюю клетку
M[i][len(M[i])-1].car = M[i][j].car
M[i][len(M[i])-1].ch_status(1)
else:
#перемещаем машину в нужную клетку
M[i][j+c.speed].car = M[i][j].car
M[i][j+c.speed].ch_status(1)
#текущая ячейка очищается, и статус становится свободным
M[i][j].car = None
M[i][j].status = 0
return 0

```

Алгоритм смены полосы

Поскольку было добавлено третье состояние (участок дороги заблокирован для проезда), появилась необходимость в модификации алгоритма смены полосы.

Решение о смене полосы принимается в следующих ситуациях: если впереди на расстоянии равном или меньшем, чем безопасное, движется другая машина со скоростью меньшей, чем у текущего автомобиля, или на таком же расстоянии находится недоступный участок дороги.

Листинг 2 – Алгоритм смены полосы

```

#решение о необходимости смены полосы
cl = find_w_0(M, i, j)
#если сменить полосу необходимо
if (cl == 1 and SM == 0):
#если есть возможность перестроиться на полосу слева: есть участок
дороги, совпадает направление движения
if M[i-1][j] != -1 and M[i-1][j].direction == 0 and \
T%2 == 0 and (M[i-1][j].unavailability == 0 or \
M[i-1][j].unavailability == M[i][j].car.num):
#если нет машин, мешающих проезду
if (find_car_0(M, i-1, j) == 0):
#перемещение в ячейку экземпляра класса машины
M[i-1][j+1].car = M[i][j].car
#флаг смены полосы устанавливается в -1 (влево)
M[i-1][j+1].car.change_lane = -1
#скорость равна 1
M[i-1][j+1].car.speed = 1
M[i-1][j+1].car.change = 1
#статус новой ячейки: занята
M[i-1][j+1].ch_status(1)
M[i][j].car = None
#статус текущей ячейки: свободна
M[i][j].status = 0
SM = 1
return 0
#иначе, если есть возможность перестроиться на полосу справа: есть
участок дороги, совпадает направление движения
elif M[i+1][j] != -1 and M[i+1][j].direction == 0 and \
T%2 == 1 and (M[i+1][j].unavailability == 0 or \

```

```

M[i+1][j].unavailability == M[i][j].car.num):
#если нет машин, мешающих проезду
if (find_car_0(M, i+1, j) == 0):
#перемещение в ячейку экземпляра класса машины
M[i+1][j+1].car = M[i][j].car
#флаг смены полосы устанавливается в 1 (вправо)
M[i+1][j+1].car.change_lane = 1
#скорость равна 1
M[i+1][j+1].car.speed = 1
M[i+1][j+1].car.change = 1
#статус новой ячейки: занята
M[i+1][j+1].ch_status(1)
M[i][j].car = None
#статус текущей ячейки: свободна
M[i][j].status = 0
SM = 1
return 0
#иначе, если есть возможность перестроиться на полосу справа: есть
участок дороги, совпадает направление движения
elif M[i+1][j] != -1 and M[i+1][j].direction == 0 and \
T%2 == 1 and (M[i+1][j].unavailability == 0 or \
M[i+1][j].unavailability == M[i][j].car.num):
#если нет машин, мешающих проезду
if (find_car_0(M, i+1, j) == 0):
#перемещение в ячейку экземпляра класса машины
M[i+1][j+1].car = M[i][j].car
#флаг смены полосы устанавливается в 1 (вправо)
M[i+1][j+1].car.change_lane = 1
#скорость равна 1
M[i+1][j+1].car.speed = 1
M[i+1][j+1].car.change = 1
#статус новой ячейки: занята
M[i+1][j+1].ch_status(1)
M[i][j].car = None
#статус текущей ячейки: свободна
M[i][j].status = 0
SM = 1
return 0
#если смещение было нужно, но оно было запрещено
elif (cl == 1 and SM == 1):
#флаг запрета на смещения снимается
SM = 0

```

Алгоритм «вежливых» водителей

При объезде недоступных участков дороги по правилам дорожного движения транспортное средство может сместиться на соседнюю полосу для объезда в случае, если оно не мешает водителям из свободной полосы. В реальности же при большой плотности движения автомобилей это привело бы к длительному ожиданию водителями свободной полосы.

Для предотвращения таких ситуаций можно было бы пропускать автомобили «елочкой», то есть по очереди: один автомобиль из полосы с препятствием, один – из полосы без препятствия. Однако в реальности не все водители готовы пропускать других. Поэтому был предложен следующий алгоритм.

Если автомобилю необходимо сменить полосу и его скорость равна нулю, то есть произошла остановка еще на предыдущем шаге, то генерируется небольшое случайное число. При выполнении каждого следующего шага алгоритма значение этого числа уменьшается на единицу. После того как оно становится равным единице, на другую полосу рядом с автомобилем, которому необходимо сменить полосу движения, ставится блок, через который может пройти автомобиль со скоростью, равной единице. После объезда недоступного участка блок снимается.

Листинг 3 – Алгоритм «вежливых» водителей

```
#если сменить полосу не получилось и скорость равна 0
elif (M[i][j].car.speed == 0):
#если автомобиль остановился недавно
if (M[i][j].car.time_wait == 0):
#генерируется случайное время ожидания
M[i][j].car.time_wait = random.randrange(5) + 1
#если время ожидания подошло к концу
if(M[i][j].car.time_wait == 1):
#если на полосу слева можно сместиться: есть дорога, направление
совпадает и нет мешающих блоков
if (M[i-1][j] != -1 and \
M[i-1][j].direction == 0 and \
M[i-1][j].unavailability == 0):
#ставится блок с номером машины, которой нужно проехать
M[i-1][j].unavailability = M[i][j].car.num
#если на полосу справа можно сместиться: есть дорога, направление
совпадает и нет мешающих блоков
elif (M[i+1][j] != -1 and \
```

```

M[i+1][j].direction == 0 and \
M[i+1][j].unavailability == 0):
#ставится блок с номером машины, которой нужно проехать
M[i+1][j].unavailability = M[i][j].car.num
#если время ожидания больше 1
elif(M[i][j].car.time_wait > 1):
#время уменьшается на единицу
M[i][j].car.time_wait -= 1
    
```

Исследование зависимости плотности транспортного потока от количества и расположения недоступных участков дороги для двух- и трехполосных дорог.

Плотность автомобильного потока

Важным свойством транспортных потоков является плотность [Долгушин, Мызникова 2012].

Плотность транспортного потока – пространственная характеристика, которая определяет количество автомобилей, проходящее при данной средней скорости движения на единицу длины участка дорожной полосы. Она измеряется количеством транспортных средств, проходящих на 1 км длины дороги. При неподвижном состоянии транспортного потока достигается его максимальная плотность, которая равна примерно 170–200 авт./км. Такая плотность достигается при неподвижном состоянии колонны автомобилей, расположенных плотно на полосе.

Параметры движения автомобильного транспортного средства

Средняя длина легкового автомобиля составляет 4,5 м. Рекомендованное расстояние в городе составляет $\frac{2}{3}$ длины корпуса машины, в среднем 3 м. Опытным водителям разрешается сокращать дистанцию до 2 м, но никак не меньше этой величины. Так как клетку может занимать только один автомобиль, ее размеры будут составлять $7,5 \times 7,5$ м.

Конкретное автомобильное транспортное средство характеризуется текущей скоростью и максимальной скоростью. Скорость может принимать целые значения от 0 до 4. Если временной шаг

занимает одну секунду, то значения скоростей будут следующими: 1 будет соответствовать 27 км/ч, 2 – 54 км/ч, 3 – 81 км/ч, 4 – 108 км/ч (скорость свободного движения автомобиля по автомагистрали).

Было проведено исследование зависимости плотности транспортного потока от количества и расположения недоступных участков дороги для двух- и трехполосных дорог. Для проведения исследования бралась полоса длиной в 20 клеток, что соответствует 150 м, максимальная скорость равна 4. Для каждого из четырех типов дорог проводилось моделирование, были получены значения пропускной способности при средней скорости 60–80 км/ч.

Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты исследования пропускной способности

	Пропускная способность, авт./мин	Полученные результаты, авт./мин
Перекресток	8	10
Однополосные дороги	28	27
Двухполосные дороги	45	53
Трехполосные дороги	75	80

Полученные значения пропускной способности дорог немного отличаются от значений пропускной способности согласно Руководству по оценке пропускной способности автомобильных дорог, но довольно близки к ним. Это говорит о том, что реализованное программное обеспечение с использованием предлагаемой модели применимо в использовании.

Когда на дороге встречается участок, недоступный для проезда, автомобиль притормаживает, меняет полосу и едет дальше. Если сменить полосу нельзя – останавливается и ждет, пока проезд не станет доступным.

При размещении одной недоступной ячейки на трехполосной дороге плотность транспортных потоков меняется относительно исходной плотности на 1 авт./км, на двухполосной – на 2 авт./км, а рядом с перекрестком – на 9 авт./км. Поэтому если на дороге с количеством полос больше двух встречается только один недоступный участок, плотность увеличивается, но не сильно. Но при уменьшении количества полос и средней скорости движения на дороге плотность транспортных потоков увеличивается больше.

Наибольшее влияние на транспортный поток оказывает именно расположение недоступных участков, а не их количество. Если расположить на трехполосной дороге две недоступные клетки так, что объехать их можно только по одной полосе, количество машин увеличивается лавинообразно, плотность транспортного потока становится большой. Значение плотности транспортного потока меняется относительно исходной на 20 авт./км. Однако при перемещении одной недоступной клетки таким образом, чтобы стало больше места для объезда, плотность потока будет почти в два раза меньше, а изменение плотности составит 5 авт./км.

