

РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**RUSSIAN
TECHNOLOGICAL
JOURNAL**



*Информационные системы.
Информатика.
Проблемы информационной безопасности*

*Роботизированные комплексы и системы.
Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля*

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

*Микро- и наноэлектроника.
Физика конденсированного состояния*

Аналитическое приборостроение и технологии

Математическое моделирование

*Экономика наукоемких и высокотехнологичных
предприятий и производств*

Мировоззренческие основы технологии и общества





Э Л Е К Т Р О Н Н О Е С Е Т Е В О Е И З Д А Н И Е

РОССИЙСКИЙ технологический журнал

**RUSSIAN
TECHNOLOGICAL
JOURNAL**

- Информационные системы. Информатика. Проблемы информационной безопасности
 - Роботизированные комплексы и системы. Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля
 - Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
 - Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния
 - Аналитическое приборостроение и технологии
 - Математическое моделирование
 - Экономика наукоемких и высокотехнологических предприятий и производств
 - Мировоззренческие основы технологии и общества
- Information systems. Computer sciences. Issues of information security
 - Multiple robots (robotic centers) and systems. Remote sensing and non-destructive testing
 - Modern radio engineering and telecommunication systems
 - Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics
 - Analytical instrument engineering and technology
 - Mathematical modeling
 - Economics of knowledge-intensive and high-tech enterprises and industries
 - Philosophical foundations of technology and society

**Российский технологический журнал =
Russian Technological Journal
2021, том 9, № 3**

**Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal =
Russian Technological Journal
2021, Vol. 9, No. 3**

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3>

<https://www.rtj-mirea.ru>



Электронное сетевое издание
Российский технологический журнал =
Russian Technological Journal
2021, том 9, № 3

Electronic network journal
Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal =
Russian Technological Journal
2021, Vol. 9, No. 3

Дата опубликования 31 мая 2021 г.

Publication date May 31, 2021.

Научно-технический рецензируемый журнал освещает вопросы комплексного развития радиотехнических, телекоммуникационных и информационных систем, электроники и информатики, а также результаты фундаментальных и прикладных междисциплинарных исследований, технологических и организационно-экономических разработок, направленных на развитие и совершенствование современной технологической базы.

The peer-reviewed scientific and technical journal highlights the issues of complex development of radio engineering, telecommunication and information systems, electronics and informatics, as well as the results of fundamental and applied interdisciplinary researches, technological and economical developments aimed at the development and improvement of the modern technological base.

Периодичность: один раз в два месяца.

Periodicity: bimonthly.

Журнал основан в декабре 2013 года. До 2016 года издавался под названием «Вестник МГТУ МИРЭА» (ISSN 2313-5026).

The journal was founded in December 2013. The name was «Herald of MSTU MIREA» until 2016 (ISSN 2313-5026).

Учредитель и издатель:

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования

«МИРЭА – Российский технологический университет»
119454, РФ, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78.

Founder and Publisher:

Federal State Budget
Educational Institution
of Higher Education

«MIREA – Russian Technological University»
78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia.

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов ВАК РФ, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук и доктора наук, индексируется в РГБ, РИНЦ, eLibrary, Соционет, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Directory of Open Access Scholarly Resources (ROAD), Google Scholar, Open Archives Initiative, Ulrich's International Periodicals Directory.

The journal is included into the List of peer-reviewed science press of the State Commission for Academic Degrees and Titles of Russian Federation.

The Journal is included in RSL (Russian State Library), Russian citation index, eLibrary, Socionet, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Directory of Open Access Scholarly Resources (ROAD), Google Scholar, Open Archives Initiative, Ulrich's International Periodicals Directory.

Главный редактор:

Сигов Александр Сергеевич, академик РАН,
доктор физ.-мат. наук, профессор, президент ФГБОУ ВО
МИРЭА – Российский технологический университет
(РТУ МИРЭА), Москва, Россия.

Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017,
sigov@mirea.ru.

Editor-in-Chief:

Alexander S. Sigov, Academician at the Russian Academy
of Sciences, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor,
President of MIREA – Russian Technological University
(RTU MIREA), Moscow, Russia.

Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017,
sigov@mirea.ru.

Редакция:

Зав. редакцией к.т.н. Г.Д. Середина
Научный редактор д.т.н., проф. Г.В. Куликов
Выпускающий редактор А.С. Алексеенко
Технический редактор Д.В. Кардановская
119571, г. Москва, пр-т Вернадского, 86, оф. Л-119.
Тел.: +7(495) 246-05-55 (#2-88).
E-mail: seredina@mirea.ru.

Editorial staff:

Managing Editor Cand. Sci. (Eng.) Galina D. Seredina
Scientific Editor Dr. Sci. (Eng), Prof. Gennadiy V. Kulikov
Executive Editor Anna S. Alekseenko
Technical Editor Darya V. Kardanovskaya
86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571 Russia.
Phone: +7(495) 246-05-55 (#2-88).
E-mail: seredina@mirea.ru.

Свидетельство о регистрации СМИ Эл № ФС 77-74578
от 14.12.2018 г. выдано Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий и массовых
коммуникаций (Роскомнадзор).

Registration Certificate Эл № ФС 77–74578,
issued in December 14, 2018 by the Federal Service for
Supervision of Communications, Information Technology, and
Mass Media of Russia.