При размещении одной недоступной ячейки на трехполосной дороге плотность транспортных потоков меняется относительно исходной плотности на 0,02, на двухполосной – на 0,05, а рядом с перекрестком – на 0,06. Если рассматривать данные результаты в количестве автомобилей, проходящихся на 1 м дороги, то можно получить следующие результаты.

При размещении одной недоступной ячейки на двухполосной дороге изменение плотности транспортных потоков составит 2 авт./км, а перед перекрестком – 9 авт./км; при размещении двух таких ячеек на двухполосной дороге плотность изменится на 5 авт./км, а перед перекрестком – на 21 авт./км; при размещении трех недоступных ячеек плотность транспортного потока на двухполосной дороге изменится на 7 авт./км, а перед перекрестком – на 38 авт./км. Из этого можно сделать вывод, что если недоступный участок дороги будет находиться перед перекрестком, то плотность дорожного потока в зависимости от количества недоступных ячеек будет увеличиваться сильнее, чем на дорогах, расположенных вдали от перекрестка. Автомобили будут мешать не только при объезде недоступных участков, но также останавливаясь сразу после них или рядом, ожидая зеленого сигнала светофора.

Основываясь на результатах исследования проведенных экспериментов, можно сделать следующие выводы:

- модель транспортных потоков применима для их моделирования и приближена к реальным условиям;
- наибольшее влияние одна недоступная ячейка оказывает на дороге рядом с перекрестком, наименьшее – на трехполосной дороге;
- наибольшее влияние на транспортный поток оказывается при перекрытии большего процента количества полос;
- на дорогах рядом с регулируемым перекрестком при объезде недоступных ячеек затор появляется и увеличивается очень быстро;

- определенное расположение недоступных ячеек оказывает больше влияния, чем их количество;
- средняя скорость значительно уменьшается при увеличении плотности.

Заключение

В результате проделанной работы была дополнена модель клеточных автоматов. Так как в модель было добавлено третье состояние, появилась необходимость в модификации алгоритма смены полосы: добавилось условие необходимости в смене полосы при встрече с недоступным участком дороги. Для объезда недоступных участков при большой плотности транспортных потоков был предложен алгоритм «вежливых» водителей. С помощью предлагаемой модели была исследована зависимость плотности транспортного потока от количества и расположения недоступных участков дороги для двух- и трехполосных дорог.

Литература

- Гасников, Кленов, Нурминский, Холодов, Шамрай 2013 – *Гасников А.В., Кленов С.Л., Нурминский Е.А., Холодов Я.А., Шамрай Н.Б.* Введение в математическое моделирование транспортных потоков. М.: МЦНМО, 2013.
- Долгушин, Мызникова 2012 – *Долгушин Д.Ю., Мызникова Т.А.* Применение клеточных автоматов к моделированию автотранспортных потоков. Омск: СибАДИ, 2012.
- Кравченко, Омарова 2014 – *Кравченко П.С., Омарова Г.А.* Микроскопические математические модели транспортных потоков. Аналитический обзор // Проблемы информатики. 2014. № 1. С. 24–31.
- Нейман Дж. фон 2010 – *Нейман Дж. фон* Теория самовоспроизводящихся автоматов. М.: Либроком, 2010.
- Тоффоли, Марглоус 1991 – *Тоффоли Т., Марглоус Н.* Машины клеточных автоматов. М.: Мир, 1991.
- Швецов 2003 – *Швецов В.И.* Математическое моделирование транспортных потоков // Автоматика и телемеханика. 2003. № 11. С. 3–46.
- Cremer, Ludwig 1986 – *Cremer M., Ludwig J.* A fast simulation model for traffic flow on the basis of Boolean operations // Mathematics and Computers in Simulation. 1928. Vol. 28. P. 297–303.
- Lighthill, Whitham 1955 – *Lighthill M.H., Whitham G.B.* On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads // *Proceedings of the Royal Society A. Mathematical, physical and engineering sciences.* London, 1955. P. 317–345.

- Nagel, Schreckenberg 1992 – Nagel K., Schreckenberg M. A cellular automation model for freeway traffic // Journal de Physique I. 1992. Vol. 2 (12). P. 2221–2229.
- Rickert, Nagel, Schreckenberg, Latour 1996 – Rickert M., Nagel K., Schreckenberg M., Latour A. Two lane traffic simulations using cellular automata // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2008. Vol. 231 (4). P. 534–550.

References

- Cremer, M. and Ludwig, J. (1986), “A fast simulation model for traffic flow on the basis of Boolean operations”, *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 28, pp. 297–303.
- Dolgushin, D.Yu. and Myznikova, T.A. (2012), *Primenenie kletochnykh avtomatov k modelirovaniyu avtotransportnykh potokov* [Application of the cellular automata to modeling the traffic flows], SibADI, Omsk, Russia.
- Gasnikov, A.V., Klenov, S.L., Nurminsky, E.A., Kholodov, Ya.A. and Shamrai, N.B. (2013), *Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie transportnykh potokov* [Introduction to the mathematical modeling of the traffic flows], MCNMO, Moscow, Russia.
- Kravchenko, P.S. and Omarova, G.A. (2014), “Microscopic mathematical models of the traffic flows. Analytical review”, *Problems of Informatics*, no. 1, pp. 24–31.
- Lighthill, M.H. and Whitham, G.B. (1955), “On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads”, in *Proceedings of the Royal Society A. Mathematical, physical and engineering sciences*, London, UK, pp. 317–345.
- Nagel, K. and Schreckenberg, M. (1992), “A Cellular automation model for freeway traffic”, *Journal de Physique I*, vol. 2 (12), pp. 2221–2229.
- von Neumann, J. (2010), *Teoria samovosproizvodyashih avtomatov* [Theory of Self-Reproducing Automata], Librokom, Moscow, Russia.
- Rickert, M., Nagel, K., Schreckenberg, M. and Latour, A. (2008), “Two lane traffic simulations using cellular automata”, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 231 (4), pp. 534–550.
- Shvetsov, V.I. (2003), “Mathematical modeling of the traffic flows”, *Automation and telemechanics*, issue 11, pp. 3–46.
- Toffoli, T. and Marglous, N. (1991), *Mashiny kletochnykh avtomatov* [Cellular automata machines], Mir, Moscow, Russia.

Информация об авторах

Анастасия Н. Жукова, студентка, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия; 105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5; zhan16u370@student.bmstu.ru

Марина С. Шаповалова, кандидат педагогических наук, доцент, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия; 105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5; mshapovalova84@gmail.com

Information about the authors

Anastasiya N. Zhukova, student, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia; bld. 5, 2nd Bauman Str., Moscow, 105005, Russia; zhan16u370@student.bmstu.ru

Marina S. Shapovalova, Cand. of Sci (Education), associate professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia; bld. 5, 2nd Bauman Str., Moscow, 105005, Russia; mshapovalova84@gmail.com

Информационная безопасность

УДК 004.8

DOI: 10.28995/2686-679X-2021-2-37-47

Основные направления создания информационной системы для идентификации личности по фенотипическим признакам человека

Владислав О. Благов

*Научно-производственное объединение
«Специальная техника и связь», Москва, Россия, stis@mvd.gov.ru*

Дмитрий А. Митюшин

*Российский государственный гуманитарный университет,
Москва, Россия, dalex@inbox.ru*

Геннадий Ю. Пучков

*Научно-производственное объединение
«Специальная техника и связь», Москва, Россия, stis@mvd.gov.ru*

Елена В. Ремизова

*Научно-производственное объединение
«Специальная техника и связь», Москва, Россия, alrem76@mail.ru*

Аннотация. Бурное и стремительное развитие биометрических технологий, основанных как на статических, так и на динамических идентификационных признаках человека, не могло обойти стороной одну из важных сфер жизнедеятельности современного общества – борьбу с преступностью. Большинство решений, связанных с идентификацией личности по папиллярным узорам, радужной оболочке и сетчатке глаза, рисунку вен на руке и термографической карты лица, находят широкое применение в системах контроля и управления доступом, системах защиты автоматизированных информационных систем от несанкционированного доступа к информации. Вместе с тем использование данных признаков при расследовании и раскрытии преступлений только начинает внедряться в деятельность правоохранительных органов Российской Федерации. Использование информационных систем в этой области может существенно повысить эффективность борьбы с преступностью, осо-

© Благов В.О., Митюшин Д.А., Пучков Г.Ю., Ремизова Е.В., 2021

бенно с преступлениями против личности. Особый интерес представляет использование в расследовании преступлений данных о фенотипических признаках подозреваемого, т. е. информации о его росте, весе, цвете волос, глаз, тоне кожи, группе крови. В статье рассматриваются основные принципы создания автоматизированной информационной системы для идентификации личности по биологическому материалу, оставленному лицами, присутствовавшими на месте преступления. Определяется комплекс организационных и научных задач, которые необходимо решить при создании системы, обеспечении ее информационной безопасности, программной реализации, а также предлагается алгоритм двухэтапного поиска информации, хранящейся в базах данных сервисов ИСОД, основанный на современных методах обработки данных.

Ключевые слова: фенотипические признаки, ИСОД МВД России, автоматизированная обработка данных, информационная система, биометрические методы идентификации личности, защита информации

Для цитирования: Благов В.О., Митюшин Д.А., Пучков Г.Ю., Ремизова Е.В. Основные направления создания информационной системы для идентификации личности по фенотипическим признакам человека // Вестник РГГУ. Серия «Информатика. Информационная безопасность. Математика». 2021. № 2. С. 37–47. DOI: 10.28995/2686-679X-2021-2-37-47

The main directions of creating an information system for personal identification based on phenotypic signs of a person

Vladislav O. Blagov

*Scientific and Production Association Special Equipment and Telecoms
of the Ministry of the Internal Affairs of the Russian Federation,
Moscow, Russia, stis@mvd.gov.ru*

Dmitry A. Mityushin

*Russian State University for the Humanities,
Moscow, Russia, dalex@inbox.ru*

Gennadiy Yu. Puchkov

*Scientific and Production Association Special Equipment and Telecoms
of the Ministry of the Internal Affairs of the Russian Federation,
Moscow, Russia, stis@mvd.gov.ru*

Elena V. Remizova

*Scientific and Production Association Special Equipment and Telecoms
of the Ministry of the Internal Affairs of the Russian Federation,
Moscow, Russia, alrem76@mail.ru*

Abstract. The tempestuous and rapid development of biometric technologies based on both the static and dynamic identification signs of a person could not bypass one of the important spheres of life in modern society – the fight against crime. Most of the solutions related to personal identification by papillary patterns, iris and retina of the eye, drawing of veins on the arm and thermographic face cards are widely used in the access control and management systems, systems for protecting the automated information systems from unauthorized access to information. At the same time, the use of those signs in the investigation and disclosure of crimes is just beginning to be introduced into the activities of the law enforcement agencies of the Russian Federation. The use of the information systems in that area can significantly increase the effectiveness of the fight against crime, especially crimes against the person. Of particular interest is the use of data on the phenotypic signs of the suspect in the investigation of crimes, i.e. information about his height, weight, hair color, eyes, skin tone, and blood group. The article discusses the basic principles of creating an automated information system for identifying a person based on biological material left by persons who were present at the crime scene. It defines the complex of organizational and scientific issues that need to be solved when creating a system, ensuring its information security and software implementation. Also it proposes an algorithm for two-stage searching the information stored in the databases of the ISOD (UDS) services, based on modern data processing methods.

Keywords: phenotypic signs, ISOD (UDS) of the Ministry of Internal Affairs of Russia, automated data processing, information system, biometric methods of personal identification, data protection

For citation: Blagov, V.O., Mityushin, D.A., Puchkov, G.Yu., and Remizova, E.V. (2021), “The main directions of creating an information system for personal identification based on phenotypic signs of a person”, *RSUH/RGGU Bulletin. “Informatics. Information security. Mathematics”* Series, no. 2, pp. 37–47, DOI: 10.28995/2686-679X-2021-2-37-47

Введение

В настоящее время для идентификации личности человека широко используются биометрические технологии, основанные на принципах дактилоскопии. Для обеспечения задач в области

правоохранительной деятельности, борьбы с преступностью и террористическими проявлениями созданы и эффективно используются автоматизированные дактилоскопические информационные системы мирового масштаба.

В рамках работ по созданию и дальнейшему развитию единой системы информационно-аналитического обеспечения деятельности МВД России (далее – ИСОД МВД России, ИСОД) проводится комплекс мероприятий по поэтапной централизации учетов дактилоскопической информации на базе центра обработки данных ИСОД МВД России.

Кроме того, в системе МВД России ведутся мероприятия по созданию систем автоматизированной биометрической идентификации личности по изображению лица, проводятся работы по поиску перспективных решений в области биометрической идентификации личности по голосу, радужной оболочке глаза.

В то же время исследования в области определения перспективных методов идентификации личности по индивидуальным фенотипическим признакам человека (далее – ИФП) в МВД России не проводились. Вместе с тем активное внедрение вычислительной техники и применение современных машинных алгоритмов и статистических методов обработки больших данных открывают широкие перспективы в данной области.

Создание автоматизированных систем идентификации личности по индивидуальным фенотипическим признакам

Создание автоматизированных систем идентификации личности по ИФП человека позволит существенно повысить эффективность деятельности органов внутренних дел Российской Федерации по раскрытию и профилактике преступлений за счет:

- получения дополнительного (помимо дактилоскопических данных) источника информации о людях, находившихся на месте преступления или происшествия (биологический материал человека);
- повышения уровня достоверности идентификации личности в результате увеличения банка персональных данных гражданина путем добавления в него сведений о его ИФП;
- комплексного использования процедур идентификации личности при помощи персональных данных об их ИФП и процедур обработки информации, используемой для решения

задач оперативно-розыскной деятельности и расследования преступлений и правонарушений;

- интеграции информационных систем органов государственной власти, обрабатывающих биометрическую информацию.

Учитывая объем данных об ИФП человека и количество граждан в нашей стране, а также количество прибывающих в страну иностранных граждан, можно сделать вывод, что для их хранения и обработки потребуются создание автоматизированной информационной системы, базирующейся на технологиях искусственного интеллекта и обработки больших данных (далее – ИС ИФП).

Для создания такой системы необходимо обеспечить решение следующих задач:

- разработать научно-техническое и финансовое обоснования основных направлений создания ИС ИФП;
- разработать структуру и определить функциональные возможности ИС ИФП;
- на базе современных технологий хранения данных сформировать базу персональных данных об ИФП граждан Российской Федерации, иностранных граждан и лиц без гражданства с акцентом использования ее в комплексе с информацией, используемой для решения задач оперативно-розыскной деятельности и расследования преступлений и правонарушений;
- разработать алгоритмы и специальное программное обеспечение для распознавания и идентификации неопознанных трупов, разыскиваемых лиц и лиц, представляющих оперативный интерес, по их ИФП;
- разработать нормативно-правовую базу, регламентирующую вопросы создания и функционирования ИС ИФП;
- осуществить сбор, обработку и хранение посредством ИС ИФП персональных данных об ИФП;
- подготовить дата-сети для хранения данных об ИФП в виде, пригодном для их обработки при помощи процедур машинного обучения;
- разработать механизм предоставления органам государственной власти доступа к данным об ИФП при решении задач обеспечения национальной безопасности, общественного порядка и противодействия преступности, обеспечения защиты прав, свобод и законных интересов граждан Российской Федерации, иностранных граждан и лиц без гражданства;
- разработать механизмы интеграции ИС ИФП с национальной системой биометрической идентификации личности и информационными системами органов государственной власти, обрабатывающими биометрическую информацию;

- обеспечить при помощи ИС ИФП возможность доступа, автоматизированного формирования и обработки массива биометрической информации в рамках национальной системы биометрической идентификации личности;
- добиться осуществления эффективного межведомственного и межгосударственного взаимодействия в рамках национальной системы биометрической идентификации личности;
- разработать и сертифицировать программные средства для обеспечения системы информационной безопасности ИС ИФП;
- создать отечественный реестр предприятий-изготовителей и разработчиков оборудования и программного обеспечения, связанного с созданием и развитием инструментов для биометрической идентификации личности.

Немаловажное значение для создания и использования ИС ИФП имеет и комплекс научных и образовательных мероприятий, к которым необходимо отнести:

- проведение анализа передовых достижений в области идентификации личности при помощи персональных данных об ИФП человека с целью расширения области применения биометрических технологий;
- формирование научно-технической базы по данному направлению на основе планирования, проведения и внедрения результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, учета передового опыта в области биометрической идентификации;
- выработку механизмов реализации внедрения ИС ИФП в деятельность органов внутренних дел Российской Федерации и государственной власти;
- преимущественное использование при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию ИС ИФП отечественной элементной базы и программных продуктов с открытыми кодами;
- сертификацию программных изделий, входящих в состав ИС ИФП, в необходимых системах сертификации средств защиты информации (ФСТЭК России и ФСБ России) по требованиям безопасности информации;
- развитие системы подготовки и повышения квалификации сотрудников органов внутренних дел Российской Федерации и государственной власти в области биометрической идентификации на базе ведомственных образовательных организаций;

- разработку программ обучения, методических пособий, инструкций, учебных и справочных материалов в области биометрической идентификации.

*Защита информации
в информационной системе
индивидуальных фенотипических
признаков человека*

При разработке ИС ИФП важное значение будет иметь то, на каком оборудовании и при помощи каких программных инструментов она будет реализована.

Использование зарубежных программных инструментов в данном случае запрещено, следовательно, разработка должна производиться с использованием отечественных. При этом необходимо обеспечить корректную работу программного обеспечения клиентских автоматизированных рабочих мест ИС ИФП с процессорами архитектуры x86, ARM, а серверного – с процессорами архитектуры x86 и VLIW.

Работа данных программ должна осуществляться под управлением операционных систем, входящих в Единый реестр российских программ для электронно-вычислительных машин и баз данных Минкомсвязи России.

При разработке ИС ИФП важное значение имеют задачи обеспечения информационной безопасности.

Очевидно, что ИС ИФП необходимо реализовывать в виде сервиса ИСОД МВД России (далее – сервис ИФП), в связи с чем и база данных ИФП граждан должна быть создана в виде составной части хранилища данных ИСОД МВД России, т. е. в виде одного из облаков облачной структуры ИСОД.

Следовательно, защита информации в ИС ИФП должна быть реализована с учетом архитектуры подсистемы обеспечения информационной безопасности ИСОД МВД России (далее – ПОИБ), а также средствами защиты информации, реализующими ПОИБ, и собственными механизмами технологического решения¹.

Соответственно контроль доступа к ресурсам должен быть применим к каждому объекту и каждому субъекту в соответствии

¹ Базовые требования, предъявляемые к технологическим решениям, применяемым при создании, эксплуатации и развитии ИСОД МВД России и ее компонентов. Информационное письмо ДИТСиЗИ МВД России, 2020 г.

с установленными ролями пользователей. Разграничение прав доступа к ресурсам должно осуществляться собственными и (или) наложенными механизмами защиты информации, а идентификация и аутентификация администраторов и пользователей должна осуществляться только посредством сервиса управления доступом к информационным системам и ресурсам ИСОД МВД России (далее – СУДИС).