Редакционная коллегия

- Кудж
Станислав Алексеевич** профессор, д.т.н., ректор РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 56521711400, ResearcherID AAG-1319-2019, <https://orcid.org/0000-0003-1407-2788>, rector@mirea.ru
- Банис
Юрас Йонович** профессор, хабилитированный доктор наук, проректор Вильнюсского университета, Вильнюс, Литва, Scopus Author ID 7003687871, juras.banys@ff.vu.lt
- Боков
Алексей Алексеевич** старший научный сотрудник, химический факультет и 4D LABS, Университет Саймона Фрейзера, Ванкувер, Британская Колумбия, Канада, Scopus Author ID 35564490800, ResearcherID C-6924-2008, <http://orcid.org/0000-0003-1126-3378>, abokov@sfu.ca
- Буслаева
Татьяна Максимовна** профессор, д.х.н., РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 6602442002, buslaeva@mirea.ru
- Буш
Александр Андреевич** профессор, д.т.н., директор Института материалов твердотельной электроники РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 7201882802, ResearcherID R-2287-2016, <http://orcid.org/0000-0003-3990-9847>, bush@mirea.ru
- Вахрушев
Сергей Борисович** профессор, д.ф.-м.н., заведующий лабораторией нейтронных исследований Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (РАН), профессор кафедры Физической электроники СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия, Scopus Author ID 7004228594, ResearcherID A-9855-2011, <http://orcid.org/0000-0003-4867-1404>, s.vakhrushev@mail.ioffe.ru
- Голованова
Наталья Борисовна** профессор, д.э.н., заместитель первого проректора РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 57191447039, golovanova@mirea.ru
- Гуляев
Юрий Васильевич** академик РАН, член Президиума РАН, профессор, д.ф.-м.н., научный руководитель Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия, Scopus Author ID 35562581800, gulyaev@cplire.ru
- Жуков
Дмитрий Олегович** профессор, д.т.н., заведующий кафедрой интеллектуальных технологий и систем РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 57189660218, zhukov_do@mirea.ru
- Кимель
Алексей Вольдемарович** профессор, к.ф.-м.н., Университет Радбауд, г. Наймерген, Нидерланды, Scopus Author ID 6602091848, ResearcherID D-5112-2012, a.kimel@science.ru.nl
- Кондратенко
Владимир Степанович** профессор, д.т.н., заведующий кафедрой оптических и биотехнических систем и технологий РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 15834985700, kondratenko@mirea.ru
- Крамаров
Сергей Олегович** профессор, д.ф.-м.н., Сургутский государственный университет, Сургут, Россия, Scopus Author ID 56638328000, ResearcherID E-9333-2016, <https://orcid.org/0000-0003-3743-6513>, mavoo@yandex.ru
- Мишина
Елена Дмитриевна** профессор, д.ф.-м.н., зав. специализированной учебно-научной лабораторией фемтосекундной оптики для нанотехнологий РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 7005350309, ResearcherID D-6402-2014, <http://orcid.org/0000-0003-0387-5016>, mishina@mirea.ru
- Пасечник
Сергей Вениаминович** профессор, д.ф.-м.н., профессор кафедры оптических и биотехнических систем и технологий РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 6701559250, ResearcherID P-7239-2015, <http://orcid.org/0000-0002-6050-2761>, pasechnik@mirea.ru
- Перно Филипп** профессор, Центральная Школа г. Лилль, Франция, Scopus Author ID 7003429648, philippe.pernod@ec-lille.fr
- Романов
Михаил Петрович** профессор, д.т.н., директор Института кибернетики РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 14046079000, <https://orcid.org/0000-0003-3353-9945>, m_romanov@mirea.ru
- Савиных
Виктор Петрович** член-корр. РАН, Дважды Герой Советского Союза, д.т.н., профессор, президент Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК), Москва, Россия, Scopus Author ID 56412838700, vp@miigaik.ru
- Соколов
Виктор Васильевич** профессор, д.ф.-м.н., советник по научной работе РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 56951446700, v_sokolov@mirea.ru
- Тимошенко
Андрей Всеволодович** профессор, д.т.н., проректор по учебной работе РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 56576076700, ResearcherID Y-8709-2018, timoshenko@mirea.ru
- Фетисов
Юрий Константинович** профессор, д.ф.-м.н., профессор кафедры нанoeлектроники РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 7003504213, fetisov@mirea.ru
- Харин
Юрий Семенович** член-корр. НАН Беларуси, профессор, д.ф.-м.н., директор НИИ прикладных проблем математики и информатики Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, Scopus Author ID 6603832008, <http://orcid.org/0000-0003-4226-2546>, kharin@bsu.by
- Цветков
Виктор Яковлевич** профессор, д.т.н., советник ректората РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 56069916700, tsvetkov@mirea.ru

Editorial Board

- Stanislav A. Kudzh** Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector of RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 56521711400, ResearcherID AAG-1319-2019, <https://orcid.org/0000-0003-1407-2788>, rector@mirea.ru
- Juras Banys** Habilitated Doctor of Sciences, Professor, Vice-Rector of Vilnius University, Vilnius, Lithuania, Scopus Author ID 7003687871, juras.banys@ff.vu.lt
- Alexei A. Bokov** Senior Research Fellow, Department of Chemistry and 4D LABS, Simon Fraser University, Vancouver, British Columbia, Canada, Scopus Author ID 35564490800, ResearcherID C-6924-2008, <http://orcid.org/0000-0003-1126-3378>, abokov@sfu.ca
- Tatyana M. Buslaeva** Dr. Sci. (Chem.), Professor, RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 6602442002, buslaeva@mirea.ru
- Alexander A. Bush** Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Institute of Materials of Solid State Electronics, RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 7201882802, ResearcherID R-2287-2016, <http://orcid.org/0000-0003-3990-9847>, bush@mirea.ru
- Sergey B. Vakhrushev** Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Head of the Laboratory of Neutron Research, A.F. Ioffe Physico-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences (RAS), Department of Physical Electronics of St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia, Scopus Author ID 7004228594, ResearcherID A-9855-2011, <http://orcid.org/0000-0003-4867-1404>, s.vakhrushev@mail.ioffe.ru
- Nataliya B. Golovanova** Dr. Sci. (Econ.), Professor, Deputy First Vice-Rector of RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 57191447039, golovanova@mirea.ru
- Yury V. Gulyaev** Academician at the RAS, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Supervisor of V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS, Moscow, Russia, Scopus Author ID 35562581800, gulyaev@cplire.ru
- Dmitry O. Zhukov** Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Intelligent Technologies and Systems, RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 57189660218, zhukov_do@mirea.ru
- Alexey V. Kimel** PhD (Phys.–Math.), Professor, Radboud University, Nijmegen, Netherlands, Scopus Author ID 6602091848, ResearcherID D-5112-2012, a.kimel@science.ru.nl
- Vladimir S. Kondratenko** Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Optical and Biotechnical Systems and Technologies, RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 15834985700, kondratenko@mirea.ru
- Sergey O. Kramarov** Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Surgut State University, Surgut, Russia, Scopus Author ID 56638328000, ResearcherID E-9333-2016, <https://orcid.org/0000-0003-3743-6513>, mavoo@yandex.ru
- Elena D. Mishina** Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Head of the Specialized Educational and Research Laboratory of Femtosecond Optics for Nanotechnologies, RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 7005350309, ResearcherID D-6402-2014, <http://orcid.org/0000-0003-0387-5016>, mishina@mirea.ru
- Sergey V. Pasechnik** Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor of the Department of Optical and Biotechnical Systems and Technologies, RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 6701559250, ResearcherID P-7239-2015, <http://orcid.org/0000-0002-6050-2761>, pasechnik@mirea.ru
- Philippe Pernod** Professor, Dean of Research, University of Lille, Villeneuve-d'Ascq, France, Scopus Author ID 7003429648, philippe.pernod@ec-lille.fr
- Mikhail P. Romanov** Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Institute of Cybernetics, RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 14046079000, <https://orcid.org/0000-0003-3353-9945>, m_romanov@mirea.ru
- Viktor P. Savinykh** Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Professor, President of Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia, Scopus Author ID 56412838700, vp@miigaik.ru
- Viktor V. Sokolov** Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Adviser on Scientific Work of RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 56951446700, v_sokolov@mirea.ru
- Andrey V. Timoshenko** Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice Rector for Academic Affairs of RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 56576076700, ResearcherID Y-8709-2018, timoshenko@mirea.ru
- Yury K. Fetisov** Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor of the Department of Nanoelectronics, RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 7003504213, fetisov@mirea.ru
- Yury S. Kharin** Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Director of the Institute of Applied Problems of Mathematics and Informatics of the Belarusian State University, Minsk, Belarus, Scopus Author ID 6603832008, <http://orcid.org/0000-0003-4226-2546>, kharin@bsu.by
- Viktor Ya. Tsvetkov** Dr. Sci. (Eng.), Professor, Councilor of the Administration of RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 56069916700, tsvetkov@mirea.ru

Содержание

Информационные системы. Информатика. Проблемы информационной безопасности

- 7** *Куликов А.А.*
Применение биометрических систем в технологиях идентификации лиц

Роботизированные комплексы и системы, технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля

- 15** *Егорцев М.В., Диане С.А.К., Кац Н.Д.*
Алгоритмическое обеспечение системы внешнего наблюдения и маршрутизации автономных мобильных роботов

Микро- и наноэлектроника. Физика конденсированного состояния

- 24** *Каданцев В.Н.*
Излучение сверхбыстрых точечных диполей, равномерно движущихся вблизи хиральных сред
- 40** *Овчинников И.С.*
Методы оценки механических свойств изолирующих материалов с низкой диэлектрической проницаемостью
- 49** *Юрасов А.Н., Яшин М.М., Гладышев И.В., Семенова Д.В., Ганьшина Е.А., Каназакова Е.С.*
Влияние размерных эффектов и распределения гранул по размерам на оптические и магнитооптические свойства нанокompозитов

Аналитическое приборостроение и технологии

- 58** *Курбанисмаилов З.М., Тарланов А.Т., Акимов Э.М.*
Методика точечной визуализации напряженности электрического поля в пространстве и времени

Математическое моделирование

- 66** *Голов В.А., Петрусевич Д.А.*
О выборе метода распознавания астрономических объектов на основе анализа исходных данных, полученных по программе Sloan Digital Sky Survey DR14
- 78** *Горчаков С.Ю.*
Синтез программных угловых движений космического аппарата дистанционного зондирования Земли с высоким пространственным разрешением
- 88** *Пулькин И.С., Татаринцев А.В.*
Достаточная статистика для параметра распределения Парето

Мировоззренческие основы технологии и общества

- 98** *Шоканова Р.Д., Тарасова Е.Н.*
Репродуктивный метод в обучении иностранных студентов русскому языку и его инновационные аспекты

Contents

Information systems. Computer sciences. Issues of information security

- 7** *Alexander A. Kulikov*
Application of biometric systems in face identification technologies

Multiple robots (robotic centers) and systems. Remote sensing and non-destructive testing

- 15** *Maksim V. Egortsev, Sekou Abdel Kader Diane, Nikolai D. Kaz*
Algorithmic support of the system of external observation and routing of autonomous mobile robots

Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

- 24** *Vasiliy N. Kadantsev*
The radiation from ultrafast point dipoles, moving uniformly near chiral media

- 40** *Ivan S. Ovchinnikov*
Evaluation methods of mechanical properties for low- k dielectrics

- 49** *Alexey N. Yurasov, Maxim M. Yashin, Igor V. Gladyshev, Darya V. Semyonova, Elena A. Gan'shina, Ekaterina S. Kanazakova*
Influence of size effects and granule distribution by size on optical and magneto-optical properties of nanocomposites

Analytical instrument engineering and technology

- 58** *Zaur M. Kurbanismailov, Arslan T. Tarlanov, Emil M. Akimov*
The technique of point visualization of the electric field in space and time

Mathematical modeling

- 66** *Vladislav A. Golov, Denis A. Petrusevich*
Data analysis methods in astronomic objects classification (Sloan Digital Sky Survey DR14)

- 78** *Sergey Yu. Gorchakov*
Synthesis of program angular motions of the Earth remote sensing spacecraft with high spatial resolution

- 88** *Igor S. Pulkin, Andrey V. Tatarintsev*
Sufficient statistics for the Pareto distribution parameter

Philosophical foundations of technology and society

- 98** *Rashida D. Shokanova, Elena N. Tarasova*
Reproductive method in teaching Russian to foreign students and its innovative aspects

УДК: 004.932

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-7-14>

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Применение биометрических систем в технологиях идентификации лиц

А.А. Куликов [®]

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: tibult41@gmail.com

Резюме. В работе приведен аналитический обзор применения биометрических систем распознавания применительно к технологиям идентификации лицевых изображений. Представлена классификация биометрических систем. Рассмотрены тенденции технологического прогресса в области биометрии и возможностей распознавания лиц. Определено, что в 2020 году наблюдается тенденция перехода от использования биометрических технологий распознавания в традиционных системах государственной безопасности в сферу коммерческого и пользовательского применения. Приведен процесс «связывания» ключей шифрования и паролей с биометрическими параметрами субъекта данных. Предложено под биометрическим признаком и параметром биометрии подразумевать некоторую величину, обладающую физическим смыслом, характеризующим сам субъект. Также представлена возможность использования в биометрии круговой окрестности и билинейной интерполяции значений интенсивностей пикселей, что даст возможность выстраивания локального бинарного шаблона. Для того чтобы решить проблему идентификации лиц, целесообразно исследовать суть биометрических систем в технологиях идентификации лиц, их виды, определив недостатки каждого из них, на основании чего представить направления устранения и поиска наиболее надежных технологий. Суть применения биометрических систем в технологиях идентификации лиц состоит, например, в том, что пользователь может предоставить банку или другому контрагенту доказательства того, что именно он хочет воспользоваться услугами по своим счетам. При этом спрос увеличился именно на бесконтактные биометрические решения. Данные технологии внедряются с целью проведения дополнительной биометрической проверки пользователей, которая позволяет минимизировать возможное мошенничество или нарушение внутренних правил сервиса, например, передачу аккаунтов одних зарегистрированных пользователей другим.

Ключевые слова: биометрия, параметры, признаки, преобразователь «биометрия – код», ключ, распознавание

• Поступила: 04.12.2020 • Доработана: 21.03.2021 • Принята к опубликованию: 01.04.2021

Для цитирования: Куликов А.А. Применение биометрических систем в технологиях идентификации лиц. *Российский технологический журнал*. 2021;9(3):7–14. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-7-14>

Прозрачность финансовой деятельности: Автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Application of biometric systems in face identification technologies

Alexander A. Kulikov[@]

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: tibult41@gmail.com

Abstract. The paper presents an analytical review of the application of biometric recognition systems in relation to facial image identification technologies. The classification of biometric systems is presented. The trends of technological progress in the field of biometrics and facial recognition capabilities are considered. It is determined that in 2020 there is a trend of transition from the use of biometric recognition technologies in traditional state security systems to the sphere of commercial and user applications. The process of «linking» encryption keys and passwords with the biometric parameters of the data subject is described. It is proposed that a biometric feature and a biometrics parameter mean a certain value that has a physical meaning that characterizes the subject itself. The possibility of using circular neighborhood and bilinear interpolation of pixel intensity values in biometrics is also presented. This will make it possible to build a local binary template. In order to solve the problem of identification of persons, it is advisable to investigate the essence of biometric systems in the technologies of identification of persons, their types, identifying the shortcomings of each of them, on the basis of which to present the directions of elimination and search for the most reliable technologies. The essence of the use of biometric systems in the technologies of identification of persons is, for example, that the user can provide the bank or other counterparty with evidence that it is he who wants to use the services on his accounts. At the same time, the demand has increased for contactless biometric solutions. These technologies are implemented in order to conduct additional biometric verification of users. This allows to minimize possible fraud or violation of the internal rules of the service, for example, the transfer of accounts of some registered users to others.

Keywords: biometrics, parameters, features, biometrics-code converter, key, recognition

• Submitted: 04.12.2020 • Revised: 21.03.2021 • Accepted: 01.04.2021

For citation: Kulikov A.A. Application of biometric systems in face identification technologies. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(3):7–14 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-7-14>

Financial disclosure: Author has no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The author declares no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Технология распознавания лиц в условиях цифровой революции стала актуальной для множества отраслей и сфер жизнедеятельности. В связи с этим в последние годы многими российскими разработчиками и учеными из других стран проводились эксперименты в части использования биометрических технологий. Ряд из них можно назвать удачными, другие провалились. Однако все большую популярность получают технологии, строящиеся на использовании биометрических данных человека. В тоже время стоит отметить непроработанность ряда таких технологий, что влечет за собой снижение эффективности идентификации лиц и сбои в выполнении

функций, возложенных на соответствующее оборудование.

Для того, чтобы решить указанную проблему, целесообразно провести исследование биометрических систем в технологиях идентификации лиц, их видов, определив недостатки каждого из них, на основании чего представить направления решения проблем и поиска наиболее надежных технологий.

БИОМЕТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ В ТЕХНОЛОГИЯХ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛИЦ

На текущий момент аутентификация по биометрическим данным является настоящим прорывом в технологиях. Суть применения биометрических

систем в технологиях идентификации лиц состоит в том, что пользователь, например, может предоставить банку или другому контрагенту доказательства того, что именно он хочет воспользоваться услугами по своим счетам; биометрические системы служат для поиска преступников, применяются для доступа к служебным объектам (пример: доступ на военную базу). При этом значительно увеличился спрос на бесконтактные биометрические решения [1].