Все события безопасности должны передаваться в СУДИС, а технологические решения, которые будут использоваться для создания ИС ИФП, должны содержать средства регистрации и хранения событий обращений субъектов к объектам доступа, идентификации, аутентификации и авторизации пользователей и иные значимые события предоставления или изменения данных ресурса в течение заданного периода времени. При этом межкомпонентное взаимодействие технологических решений необходимо осуществлять по защищенным протоколам.

При использовании в ИС ИФП готовых сертифицированных средств криптографической защиты информации (далее – СКЗИ) необходимо проведение работ (тематических исследований) по оценке влияния аппаратных, программно-аппаратных и программных средств ИС ИФП, совместно с которыми предполагается штатное функционирование предлагаемых СКЗИ, на выполнение предъявленных к ним требований в соответствии с приказом ФСБ РФ от 09.02.2005 № 66².

В целом система защиты информации должна выполнять функции защиты во всех процессах обработки, хранения и передачи информации на всех объектах, в том числе при проведении ремонтных и регламентных работ в соответствии с моделями угроз и моделями нарушителей ИСОД МВД России.

Одной из ключевых задач при создании ИС ИФП является обеспечение надлежащего хранения данных об ИФП граждан. Анализ современных тенденций в области хранения данных [Горбенко 2019; Колбин 2020] показывает³, что на современном этапе перспективным направлением является использование облачных хранилищ данных, которые размещаются на мощных платформах, обеспечивающих широкие возможности по обработке данных с помощью современных способов обработки информации, осно-

² Приказ ФСБ РФ от 09.02.2005 № 66 «Об утверждении Положения о разработке, производстве, реализации и эксплуатации шифровальных (криптографических) средств защиты информации (Положение ПКЗ-2005)».

³ Amazon S3 [Электронный ресурс]. URL https://aws.amazon.com/ru/s3/?nc2=h_ql_prod_fs_s3 (дата обращения 3 марта 2021).

ванных на возможностях искусственного интеллекта и технологий больших данных.

В настоящее время основным способом хранения данных в облачных хранилищах является аренда серверного (дискового) пространства у коммерческого провайдера, стоимость которой зависит от объема сохраняемых данных и набора услуг для их обработки.

Несомненно, данный подход является наиболее оптимальным для бизнес-структур и предприятий, использующих в своей деятельности большие объемы информации и расчеты, требующие задействования значительных вычислительных мощностей серверного оборудования.

Вместе с тем для формирования хранилищ данных об ИФП человека, которые ориентированы на использование в подразделениях МВД России, такой подход не годится, так как в данном случае сложно обеспечить конфиденциальность информации и ее сохранность от утечки (хищения), поскольку современные топовые облачные платформы (Амазон⁴, Huawei Dorado V6⁵ и др.) принадлежат иностранным агентам⁶, а облачные хранилища, предлагаемые российскими компаниями, созданы на базе зарубежного программного обеспечения.

Тем не менее представляется целесообразным при разработке хранилищ данных об ИФП человека использовать общие подходы и тенденции, которые широко применяются в данной области на современном этапе. Поясним подробнее.

В настоящее время ИСОД МВД России функционирует как совокупность автономных сервисов различных служб, входящих в состав МВД России. Как правило, каждый сервис, предназначенный для обработки информации, включает в свой состав собственную информационную базу данных (далее – ИБД), недоступную для пользователей других сервисов ИСОД.

⁴ Amazon S3 [Электронный ресурс]. URL https://aws.amazon.com/ru/s3/?nc2=h_ql_prod_fs_s3 (дата обращения 3 марта 2021).

⁵ OceanStor Dorado V6. Высокоскоростная и надежная all-flash корпоративная система хранения данных на основе технологий ИИ [Электронный ресурс] // Huawei Technologies Co. URL <https://e.huawei.com/ru/products/storage/all-flash-storage/oceanstor-dorado-v6> (дата обращения 3 марта 2021).

⁶ OceanStor Dorado V3. Скоростная интеллектуальная флеш-система хранения данных [Электронный ресурс] // Huawei Technologies Co. URL <https://e.huawei.com/ru/products/storage/all-flash-storage> (дата обращения 3 марта 2021).

Заключение

Таким образом, в большинстве случаев получить в автоматизированном режиме данные из ИБД одного сервиса для использования их в другом можно, только если при разработке данных сервисов была предусмотрена возможность их электронного взаимодействия. В противном случае требуется доработка существующих сервисов ИСОД. Вместе с тем современные способы обработки информации (далее – СОИ) позволяют проводить анализ и обработку всей разнородной информации, хранящейся в облачных хранилищах большого объема.

Учитывая изложенное, при разработке ИС ИФП представляется целесообразным реализовать современные СОИ для обеспечения следующего алгоритма получения оперативной информации о лицах, присутствовавших на месте преступления:

- на первом этапе поиска по данным об ИФП человека, полученным в результате анализа биологического материала, найденного на месте преступления, и данным, хранящимся в ИБД ИС ИФП, устанавливается личность гражданина;
- на втором этапе поиска в результате обработки данных об этом гражданине, имеющихся в ИБД других сервисов ИСОД, формируется его криминальный облик, определяются места его предполагаемого местонахождения и степень его опасности.

Использование для этих целей возможностей искусственного интеллекта и технологий обработки больших данных позволит ощутимо поднять уровень эффективности работ в области борьбы с преступностью и профилактики правонарушений.

Литература

- Горбенко 2019 – *Горбенко И.* Архитектура хранилищ данных: традиционная и облачная [Электронный ресурс] // *Habr*. URL: <https://habr.com/ru/post/441538/> (дата обращения 3 марта 2021).
- Колбин 2020 – *Колбин Е.* Облачные технологии: что это и как использовать бизнесу [Электронный ресурс] // Scrum-студия Сибириск. URL: <https://blog.sibirix.ru/2021/01/25/tech-clouds/> (дата обращения 3 марта 2021).

References

- Gorbenko, I. (2019), "Arkhitektura khranilishch dannykh: traditsionnaya i oblachnaya" [Data warehouse architecture. Traditional and the cloud one], *Habr*, [Online], available at: <https://habr.com/ru/post/441538/> (Accessed 3 March 2021).

Kolbin, E. (2020), "Oblachnyye tekhnologii: chto eto i kak ispol'zovat' biznesu" [Cloud technologies. What it is and how to use it for business], *Scrum-studio Sibirix*, [Online], available at: <https://blog.sibirix.ru/2021/01/25/tech-clouds/> (Accessed 3 March 2021).

Информация об авторах

Владислав О. Благов, научно-производственное объединение «Специальная техника и связь», Москва, Россия; 111024, Россия, Москва, ул. Пруд Ключики, д. 2; stis@mvd.gov.ru

Дмитрий А. Митюшин, кандидат технических наук, Российский государственный гуманитарный университет, Москва, Россия; 125047, Россия, Москва, Миусская пл., д. 6; dalex@inbox.ru

Геннадий Ю. Пучков, кандидат технических наук, научно-производственное объединение «Специальная техника и связь», Москва, Россия; 111024, Россия, Москва, ул. Пруд Ключики, д. 2; stis@mvd.gov.ru

Елена В. Ремизова, научно-производственное объединение «Специальная техника и связь», Москва, Россия; 111024, Россия, Москва, ул. Пруд Ключики, д. 2; alrem76@mail.ru

Information about the authors

Vladislav O. Blagov, Scientific and Production Association Special Equipment and Telecoms, Moscow, Russia; bld. 2, Prud Klyuchiki Str., Moscow, Russia, 111024; stis@mvd.gov.ru

Dmitry A. Mityushin, Cand. of Sci. (Engineering), Russian State University for the Humanities, Moscow, Russia; bld. 6, Miusskaya Sq., Moscow, Russia, 125993; dalex@inbox.ru

Gennadiy Y. Puchkov, Cand. of Sci. (Engineering), Scientific and Production Association Special Equipment and Telecoms, Moscow, Russia; bld. 2, Prud Klyuchiki Str., Moscow, Russia, 111024; stis@mvd.gov.ru.

Elena V. Remizova, Scientific and Production Association Special Equipment and Telecoms, Moscow, Russia; bld. 2, Prud Klyuchiki Str., Moscow, Russia, 111024; alrem76@mail.ru.

Математика

УДК 004.5

DOI: 10.28995/2686-679X-2021-2-48-67

Математическая модель нейрокомпьютерного интерфейса на основе анализа вызванных потенциалов Р300

Сергей А. Обухов

*Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия, osergey@live.com*

Валерий П. Степанов

*Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия, vapals@yandex.ru*

Игорь В. Рудаков

*Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия, irudakov@yandex.ru*

Аннотация. Метод вызванных потенциалов (ВП) использует регистрацию биоэлектрических реакций мозга в ответ на внешнее раздражение или при выполнении когнитивных задач. Целью работы является создание математической модели системы обнаружения и классификации вызванных потенциалов на электроэнцефалограмме (ЭЭГ). Основными проблемами машинного обнаружения ВП являются артефакты записи ЭЭГ и высокая изменчивость потенциалов. Предложен и реализован алгоритм обнаружения и классификации ВП, состоящий из трех этапов. На предварительном этапе для удаления шумов и неинформативных компонентов ЭЭГ используются частотно-временные и пространственные преобразования сигналов – набор частотных фильтров Баттерворта, линейная композиция и усреднение регистрируемых сигналов от различных сенсоров. На следующем этапе происходит непосредственная фиксация и усреднение вызванных потенциалов. На заключительном этапе для уменьшения размерности задачи производится формирование вектора информативных признаков. Параметризованный образ подается на вход бинарного классификатора. Для построения классификатора применяется метод опорных векторов. В ходе исследования проведена оптимизация регуляризационного параметра C классификатора с помощью оценки скользящего контроля. Предложенное решение применимо для организации человеко-машинного взаимодействия, в медицинских процедурах с биологической обратной связью.