Каждая такая технология, по сути, является независимой, выполняющей задачи биометрической идентификации (распознавания лица или образа) на локальном уровне. Специфика любого подобного решения состоит в том, что они интегрируются в системы безопасности предприятий. Однако зачастую при применении подобного решения, возникает ряд сложностей. Примером может послужить невозможность передачи запроса на получение статистики из аппаратного биометрического решения [2].

Данные технологии внедряются с целью проведения дополнительной биометрической проверки пользователей, которая позволяет минимизировать возможное мошенничество или нарушение внутренних правил сервиса, например, передачу аккаунтов одним зарегистрированным пользователям системы другим лицам (злоумышленникам). Идентификация может применяться для ретроспективного поиска в архиве видеозаписей, например, при расследовании инцидентов или при обнаружении VIP-персон/постоянных клиентов на объектах ритейла [3].

Помимо верификации при физическом контроле доступа, распознавание лиц успешно заменяет пароли и ПИН-коды в задачах подтверждения платежных операций или при входе в аккаунт.

Изучение рынка таких систем позволяет сделать вывод о том, что все подобные технологии разделяются на две группы:

1. Работающие на базе одной системы;
2. Мультимодульные решения.

Распознавание лиц можно комбинировать с распознаванием отпечатков пальцев или любой другой биометрической технологией, но такое решение будет стоить дороже и не всегда оправданно.

Обобщенная классификация биометрических систем представлена на рис. 1.

Рис. 1 показывает, что в биометрии могут быть задействованы фактически все функциональные особенности человека. Большая часть современных биометрических моделей строится на использовании модальных технологий, совмещающих в себе несколько приведенных выше типов. Примером является использование «слепок» лица с разных ракурсов и отпечатков пальцев. В то же время наиболее популярными на современном этапе видом биометрической аутентификации являются технологии на основе распознавания голоса [4]. Спрос на биометрию в системе распознавания лиц повышается все более активно, поскольку усиливается потребность в безопасных механизмах идентификации. Это прослеживается фактически во всех отраслях экономики, что связано с нарастанием возможностей распознавания лиц.

При этом стоит отметить, что с одновременным развитием цифровых и бесконтактных систем имеет место и развитие биометрических технологий. Особенно ярко это проявилось в 2020 году, когда биометрические технологии распознавания, применяемые в большей степени в системах государственной безопасности, постепенно стали интегрироваться в сферу коммерческого и пользовательского применения. Ключевыми сегментами коммерческого использования биометрических технологий стали сферы финансов, туризма, медицины и др. Более подробная информация по отраслям, использующим биометрию в обеспечении безопасности своих бизнес-процессов, приведена в таблице 1.

Таблица 1. Ключевые отрасли, использовавшие биометрию в обеспечении безопасности своих бизнес-процессов в 2020 году

Сектор	Сфера, где используются	Примеры решений
Государственный сектор	Регистрация электронных данных населения в документах. Документы, содержащие биометрические данные	Электронные паспорта, электронные водительские удостоверения, бесконтактное получение государственных услуг через личный кабинет в «Госуслуги»
Туризм, перелеты и миграция	Предоставление иностранных виз с помощью дистанционных технологий, приобретение билетов на авиа- и ж/д транспорт	Все биометрические системы, используемые на объектах транспортной инфраструктуры и в иммиграционном контроле
Банки и кредитно-финансовые организации	Работа платежных систем и страхование, идентификация лиц для получения финансовых услуг	Работа с онлайн-банками
Здравоохранение	Государственный и частный сектор (государственные и частные больницы)	Электронные медицинские карты, электронные больничные листы
Ритейл	Системы мониторинга покупателей	Оценка лица покупателя при выходе из магазина (удовлетворен покупками или нет)

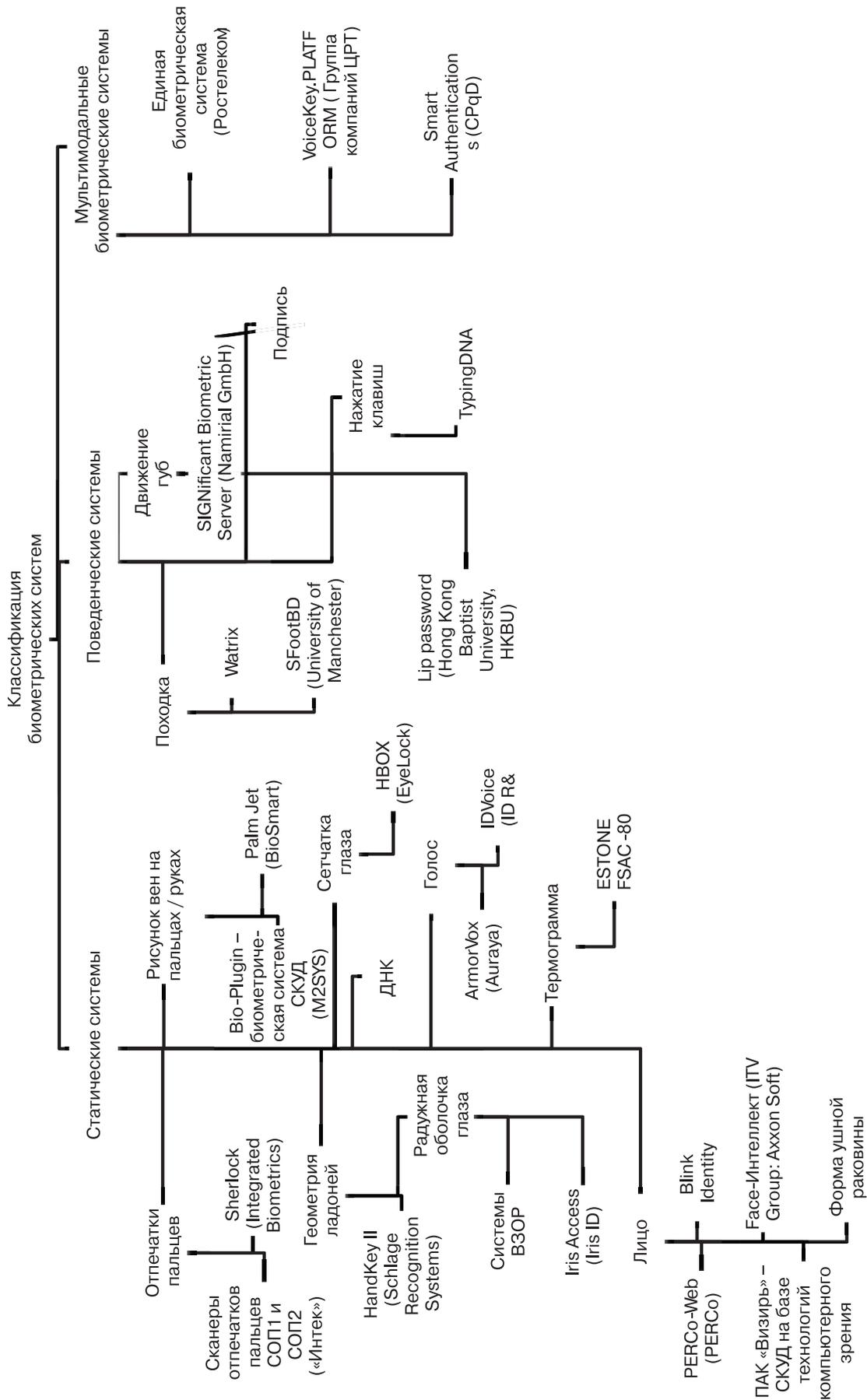


Рис. 1. Классификация биометрических систем

В целом можно сделать вывод, что биометрические системы используются практически во всех отраслях и сферах современного государства. Это доказывает и график (рис. 2), где приведены данные по динамике объема рынка биометрических технологий и его сегментов.

Биометрические технологии проникают практически во все сегменты рынка, постепенно наращивая свое участие в каждом из них. Так, если биометрические системы в банкоматах в 2016 году вообще не использовались, то в 2019 году они уже начали активно применяться в данном сегменте, а в 2021 году прогнозируется увеличение объема данных технологий до 1.5 млн долл. [5]. В 2020 году биометрические технологии преобладали в аутентификации в корпоративных ИТ-системах и государственной сфере.

Развитие спроса на биометрические технологии повлияло на рост числа их разработчиков. Крупнейшей в мире системой биометрической идентификации к концу 2019 года стала запущенная в Индии система «Aadhaar», в которой было зарегистрировано более 1.19 млрд человек [6].

Основными требованиями к таким системам у пользователей является их надежность, скорость работы и возможность быстрой интеграции аппаратной и программной частей в общую платформу. Для того чтобы понимать, какая именно система подходит пользователю, проводится их детальный анализ. Здесь стоит пояснить, что в основе системы находится преобразователь «биометрия – код» (ПБК), являющийся ключевым понятием, относящимся к «связыванию» ключей шифрования и паролей с биометрическими параметрами субъекта данных и нацеленный на преобразование вектора нечетких, неоднозначных биометрических параметров «свой» в четкий однозначный код ключа (пароля).

В России введена серия стандартов ГОСТ Р 52633, которые определяют требования к проведению процедур обработки биометрической информации и нечетких биометрических образов субъекта данных. В соответствии с этим ГОСТ, получаемая информация в области биометрии человека преобразуется в его длинный пароль либо ключ, используемый в дальнейшей аутентификации пользователя [7].

Стоит отметить, что термины «биометрический» или «биометрический образ», определенные ГОСТ Р 52633, соответственно, означают какой-то единичный образец биометрических данных и их совокупность. Однако понятие биометрического параметра зачастую путается с понятием признака, являющегося идентичным с позиции байесовской классификации. Поэтому на наш взгляд под биометрическим признаком и параметром биометрии стоит подразумевать некоторую величину, которая характеризует сам субъект. При этом, если генерируется ключ, который в той или иной степени отличается от составленного для субъекта, имеет место ошибка 1-го рода, а ошибка 2-го рода может возникнуть, если ключ, полученный из биометрических данных субъекта, в метрике расстояний по параметрам оценивания близок к ключу другого субъекта настолько, что может быть принят за чужой ключ. Здесь, по нашему мнению, более правильно использовать расширенный оператор локального бинарного шаблона (ЛБШ). Использование круговой окрестности и билинейной интерполяции значений интенсивностей пикселей (pixel – наименьший логический элемент двумерного цифрового изображения) дает возможность построить локальный бинарный шаблон с произвольным набором точек P и радиусом R . Примеры такого изображения (двумерного) представлены на рис. 3.

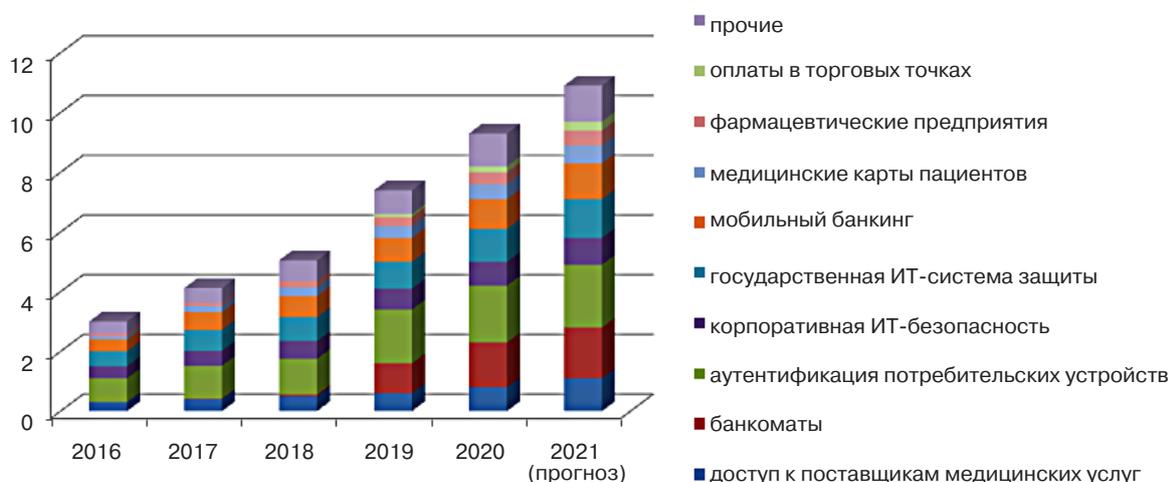


Рис. 2. Динамика объема рынка биометрических технологий и его сегментов, млн долл. [4]

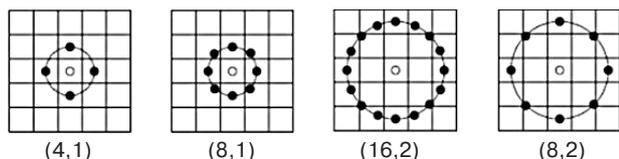


Рис. 3. Расширенное описание набора точек P и радиус R

Необходимо учитывать, что в классификации важную роль играет равномерность ЛБШ. В их состав целесообразно включать шаблоны, содержащие не более трех серий «0» и «1», которые представлены в таблице 3. Величины «0» и «1» представлены в виде единиц измерения (битов).

Таблица 3. Пример равномерных и неравномерных ЛБШ

ЛБШ	Количество серий	Равномерный
1111111	1	Да
00001111	2	Да
01110000	3	Да
11001110	4	Нет
11001001	5	Нет

Поскольку показанные ЛБШ кодируют концы линий, углы, пятна и другие особенности цифрового изображения в целом, они позволяют довольно экономно хранить информацию в виде последовательностей «0» и «1».

Зная значения ЛБШ для каждого пикселя изображения, можно разработать гистограмму, в которой каждому равномерному шаблону будет соответствовать столбец, а также дополнительный столбец, который содержит информацию по всем неравномерным шаблонам.

Для более эффективного описания изображения лица его можно разбить на области и далее для каждой построить гистограмму. Принимая во внимание, что изображение может состоять из m регионов, гистограмму надо определить для каждого региона. Пример изображения для общего количества регионов 7×7 (можно разбить изображение на большее количество частей) приведен на рис. 4.

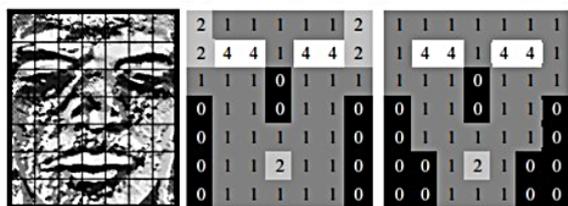


Рис. 4. Пример изображения лица и веса его регионов

Затем полученные гистограммы объединяются в одну, что позволит получить информацию не только о наличии тех или иных локальных особенностей, но и о месте их расположения на изображении.

В результате получим вектор размерностью 2891 (всего 7×7 регионов и для каждого вычислена гистограмма 59 bin), который и будет описывать ключевые особенности изображения лица (рис. 5).