© Обухов С.А., Степанов В.П., Рудаков И.В., 2021

Ключевые слова: нейрокомпьютерный интерфейс, НКИ, вызванные потенциалы, ВП, P300

Для цитирования: Обухов С.А., Степанов В.П., Рудаков И.В. Математическая модель нейрокомпьютерного интерфейса на основе анализа вызванных потенциалов P300 // Вестник РГГУ. Серия «Информатика. Информационная безопасность. Математика». 2021. № 2. С. 48–67. DOI: 10.28995/2686-679X-2021-2-48-67

Mathematical model of brain-computer interface based on the analysis of P300 event related potentials

Sergey A. Obukhov

*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia,
osergey@live.com*

Valery P. Stepanov

*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia,
vapals@yandex.ru*

Igor V. Rudakov

*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia,
irudakov@yandex.ru*

Abstract. The evoked potentials (EP) method consists in recording bioelectric reactions of the brain in response to external stimulation or while performing cognitive tasks. The goal of the work is to develop a mathematical model of the system for detection and classification of evoked potentials on the electroencephalogram (EEG). The main odd of the machine EP detection are artifacts from EEG recordings and the high variability of potentials. EP detection and classification algorithm includes three stages. At the preliminary stage, the frequency-time and spatial signal transformations – a set of Butterworth frequency filters, linear composition and averaging of the recorded signals from different sensors are used to remove noise and uninformative EEG components. The next step is the direct fixation and averaging of the evoked potentials. At the final stage, to reduce the dimension of the problem, the information features vector is formed. The parameterized image is used as input of the binary classifier. The support vector method is used to construct the classifier. During the study, the optimization of the regularization C parameter of the classifier was carried out using the estimation of sliding control. The proposed solution is useful for human-machine interaction and for medical procedures with biofeedback.

Keywords: brain-computer interface, BCI, evoked potentials, EP, P300

For citation: Obukhov, S.A., Stepanov, V.P. and Rudakov, I.V. (2021), “Mathematical model of brain-computer interface based on the analysis of P300 event related potentials”, *RSUH/RGGU Bulletin. “Information Science. Information Security. Mathematics” Series*, no. 2, pp. 48–67, DOI: 10.28995/2686-679X-2021-2-48-67

Введение

Нейрокомпьютерный интерфейс (НКИ) предназначен для обмена информацией между мозгом и электронным устройством. НКИ представляет собой систему, в которой электрическая активность мозга измеряется и преобразуется в управляющий сигнал для использования в ЭВМ при решении задач коммуникации и контроля [Сидоренко 2016].

Такая технология применима для решения множества задач в различных областях человеческой деятельности. Так, нейрокомпьютерные интерфейсы способны частично восстанавливать зрение людям, потерявшим его в результате какой-либо травмы во взрослом состоянии. Следует отметить работы William Dobelle – он создал устройство, состоящее из камеры, вмонтированной в очки, и матрицы электродов, имплантированных в зрительную кору испытуемого [Dobelle 2003]. Еще одно применение НКИ – создание механических протезов конечностей, которые управляются сигналами, исходящими непосредственно от головного мозга. Кроме медицинских целей, возможно применение данных интерфейсов в образовательной отрасли, индустрии игр, системах «умный дом» и интернете вещей. НКИ является наиболее естественным и удобным способом взаимодействия человека и ЭВМ [Ворона 2015].

Постановка задачи

В основе реализации большинства интерфейсов «компьютер-мозг» лежит метод электроэнцефалографии – неинвазивного исследования функционального состояния головного мозга путем регистрации его биоэлектрической активности (рис. 1). На коже головы обследуемого закрепляются специальные электроды, соединенные вместе в электроэнцефалографический шлем. Для лучшего контакта кожи и электрода и уменьшения сопротивления чаще всего применяется специальный жидкий электропроводящий гель. Каждый электрод подключен к электроэнцефалографу – прибору, осуществляющему усиление и аналого-цифровое преобразование

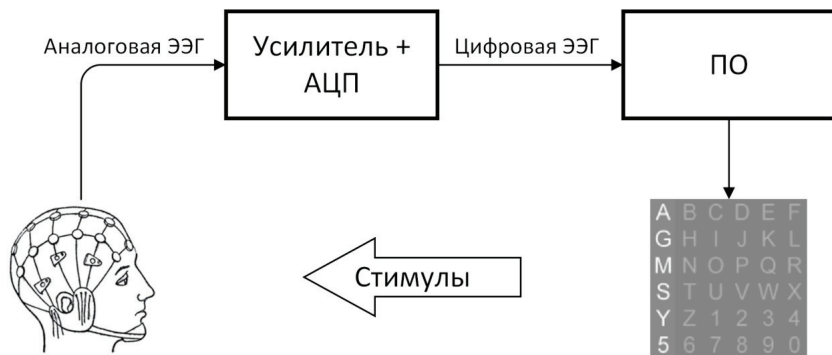


Рис. 1. Общая схема организации НКИ

сигнала. Зачастую современные цифровые устройства регистрации ЭЭГ подключаются к компьютеру с помощью стандартной последовательной шины USB.

Дальнейшая обработка сигнала производится программным обеспечением компьютера. Целью блока обработки сигналов является детектирование команды мозга и ответное действие компьютера в зависимости от типа команды. Как правило, ответное действие проявляется в виде электрической стимуляции мозга, информационного сообщения на экране компьютера или звукового сигнала [Лебедев 2016].

К программному обеспечению применяются следующие требования:

- необходимо приемлемое время отклика при существенном объеме обрабатываемых данных – 64 канала \times 1000 отсчетов \times 4 байта в секунду в режиме псевдореального времени;
- высокая точность определения и классификации ВП при разумном времени обучения.

Математическая постановка задачи

Имеется оцифрованная многоканальная ЭЭГ – последовательность измерений разности потенциалов между определенными точками на коже головы человека, произведенных через равные промежутки времени. Цифровую ЭЭГ можно задать многомерной дискретной функцией $X(t, k)$ – значение разности потенциалов

в момент времени t на электроде (канале) номер k . Также дано множество точек на оси времени $\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ – моменты предъявления стимулов.

Требуется найти разбиение множества вызванных потенциалов $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ на два подмножества C_0 – незначимые ВП и C_1 – значимые ВП. Каждый i -й ВП представляется в виде дискретной функции $P_i(t, k)$, где t – время относительно t_p , k – номер канала.

Алгоритм решения

Разделим алгоритм решения поставленной задачи на три последовательных этапа.

1. Этап предварительной обработки. Для удаления шумов и неинформативных компонентов ЭЭГ используются частотно-временные и пространственные преобразования сигналов ЭЭГ – набор частотных фильтров Баттерворта, линейная композиция и усреднение регистрируемых сигналов от различных сенсоров.

2. Этап фиксации и усреднения ВП. Выборка участков ЭЭГ, прилегающих к точкам активации раздражителя, и их последующее усреднение.

3. Этап классификации. Производится формирование вектора информативных признаков. Параметризованный образ используется бинарным классификатором.

Этап предварительной обработки состоит из четырех шагов.

Шаг 1. Для локализации разности потенциалов в определенной области пространства и удаления синфазной помехи производится расчет электрокардиографических отведений. Отведение представляет собой линейную композицию сигналов от нескольких электродов. При этом распространены несколько схем отведений.

Схема с общим усредненным референтом [Zavgorodnyaya 2014]:

$$Y(t, k) = X(t, k) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(t, i),$$

где $X(t, k)$ – входные данные;

$Y(t, k)$ – выходные данные;

N – общее количество каналов.

Лапласиан:

$$Y(t, k) = X(t, k) - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 X(t, lap(i, k)),$$

где $X(t, k)$ – входные данные;
 $Y(t, k)$ – выходные данные;
 $lap(i, k)$ – номера смежных электродов.

На регистрируемой ЭЭГ присутствуют искажения, вызванные шумами различного характера [Ledyayev 2007]: миографическая интерференция – высокочастотные помехи при активности мышц тела пациента, особенно движения глаз и скул, кардиографическая интерференция, вызванная работой сердца, низкочастотный дрейф изолинии из-за плохого контакта между электродом усилителя и кожей обследуемого либо плохой обработки ее поверхности, наводка сети электропитания (50/60 Гц).

Для устранения помех и увеличения отношения «сигнал/шум» исследуемого сигнала применяют цепочку линейных частотных фильтров. Эффективность этого метода обусловлена локализацией специфических шумов в определенной полосе частот. При этом диагностическую ценность в электроэнцефалографии имеет сигнал в полосе частот от 0,5 до 40 Гц – дельта-, тета-, альфа- и бета-ритмы.

Для частотной фильтрации могут быть использованы следующие фильтры: фильтр Баттерворта, фильтр Бесселя, фильтр Чебышева, фильтр Гаусса, эллиптический фильтр. Наиболее простой в реализации и не имеющий резких выбросов на амплитудно-частотной характеристике – фильтр Баттерворта.

Фильтр второго порядка с бесконечной импульсной характеристикой описывается уравнением:

$$Y(t, k) = b_0 X(t, k) + b_1 X(t-1, k) + b_2 X(t-2, k) + a_1 Y(t-1, k) + a_2 Y(t-2, k),$$

где $X(t, k)$ – входные данные;
 $Y(t, k)$ – выходные данные;
 b_0, \dots, a_2 – коэффициенты, зависящие от типа фильтра и нормированной частоты среза f .