Рис. 5. Пример изображения лица с вычисленными шаблонами

Таким образом, при интеграции расширенного оператора локального бинарного шаблона логика будет частично изменена. Если в базе зарегистрирована одна персона, то вероятность ее идентификации достигает максимального значения при приемлемом значении вероятности ложноположительной идентификации (ВЛПИ). В режиме верификации распознавание выполняется с большей точностью. В таблице 4 приведены количественные характеристики точности алгоритма распознавания лиц.

Таблица 4. Точность распознавания при разных значениях ВЛПИ и объема базы зарегистрированных лиц N

ВЛПИ	$N = 1$ (верификация)	$N = 15$ (идентификация)
0	80%	82%
0.02	99%	82%

Из приведенных значений следует, что режим верификации выполняет распознавание с большей точностью, чем режим идентификации, т.к. проверяется истинность значений, а не само изображение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, применение биометрических систем распознавания в технологии идентификации лиц позволит предоставить санкционированный доступ к различным служебным, секретным объектам, осуществлять поиск преступных лиц в общественных местах и т.д.

Проведение дополнительных исследований, направленных на выявление более совершенных методов компенсации изменения освещенности в полученных изображениях лиц, а также методов классификации, позволит повысить надежность алгоритма и применять программные решения на его основе в более широкой области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гришина Е.А. Биометрические технологии в российских банках: мечты или реальность. *Наука и общество*. 2015;3:17–21.
2. Ворона В.А., Костенко В.О. Биометрические технологии идентификации в системах контроля и управления доступом. *Computational nanotechnology*. 2016;3:224–241.
3. Глобальное исследование «Доверие к цифровым технологиям». 2021. URL: <https://www.pwc.ru/ru/publications/dti-2021/e-version-digital-trust-insights-2021-in-russian.pdf>
4. Tractica: Объем рынка биометрии к 2025 году достигнет \$15 млрд. URL: <https://iot.ru/promyshlennost/tractica-obem-rynka-biometrii-k-2025-godu-dostignet-15-mlrd>
5. Обзор международного рынка биометрических технологий и их применение в финансовом секторе. 2018, январь, Москва. URL: https://cbr.ru/Content/Document/File/36012/rev_bio.pdf
6. Куприяновский В.П., Сотников А.Е., Соловьев А.И., Дрожжинов В.И., Намиот Д.Е., Мамаев В.Ю., Куприяновский П.В. Aadhaar – идентификация человека в цифровой экономике. *International Journal of Open Information Technologies*. 2017;5(2):34–45.
7. Куликов А.А. Разработка системы автоматической идентификации изображения лица персоны по видеоизображению. *Глобальный научный потенциал*. 2013;3(24):75–79.
8. Куликов А.А. Модель репринта объекта на изображении. *Российский технологический журнал*. 2020;8(3):7–13. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-3-7-13>
9. *Защита информации. Техника защиты информации. Требования к средствам высоконадежной биометрической аутентификации*. ГОСТ Р 52633.0-2006. М.: Стандартинформ; 2007.
10. Alghaili M., Li Z., Ali H.A.R. Facefilter: face identification with deep learning and filter algorithm. *Scientific Programming*. 2020;2020: Article ID 7846264. <https://doi.org/10.1155/2020/7846264>
11. Чесалин А.Н., Гродзенский С.Я., Нилов М.Ю., Агафонов А.Н. Модификация алгоритма WaldBoost для повышения эффективности решения задач распознавания образов в реальном времени. *Российский технологический журнал*. 2019;7(5):20–29. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-5-20-29>
12. Кононыхин И.А., Ежов Ф.В., Мартынюк Р.А., Мищенко А.Д., Можайский Г.В. Реализация системы распознавания и отслеживания лиц. *Молодой ученый*. 2020;28(318):8–12.
13. Балдин А.В., Елисеев Д.В. Алгебра многомерных матриц для обработки адаптируемой модели данных. *Наука и образование*. 2010;7:1–11. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/199561.html>
14. Самаль Д.И., Фролов И.И. Алгоритм подготовки обучающей выборки с использованием 3d-моделирования лиц. *Системный анализ и прикладная информатика*. 2016;4:17–23.
15. Романенко А.О., Юфряков А.В. Оценка размытия изображения для биометрической идентификации. *Наука и образование сегодня*. 2018;7(30):16–19.

REFERENCES

1. Grishina E.A. Biometric technologies in Russian banks: dreams or reality. *Nauka i obshchestvo*. 2015;3:17–21 (in Russ.).
2. Vorona V.A., Kostenko V.O. Biometric identification technologies in access control and management systems. *Computational Nanotechnologies*. 2016;3:224–241 (in Russ.).
3. Global’noe issledovanie «Doverie k tsifrovym tekhnologiyam» (Global research «Trust in Digital Technologies»). 2021. Available from URL: <https://www.pwc.ru/ru/publications/dti-2021/e-version-digital-trust-insights-2021-in-russian.pdf>
4. Tractica: Ob’em rynka biometrii k 2025 godu dostignet \$15 mlrd. (Tractica: The biometrics market will reach \$ 15 billion by 2025). Available from URL: <https://iot.ru/promyshlennost/tractica-obem-rynka-biometrii-k-2025-godu-dostignet-15-mlrd>
5. Obzor mezhdunarodnogo rynka biometricheskikh tekhnologii i ikh primenenie v finansovom sektore. 2018, yanvar’, Moskva. (Review of the international market of biometric technologies and their application in the financial sector. January 2018. Moscow. Available from URL: https://cbr.ru/Content/Document/File/36012/rev_bio.pdf
6. Kupriyanovskii V.P., Sotnikov A.E., Solov’ev A.I., Drozhzhinov V.I., Namiot D.E., Mamaev V.Yu., Kupriyanovskii P.V. Aadhaar – identification of a person in the digital economy. *International Journal of Open Information Technologies*. 2017;5(2):34–45 (in Russ.).
7. Kulikov A.A. Development of a system for automatic identification of the image of a person’s face by video image. *Global’nyi nauchnyi potentsial = Global Scientific Potential*. 2013;3(24):75–79 (in Russ.).
8. Kulikov A.A. The model is a reprint of an object in the image. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(3):7–13 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-3-7-13>
9. *Zashchita informatsii. Tekhnika zashchity informatsii. Trebovaniya k sredstvam vysokonadezhnoi biometricheskoi autentifikatsii*. GOST R 52633.0-2006. (Information Security. Information security techniques. Requirements for highly reliable biometric authentication tools. GOST R 52633.0-2006). (in Russ.).
10. Alghaili M., Li Z., Ali H.A.R. Facefilter: face identification with deep learning and filter algorithm. *Scientific Programming*. 2020;2020: Article ID 7846264. <https://doi.org/10.1155/2020/7846264>
11. Chesalin A.N., Grodzenskiy S.Y., Nilov M.Yu., Agafonov A.N. Modification of the WaldBoost algorithm to improve the efficiency of solving pattern recognition problems in real-time. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2019;7(5):20–29 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-5-20-29>
12. Kononykhin I.A., Ezhov F.V., Martynyuk R.A., Mishchenko A.D., Mozhaiskii G.V. *Molodoi uchenyi = Young Scientist*. 2020;28(318):8–12 (in Russ.).
13. Baldin A.V., Eliseev D.V. Algebra of multidimensional matrices for processing an adaptable data model. *Nauka i obrazovanie = Science and Education of Bauman MSTU*. 2010;7:1–11 (in Russ.). Available from URL: <http://technomag.edu.ru/doc/199561.html>