Шаг 2. Применение фильтра верхних частот Баттерворта второго порядка, коэффициенты рассчитываются по формулам:

$$b_0 = b_2 = \frac{1}{1 + \sqrt{b + b^2}}; b_1 = \frac{-2}{1 + \sqrt{b + b^2}}$$

$$a_1 = \frac{2(b^2 - 1)}{1 + \sqrt{b + b^2}}; a_2 = \frac{1 - \sqrt{b + b^2}}{1 + \sqrt{b + b^2}}$$

$$b = \tan(\pi f)$$

Шаг 3. Применение фильтра нижних частот Баттерворта второго порядка, используются равенства:

$$b_0 = b_2 = \frac{b^2}{1 + \sqrt{b + b^2}}; b_1 = \frac{2}{1 + \sqrt{b + b^2}}$$

$$a_1 = \frac{2(b_2 - 1)}{1 + \sqrt{b + b^2}}; a_2 = \frac{1 - \sqrt{b + b^2}}{1 + \sqrt{b + b^2}}$$

$$b = \tan(\pi f)$$

Шаг 4. Использование узкополосного режекторного фильтра [Гудкова 2010], для него справедливо:

$$b_0 = b_2 = 1 - \mu$$


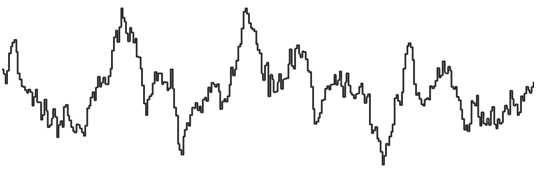
$$b_1 = a_2 = \cos(2\pi f)(2\mu - 2); a_1 = 2 - 2\mu$$

$$\mu = 0,005$$


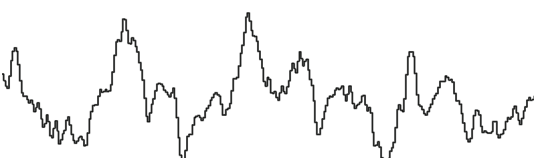
Последовательное преобразование типового участка ЭЭГ по одному из отведений приведено в табл. 1.

Таблица 1

Изменение ЭЭГ-отведения после выполнения шагов

Шаги	ЭЭГ-отведение после выполнения шага
1. Формирование отведения	
2. Фильтр верхних частот 0,5 Гц	

Окончание табл. 1

Шаги	ЭЭГ-отведение после выполнения шага
3. Фильтр нижних частот 40 Гц	
4. Режекторный фильтр 50 Гц	

Этап фиксации и усреднения вызванных потенциалов состоит из трех шагов. Он предназначен для выборки и усреднения участков ЭЭГ (эпох), прилегающих к точкам активации раздражителя [Levine, Huggins, BeMent, Kushwaha, Schuh 2000].

Шаг 1. Пусть в моменты времени t_1, t_2, \dots, t_N происходила активация раздражителя, тогда эпохи ограничивают участки с вызванным потенциалом:

$$P_i(t, k) = X(t + t_i, k),$$

где $t = 0$;

$i = 1..N$;

D – длительность эпохи;

N – количество ВП.

Шаг 2. Из расчета исключаются вызванные потенциалы, амплитуда которых превышает некоторое пороговое значение T :

$$\max_{t=t_1..t_2} P(t, k) \geq T$$

Исключенные вызванные потенциалы могут содержать сильно зашумленные участки ЭЭГ-сигнала.

Шаг 3. Вызванные потенциалы для каждого канала усредняются. Условно сигнал в каждой эпохе можно разложить на две составляющие, описываемые формулой:

$$P_i(t, k) = S(t, k) + G_i(t, k),$$

где $S(t, k)$ – устойчивый ЭЭГ-паттерн вызванного потенциала;
 $G_i(t, k)$ – случайная составляющая, например белый гауссов шум.

При усреднении эпох выполняется равенство:

$$P(t, k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i(t, k) = S(t, k) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G_i(t, k)$$

Заметим, что если $G_i(t, k)$ – белый гауссов шум, то мощность примерно равна мощности $G_i(t, k)$ для любого i , поэтому отношение «сигнал/шум» для $P_i(t, k)$ будет в N раз лучше, чем отношение «сигнал/шум» для $P(t, k)$. Таким образом, усреднение эпох с вызванными потенциалами можно рассматривать как очередной этап фильтрации.

Этап классификации состоит из трех шагов.

Шаг 1. Параметризация сигнала – извлечение численных свойств фрагмента ЭЭГ, необходима для повышения информативности образа, снижения размерности входного пространства, повышения степени обобщения [Карловский 2009]. Параметризованный образ, представленный в виде вектора информативных признаков $F = (F_1, \dots, F_M)$, подается на вход классификатора:

$$F_q = f_q(P(t, k)) \\ t = 1..D; k = 1..N,$$

где f_q – признак, отображение $f: P \rightarrow Q$;

P – множество фрагментов ЭЭГ;

Q – множество допустимых значений информативного признака;

$q = 1..M$ – номер параметра;

M – размерность вектора F ;

D – длительность усредненного ВП;

N – количество отведений.

В качестве информативных параметров часто выступают [Lotte, Congedo, L'escuyer, Lamarche, Arnaldi 2007]:

- амплитуда сигнала на отрезке $[t_1, t_2]$:

$$Amp(k) = \max_{t=t_1, t_2} P(t, k) - \min_{t=t_1, t_2} P(t, k)$$

- мощность сигнала на отрезке $[t_1, t_2]$:

$$Pow(k) = \sum_{i=t_1}^{t_2} |P(i, k)|$$

- мощность сигнала в полосе частот $[f_1, f_2]$:

$$PowBnd(k) = \sum_{i=f_1}^{f_2} FFT(P(t, k), i)$$

- авторегрессионные параметры:

$$V_q = const + \sum_{i=1}^M g_i V_{q-1} + \varepsilon_t,$$

где q – номер параметра;
 $g_1 \dots g_M$ – коэффициенты авторегрессии;
 $const$ – постоянная;
 ε_t – белый шум.

Шаг 2. Среди всех каналов $k = 1..N$ выбираются те, для которых вычисленные параметры проявляются наиболее ярко, векторы информативных признаков для них объединяются в один.

$$Amp(k) - \max_k$$

Шаг 3. Для определения типа ВП по вектору информативных признаков используется ряд классификаторов [Krusienski 2006]:

$$c = a(\mathbf{F}),$$

где c – класс объекта; часто используют бинарные классификаторы, для которых $c \in \{-1, +1\}$;
 a – алгоритм классификации;
 \mathbf{F} – вектор информативных признаков.

Формируются два набора входных данных [Карловский 2009]:

1. Обучающая выборка – вызванные потенциалы, поступающие на вход классификатора, имеют изначально известную ассоциированную с потенциалом метку. Классификатор пытается построить на основе входных данных модель ВП, характерного для каждого класса.

2. Тестовая выборка – предназначена для оценки качества обучения данного классификатора, выбора модели, обладающей наилучшим соотношением степени обучения и обобщения, а также выбора момента останова классификатора.

Для построения классификаторов чаще всего применяют линейный дискриминантный анализ [Fisher 1936] или метод опорных векторов [Vapnik 1999].

При помощи метода линейного дискриминантного анализа выбирают проекцию пространства изображений на пространство признаков таким образом, чтобы минимизировать внутриклассовое и максимизировать межклассовое расстояние в пространстве признаков. В этих методах предполагается, что классы линейно разделимы.

Основная идея метода опорных векторов – перевод исходных векторов в пространство более высокой размерности и поиск разделяющей гиперплоскости с максимальным зазором в этом пространстве. Две параллельные гиперплоскости строятся по обеим сторонам гиперплоскости, разделяющей классы. Разделяющей гиперплоскостью будет гиперплоскость, максимизирующая расстояние до двух параллельных гиперплоскостей.

Программная реализация алгоритма

При построении математической модели электроэнцефалограмма задавалась в виде двумерной функции $v = X(t, k)$, где v есть значение разности потенциалов в момент времени t на электроде номер k . Представим ЭЭГ в виде набора классов объектно-ориентированной парадигмы программирования, связанных между собой отношениями ассоциации и композиции. Эти классы организуют модель данных, которая лежит в основе логического дизайна системы и отражает рассматриваемую предметную область.

Обобщим ЭЭГ до более общего понятия записи, содержащей набор сигналов или потоков сигналов. Под записью подразумевается электроэнцефалограмма, электрокардиограмма или любой другой набор регистрируемых биосигналов человека. Диаграмма классов для хранения записи представлена на рис. 2.

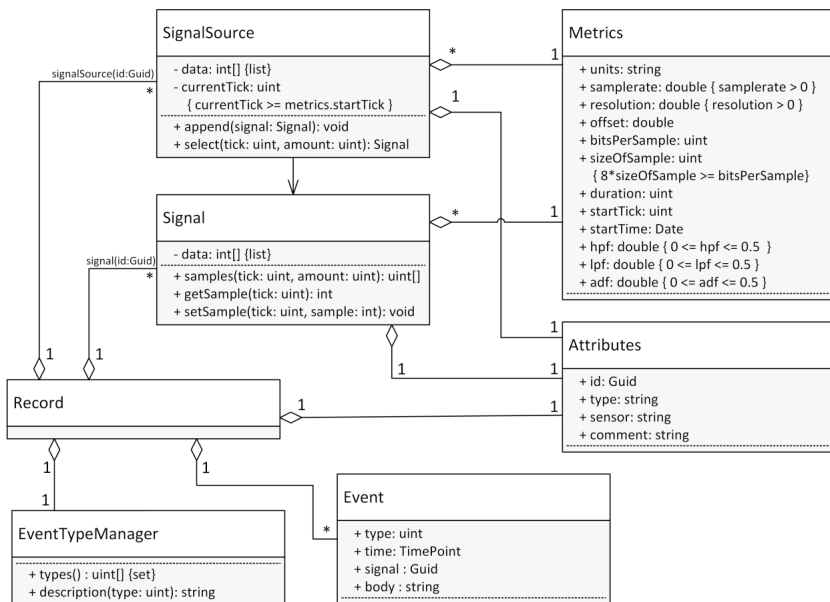


Рис. 2. Диаграмма классов для хранения ЭЭГ

К классам, реализующим модель данных, применяется ряд требований.

1. Соккрытие внутренней структуры данных для защиты элементов записи от внешних пользователей соответствующих классов – полная инкапсуляция.

2. Совместная работа с объектами данных классов из нескольких потоков выполнения. Многопоточный доступ к данным организуется по принципу монитора Хоара.

3. Быстрое добавление и выборка произвольного непрерывного участка сигнала из общего потока отсчетов регистрируемого сигнала. Наилучшей производительностью для отсчетов в оперативной памяти обладают следующие простые в реализации структуры данных: динамический массив и циклический буфер заданного размера на основе динамического массива.

4. Возможность пометить отчет как недостоверный. В процессе обработки или передачи по вычислительной сети некоторые отсчеты могут пропасть или исказиться, такие отсчеты будем считать недостоверными.

5. Хранение метаданных о сигнале и записи в целом: идентификатор, имя, тип (ЭЭГ, ЭКГ и т. д.), имя датчика или электрода,

с которым соотносится данный регистрируемый сигнал, комментарий пользователя в виде произвольной строки символов.

6. Хранение информации о физических частотно-временных параметрах сигнала, достаточных для восстановления из последовательности дискретных отсчетов исходного аналогового сигнала: единицы измерения, частота дискретизации, смещение, шаг квантования, размерность аналого-цифрового преобразователя, размер отсчета в байтах, количество отсчетов, нормированная частота среза фильтров.

7. Запись может содержать события – специальные отметки, привязанные к конкретной точке времени. События имеют время возникновения, тип, текстовое описание, идентификатор соответствующего сигнала. Примеры типов событий: R-пик на ЭКГ, ввод препарата, визуальный стимул, начало или конец этапа эксперимента.

Математическая модель программной системы включает в себя ряд этапов, каждый из которых представляет некоторое преобразование записи. Представим каждый из этих этапов в виде реализации интерфейса Component, который на вход получает некоторую запись и пользовательские настройки, а на выходе имеет некоторую преобразованную в соответствии с заданными настройками запись. Множество цепочек таких преобразователей можно представить в виде дерева, где дочерний компонент принимает на вход запись, полученную на выходе родительского компонента. Поясняющая диаграмма классов отображена на рис. 3.

Алгоритм решения задачи реализован в виде программного комплекса на языке C++. Разработанная система включает в себя ряд основных компонентов.

1. Компонент управления усилителем. Данный компонент служит для получения от усилителя набора сигналов, описывающих изменения по времени разности потенциалов на текущем электроде и специально помеченном земельном электроде. Этот набор данных отсылается на обработку следующему блоку – предварительной обработки. Компонент управления усилителем посылает управляющие команды устройству – старт и остановку съема данных, установку режима работы (количество подключенных электродов, частота дискретизации сигнала, коэффициент усиления).

2. Компонент предъявления стимулов – производит некоторое внешнее событие для активации вызванного потенциала. Наиболее широко используемыми раздражителями являются: визуальные для регистрации зрительных ВП, звуковые для регистрации аудиторных ВП и электрические для регистрации соматосенсорных ВП.

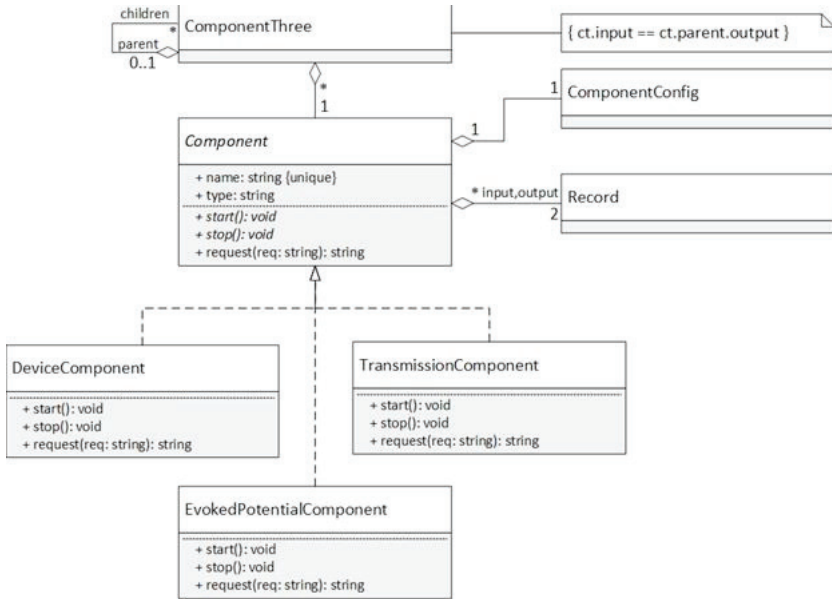


Рис. 3. Интерфейс Component и его связь с другими частями программной системы

3. Компонент предварительной обработки. В данном блоке полученный сигнал проходит через цепочку преобразователей, целью которых служит устранение части неинформативных данных и артефактов съема ЭЭГ, то есть фильтрации информации.

4. Компонент фиксации и усреднения вызванных потенциалов. Заметим, что ВП локализуется в некотором небольшом отрезке времени, следующем за моментом активации раздражителя. Выборкой данных отрезков из общего потока информации и их усреднением с целью увеличения соотношения «сигнал–шум» занимается рассматриваемый блок.

5. Компонент определения команды. В данном блоке по усредненному отрезку ВП строится вектор информативных признаков с целью уменьшения размерности задачи, после чего данный вектор подается на вход классификатора. Номер класса на выходе классификатора рассматривается как номер команды, которую отправил мозг человека.

6. Компонент визуализации – отображает электроэнцефалограмму, параметры съема данных и определенную на прошлом этапе команду.

Компоненты могут быть физически расположены на удаленных компьютерах, объединенных в вычислительную сеть. Для связи компонент используется специальное ПО промежуточного уровня. Компоненты могут быть реализованы с помощью различных технологий – программы написаны на разных языках программирования и исполняются на различных аппаратно-программных платформах.

Для ускорения преобразований, производимых на некоторых этапах работы алгоритма, используются современные средства многопоточности и векторизации вычислений центрального процессора через библиотеки Intel Performance Primitives. Программный комплекс позволяет в режиме реального времени регистрировать и анализировать 128-канальную ЭЭГ частотой дискретизации до 100 КГц [Забодаев, Обухов 2018].

План проведения эксперимента

В исследовании принимали участие четверо мужчин в возрасте от 24 до 36 лет без выявленных заболеваний центральной нервной системы. Каждый из обследуемых провел четыре сессии эксперимента. Во время сессии человек сидит в расслабленном состоянии в офисном помещении при дневном освещении перед экраном монитора для предъявления стимулов на расстоянии 50–70 см от глаз.

На мониторе отображена таблица символов 6x6 (см. рис. 1). Каждая сессия состоит из 12 фаз подсветки для 12 различных символов, в итоге за 4 сессии используется каждый из 36 символов. Фаза подсветки включает в себя подсветку каждой из 6 строк и 6 столбцов таблицы 16 раз в случайном порядке, время подсветки – 125 м/с, время между подсветками – 125 м/с. Задачами обследуемого являются концентрация внимания на заданном символе и подсчет количества его подсветок в течение фазы – заданный символ должен быть подсвечен 32 раза. Фаза подсветки длится 48 с. Между фазами подсветки происходит фаза отдыха длительностью не менее 8 с.

Полученные результаты

В компоненте определения команды реализован классификатор на основе метода опорных векторов. Проведена оптимизация регуляризационного параметра C классификатора с помощью оценки

скользящего контроля. Выборка входных данных классификатора разбита на 16 непересекающихся блоков равной длины. Каждый блок поочередно становился тестовой выборкой, а остальные блоки – обучающей выборкой. Оценка скользящего контроля Q при заданном значении C получена усреднением ошибки на тестовой выборке для каждого блока.

График зависимости оценки от значения C представлен на рис. 4. Данная функция имеет минимум в точке $C = 10$. Качество классификации для данного значения регуляризационного параметра достигает 86,3%.

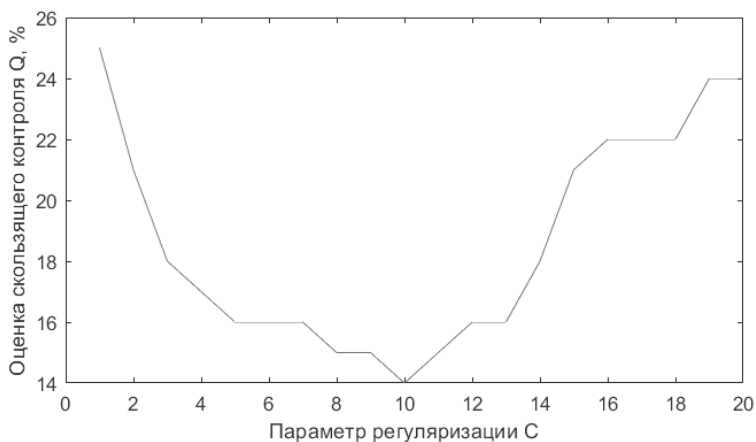


Рис. 4. Зависимость оценки скользящего контроля от параметра регуляризации

Применение гауссового ядра и радиальных базисных функций с различными значениями гиперпараметров не дали прироста в качестве классификации, что говорит о линейности оптимальной разделяющей поверхности между классами.