16. Завалов Р.А., Гараев Р.А. Реализация алгоритма Виоля–Джонса на микроконтроллере с ограниченными ресурсами. *Наука и образование сегодня*. 2018;6(29):20–26.
17. Korotkov A. Database index for approximate string matching. In: *Proceedings of the 4th Spring/Summer Young Researchers' Colloquium on Software Engineering. SYRCoSE'10*. 2010. p. 136–140. <https://doi.org/10.15514/SYRCoSE-2010-4-27>
18. Etemad K., Chellappa R. Discriminant analysis for recognition of human face images. *Journal of the Optical Society of America A*. 1997;14(8):1724–1733. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.14.001724>
14. Samal' D.I., Frolov I.I. Algorithm of training sample preparation using 3D face modeling. *Sistemnyi analiz i prikladnaya informatika = System analysis and applied informatics*. 2016;4:17–23 (in Russ.).
15. Romanenko A.O., Yufryakov A.V. Evaluation of image blurring for biometric identification. *Nauka i obrazovanie segodnya*. 2018;7(30):16–19 (in Russ.).
16. Zavalov R.A., Garaev R.A. Implementation of the Viola–Jones algorithm on a microcontroller with limited resources. *Nauka i obrazovanie segodnya*. 2018;6(29):20–26 (in Russ.).
17. Korotkov A. Database index for approximate string matching. In: *Proceedings of the 4th Spring/Summer Young Researchers' Colloquium on Software Engineering. SYRCoSE'10*. 2010. p. 136–140. <https://doi.org/10.15514/SYRCoSE-2010-4-27>
18. Etemad K., Chellappa R. Discriminant analysis for recognition of human face images. *Journal of the optical society of America A*. 1997;14(8):1724–1733. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.14.001724>

Об авторе

Куликов Александр Анатольевич, к.т.н., доцент, доцент кафедры инструментального и прикладного программного обеспечения Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: tibult41@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-8443-3684>

About the author

Alexander A. Kulikov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Instrumental and Applied Software, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: tibult41@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-8443-3684>

Роботизированные комплексы и системы. Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля

Multiple robots (robotic centers) and systems. Remote sensing and non-destructive testing

УДК 004.896, 004.93'1, 656.052.1
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-15-23>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Алгоритмическое обеспечение системы внешнего наблюдения и маршрутизации автономных мобильных роботов

М.В. Егорцев[®], С.А.К. Диане, Н.Д. Кац

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: maksimegortsev1@gmail.com

Резюме. В статье представлено алгоритмическое обеспечение системы внешнего наблюдения и маршрутизации автономных мобильных роботов. В ряде случаев практическое применение мобильных роботов сопряжено с решением задач навигации. В частности, положение наземных роботов может определяться за счет применения средств видеонаблюдения, закрепляемых на неподвижном основании или же на борту сопровождающих беспилотных летательных аппаратов. В предлагаемом к рассмотрению подходе по видеоизображению, получаемому с внешней видеокамеры, расположенной над рабочей зоной мобильных роботов, распознается местоположение как роботов, так и расположенных поблизости препятствий. Строится оптимальный маршрут до целевой точки выбранного робота и отслеживаются изменения его рабочей зоны. Информация о допустимых маршрутах робота передается в сторонние приложения по каналам сетевой связи. Первичная обработка изображения с камеры включает коррекцию дисторсии, оконтуривание и бинаризацию, что позволяет отделить фрагменты изображения, содержащие роботов и препятствия от фоновых поверхностей и предметов. Распознавание роботов на видеокадре основано на применении SURF детектора. Данная технология выделяет ключевые точки на видеокадре в сопоставлении их с ключевыми точками эталонных изображений роботов. Планирование траекторий реализовано с применением алгоритма Дейкстры. Дискретность траекторий, получаемых с использованием алгоритма поиска пути на графе, может быть компенсирована на борту автономных мобильных роботов за счет применения сплайн-аппроксимации. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили работоспособность предлагаемого подхода как в задаче распознавания и локализации мобильных роботов, так и в задаче планирования безопасных траекторий.

Ключевые слова: SURF detection, A-star, UDP protocol, автономные мобильные роботы, маршрутизация, видеонаблюдение

• Поступила: 24.11.2020 • Доработана: 20.01.2021 • Принята к опубликованию: 29.03.2021

Для цитирования: Егорцев М.В., Диане С.А.К., Кац Н.Д. Алгоритмическое обеспечение системы внешнего наблюдения и маршрутизации автономных мобильных роботов. *Российский технологический журнал*. 2021;9(3):15–23. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-15-23>

Прозрачность финансовой деятельности: Никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Algorithmic support of the system of external observation and routing of autonomous mobile robots

Maksim V. Egortsev[®], Sekou Abdel Kader Diane, Nikolai D. Kaz

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[®] Corresponding author, e-mail: maksimegortsev1@gmail.com

Abstract. This article presents the algorithmic support of the external monitoring and routing system of autonomous mobile robots. In some cases, the practical usage of mobile robots is related to the solution of navigation problems. In particular, the position of ground robots can be secured using unmanned aerial vehicles. In the proposed approach based on the video image obtained from an external video camera located above the working area of mobile robots, the location of both robots and nearby obstacles is recognized. The optimal route to the target point of the selected robot is built, and changes in its working area are monitored. Information about the allowed routes of the robot is transmitted to third-party applications via network communication channels. Primary image processing from the camera includes distortion correction, contouring and binarization, which allows to separate image fragments containing robots and obstacles from background surfaces and objects. Recognition of robots in a video frame is based on the use of a SURF detector. This technology extracts key points in the video frame and compares them with key points of reference images of robots. Trajectory planning is implemented using Dijkstra's algorithm. The discreteness of the trajectories obtained using the algorithm for finding a path on the graph can be compensated for on board autonomous mobile robots by using spline approximation. Experimental studies have confirmed the efficiency of the proposed approach both in the problem of recognition and localization of mobile robots and in the problem of planning safe trajectories.

Keywords: SURF detection, A-star, UDP protocol, autonomous mobile robots, routing, video monitoring

• Submitted: 24.11.2020 • Revised: 20.01.2021 • Accepted: 29.03.2021

For citation: Egortsev M.V., Diane S.A.K., Kaz N.D. Algorithmic support of the system of external observation and routing of autonomous mobile robots. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(3):15–23 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-15-23>

Financial disclosure: No author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В области систем видеонаблюдения и планирования маршрутов автономных мобильных роботов (АМР) в настоящее время проводятся масштабные исследования. Появляются новые технические решения для обнаружения роботов и препятствий, построения карт местности и нахождения оптимального маршрута. Используются различные способы получения и обработки видеoinформации о состоянии рабочей зоны робота.

Так, например, в [1] описано построение семантической карты помещения с помощью автономного мобильного робота, который передает изображение удаленной программе. По полученным видеокдрам вычисляются местоположения

релевантных объектов (информационные знаки, двери, огнетушители) и отмечаются на 3D-карте.

В [2] представлено решение, позволяющее беспилотному летающему аппарату с помощью особенностей окружающей среды более точно оценивать сцену и планировать операции.

В данной статье рассмотрена система, рассчитывающая оптимальный маршрут до целевой точки для выбранного АМР с учетом статических и динамических препятствий, обнаруженных на видеоизображении с потолочной камеры, которая располагается над зоной перемещения робота.

В каждом конкретном случае разработки системы внешнего наблюдения и маршрутизации АМР приходится учитывать специфику поставленной задачи.

Первое, на что стоит обратить внимание, это разработка требований к подсистеме приема и обработки видеоизображения, а также ее предэксплуатационная настройка. В частности, на этапе инициализации системы необходимо осуществить подключение к удаленной навигационной камере и определить параметры алгоритма для устранения оптических искажений с получаемого изображения.