Реализованная программная система имеет достоверность детектирования выше существующих аналогов. Предложенное решение имеет большое практическое применение, используется для организации нейрокомпьютерного интерфейса, в медицинских процедурах с биологической обратной связью. Создание систем человеко-машинного взаимодействия посредством ментальной активности без использования мышц существенно повысит качество жизни людей с ограниченными возможностями [Обухов, Степанов 2019].

Заключение

1. Предложена математическая модель задачи обнаружения и классификации вызванных потенциалов P300 на электрокардиограмме.

2. Предложен алгоритм для решения рассматриваемой задачи, учитывающий высокие требования к объему обрабатываемых в реальном времени данных и скорости обучения классификатора.

3. Выполнена реализация предложенного алгоритма в виде программного комплекса на языке C++ с проверкой корректности его работы на рабочем примере.

4. Полученные характеристики выше существующих аналогов, что позволяет применять систему для организации человеко-машинного взаимодействия и в медицинских процедурах с биологической обратной связью.

Литература

- Ворона 2015 – *Ворона Р.С.* Нейрокомпьютерный интерфейс на наносенсорах // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. 2015. Т. 15. № 4. С. 18–20.
- Гудкова 2010 – *Гудкова Н.В.* Цифровой прецизионный узкополосный фильтр // *Современная электроника*. 2010. № 7. С. 76–79.
- Забодаев, Обухов 2018 – *Забодаев С.В., Обухов С.А.* Разработка программного обеспечения для регистрации высокоскоростных биомедицинских сигналов // *МНСК-2018: Информационные технологии: Материалы 56-й Международной научной студенческой конференции*. Новосибирск, 22–27 апреля 2018 г. НГУ, Сибирское отделение РАН. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2018. 148 с.
- Карловский 2009 – *Карловский Д.В.* Методы и алгоритмы синтеза нейрокомпьютерного интерфейса на основе анализа вызванного потенциала P300 электроэнцефалограммы: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: Московский институт электронной техники, 2009 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.disserscat.com/content/metody-i-algoritmy-sinteza-neirokompyuternogo-interfeisa-na-osnove-analiza-vyzvannogo-potent/read> (дата обращения 20 апреля 2021).
- Лебедев 2016 – *Лебедев М.А.* Нейрокомпьютерные интерфейсы для расширения функций мозга // *Наука и инновации в медицине*. 2016. № 3 (3). С. 11–27.
- Обухов, Степанов 2019 – *Обухов С.А., Степанов В.П.* Алгоритм обнаружения QRS-комплекса на электрокардиограмме в реальном времени // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2019. № 5. С. 2–17.
- Сидоренко 2016 – *Сидоренко А.В.* Нейроинтерфейс: принципы действия и реализации // *Доклады Белорусского гос. ун-та информатики и радиоэлектроники*. 2016. № 7 (101). С. 106–110.

- Crow 2015 – *Crow R.S.* Brain-computer interface for nanosensors // *Fundamental problems of radio-electronic instrument making*. 2006. Vol. 4 (15). P. 18–20.
- Dobelle 2003 – *Dobelle W.* A bionic visionary for the blind // *Sydney Morning Herald*. February 19, 2003.
- Fisher 1936 – *Fisher R.A.* The use of multiple measurements in taxonomic problems // *Annals of Eugenics*. 1936. Vol. 7 (2). P. 179–188.
- Krusiński, Sellers, Cabestaing, Bayouhd 2006 – *Krusiński D.J., Sellers E.W., Cabestaing F., Bayouhd S.* A comparison of classification techniques for the P300 speller // *Journal of Neural Engineering*. 2006. Vol. 3 (4). P. 299–305.
- Ledyayev 2007 – *Ledyayev D.A.* Using wavelet Daubechies-2 and of the algorithm of Berg-Massar in solving the problem of detecting QRS complexes of ECG signals // *Control systems and information technologies*. 2007. Vol. 2. P. 162–166.
- Levine, Huggins, BeMent, Kushwaha, Schuh 2000 – *Levine S.P., Huggins J.E., BeMent S.L., Kushwaha R.K., Schuh L.A., et al.* A direct brain interface based on event-related potentials // *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*. 2000. Vol. 8 (2). P. 180–185.
- Lotte, Congedo, L'ecuyer, Lamarche, Arnaldi 2007 – *Lotte F., Congedo M., L'ecuyer A., Lamarche F., Arnaldi B.* A review of classification algorithms for EEG-based brain-computer interfaces // *Journal of Neural Engineering*. 2007. Vol. 4 (2). P. 3–26.
- Vapnik 1999 – *Vapnik V.N.* An Overview of Statistical Learning Theory // *IEEE transactions on neural networks*. 1999. Vol. 10 (5). P. 988–999.
- Zavgorodnyaya 2014 – *Zavgorodnyaya E.V.* A comparison of spatiotemporal feature extraction algorithms for error-related potential detection in brain-computer interfaces // *Вестник Чувашского ун-та*. 2014. № 2. P. 136–147.

References

- Crow, R.S. (2015), “Brain-computer interface for nanosensors”, *Fundamental problems of radio-electronic instrument making*, vol. 4 (15), pp. 18–20.
- Dobelle, W. (2003), “Bionic visionary for the blind”, *Sydney Morning Herald*, February 19.
- Fisher, R.A. (1936), “The use of multiple measurements in taxonomic problems”, *Annals of Eugenics*, vol. 7 (2), pp. 179–188.
- Gudkova, N.V. (2010), “Digital precision notch filter”, *Modern electronics*, vol. 7, pp. 76–79.
- Karlovskii, D.V. (2009), *Methods and algorithms for the synthesis of the neurocomputer interface based on the analysis of the evoked potential of P300 electroencephalogram* [Metody i algoritmy sinteza neurokompyuternogo interfeisa na osnove analiza vyzvannogo potentsiala P300 elektroentsefalogrammy], Ph.D. Thesis, Moscow Institute for Electronic Engineering, 2009, [Online], available at: <https://www.dissercat.com/content/metody-i-algoritmy-sintezy-neirokompyuternogo-interfeisa-na-osnove-analiza-vyzvannogo-potent/read> (Accessed 20 April 2021).

- Krusiński, D.J., Sellers, E.W., Cabestaing, F. and Bayouduh, S. (2006), "A comparison of classification techniques for the P300 speller", *Journal of Neural Engineering*, vol. 3 (4), pp. 299–305.
- Lebedev, M.A. (2016), "Brain-computer interface to expand the functions of the brain", *Science and innovation in medicine*, vol. 3 (3), pp. 11–27.
- Ledyayev, D.A. (2007), "Using wavelet Daubechies-2 and of the algorithm of Berg-Massar in solving the problem of detecting QRS complexes of ECG signals", *Control systems and information technologies*, vol. 2, pp. 162–166.
- Levine, S.P., Huggins, J.E., BeMent, S.L., Kushwaha, R.K. and Schuh, L.A. (2000), "A direct brain interface based on even-related potentials", *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, vol. 8 (2), pp. 180–185.
- Lotte, F., Congedo M., L'écuyer A., Lamarche, F. and Arnaldi, B. (2007), "A review of classification algorithms for EEG-based brain-computer interfaces", *Journal of Neural Engineering*, vol. 4 (2), pp. 3–26.
- Obukhov, S.A. and Stepanov, V.P. (2019), "Algorithm for detecting QRS-complex on the electrocardiogram in real-time mode", *Engineering Journal: Science and Innovation*, vol. 5, pp. 2–17.
- Sidorenko, A.V. (2016), "Brain-computer interface (BCI). The principles of operation and implementation", *Reports of the Belarusian State University of Radio-electronics and Informatics*, vol. 7 (101), pp. 106–110.
- Vapnik, V.N. (1999), "An overview of statistical learning theory", *IEEE transactions on neural networks*, vol. 10 (5), pp. 988–999.
- Zabodaev, S.V. and Obukhov, S.A. (2018), "Software development for high-speed registration of biomedical signals", *Proceedings of the 56th International student scientific conference "MNSK-2018: Information technologies", Novosibirsk, April 22–27, 2018, NSU, Siberian branch of the RAS, Novosibirsk, Russia*, 148 p.
- Zavgorodnyaya, E.V. (2014), "A comparison of spatiotemporal feature extraction algorithms for error-related potential detection in brain-computer interfaces", *Bulletin of Chuvash University*, vol. 2, pp. 136–147.

Информация об авторах

Сергей А. Обухов, магистр, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия; 105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1; osergey@live.com

Валерий П. Степанов, кандидат технических наук, доцент, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия; 105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1; vapals@yandex.ru

Игорь В. Рудаков, кандидат технических наук, доцент, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия; 105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1; irudakov@yandex.ru

Information about the authors

Sergey A. Obukhov, master, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia; bld. 5, 2nd Bauman Str., Moscow, 105005, Russia; osergey@yandex.ru

Valery P. Stepanov, Cand. of Sci. (Computer Engineering), associate professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia; bld. 5, 2nd Bauman Str., Moscow, 105005, Russia; vapals@yandex.ru

Igor V. Rudakov, Cand. of Sci. (Computer Engineering), associate professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia; bld. 5, 2nd Bauman Str., Moscow, 105005, Russia; irudakov@yandex.ru

Дизайн обложки
Е.В. Амосова

Корректор
Н.К. Егорова

Компьютерная верстка
Н.В. Москвина

Подписано в печать 22.06.2021.
Формат 60×90^{1/16}.
Уч.-изд. л. 4,0. Усл. печ. л. 4,3.
Тираж 1050 экз. Заказ № 1295

Издательский центр
Российского государственного
гуманитарного университета
125047, Москва, Миусская пл., 6
i i i žsuh.ru