Во-вторых, системе необходимо корректно распознавать роботов и препятствия. Если на рабочей сцене кроме робота, для которого рассчитывается маршрут, находятся другие роботы, они должны быть выделены как препятствия. Также необходимо в режиме реального времени отслеживать возникновение динамических препятствий на карте.

Другой важной проблемой является построение карты и планирование пути. Маршрут, сформированный по построенной локальной карте, должен обеспечить наискорейшее движение робота до конечной точки, исключая возможность столкновения с препятствиями. Однако следует учитывать возможность преодоления роботом небольших препятствий для уменьшения длины маршрута. Кроме того, возможно возникновение шумов (отображение ложных препятствий), которые могут быть связаны, например, с неравномерностью текстуры поверхности, по которой перемещается робот. Данные шумы также не должны влиять на работу программы.

Наконец, необходимо организовать веб-интерфейс для передачи информации о навигационных параметрах и возможных маршрутах АМР в сторонние приложения.

Завершающий этап разработки системы – проведение экспериментальных исследований, подтверждающих работоспособность программного обеспечения и целесообразность применения полученных моделей и алгоритмов для решения задач, поставленных перед системой внешнего видеонаблюдения и маршрутизации АМР.

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ВИЗУАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ АВТОНОМНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

Основные научно-технические проблемы, связанные с реализацией системы видеонаблюдения и планирования маршрута (СВПМ) для АМР, которые были упомянуты во введении, определяют ее обобщенную структуру (рис. 1).

Внешняя среда, изображенная на структурной схеме, динамична, что проявляется в изменениях, происходящих в рабочей зоне робота. Это может быть появление динамических препятствий, перемещение роботов или появление новых. Для планирования корректного маршрута программе необходимо реагировать на подобные изменения в режиме реального времени.

Человеко-машинный интерфейс должен обеспечивать выбор внешней IP-камеры, к которой подключается программа на борту отслеживаемого робота, а также отображение маршрута, полученного после выполнения программы.

Сторонние приложения подключаются к основной программе с помощью UDP протокола [3] и получают данные о маршрутах передвижения робота.

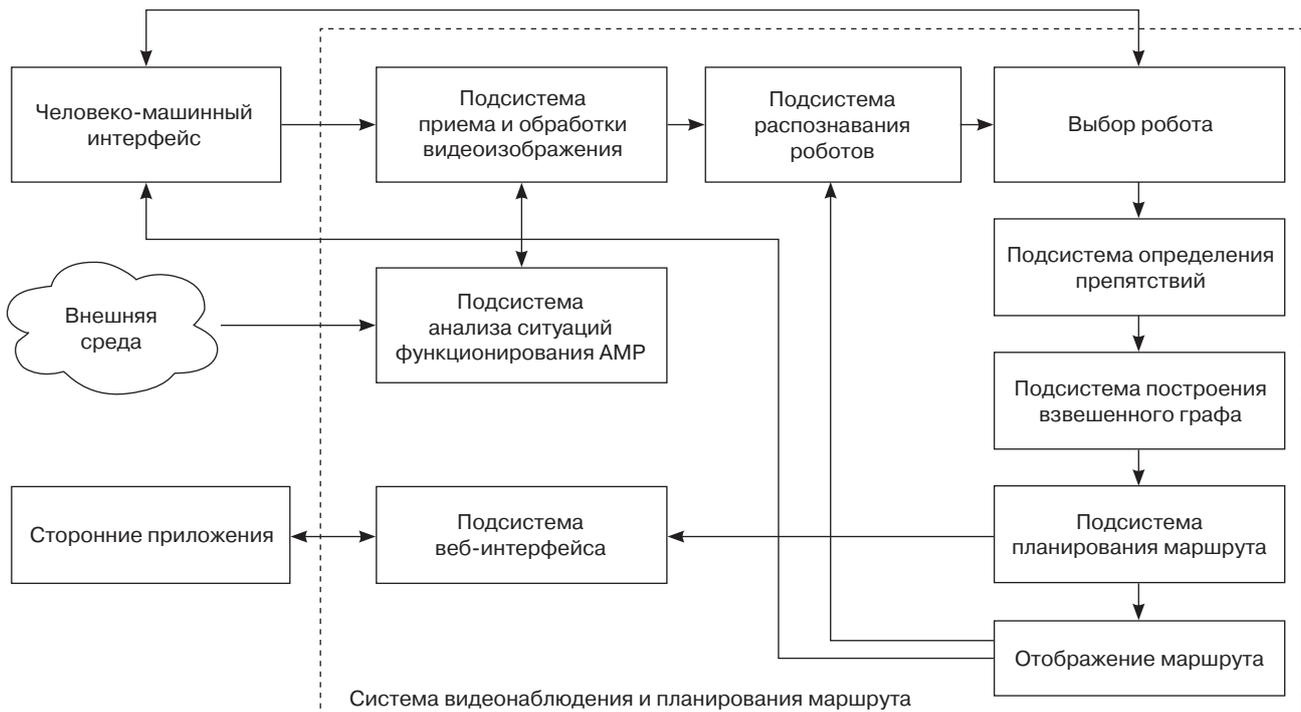


Рис. 1. Структурная схема СВПМ

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОДСИСТЕМЫ ПРИЕМА И ОБРАБОТКИ ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЯ

Реализации подсистемы приема и обработки видеоизображения состоит из основных трех модулей (рис. 2).

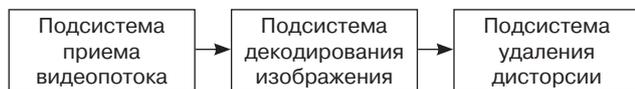


Рис. 2. Подсистема приема и обработки видеоизображения

Данные передаются с IP-камеры Beward BD3670M [4], с помощью которой пользователь получает широкоформатное изображение без разрывов и мертвых зон. Подключение к IP-камере и прием видеопотока обеспечиваются с помощью средств библиотеки компьютерного зрения EmguCV на основе одного из протоколов сетевой передачи информации (HTTP, RTSP и т.д.). При этом осуществляется автоматическое декодирование сжатого видеопотока из формата H264, MJPEG или других в отдельные кадры, представляющие собой массивы яркостей отдельных точек растрового изображения по каналам R, G, B (красный, зеленый и синий, соответственно).

Для устранения отрицательной дисторсии, обусловленной использованием широкоугольного объектива [5], к изображению применяется положительная дисторсия [6]. Определяем, что оптическая ось проходит через центр изображения и заранее подбираем коэффициент линейного усиления.

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ РАСТРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И РАСПОЗНАВАНИЯ ГРАФИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Обработка растровых изображений и распознавание графических объектов осуществляются с помощью методов компьютерного зрения [7]. Целью компьютерного зрения является формирование

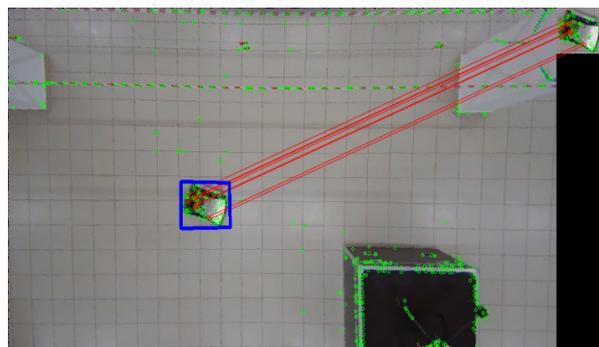


Рис. 3. Обнаружение объекта с помощью SURF детектора

полезных выводов по объектам и сценам реального мира на основе заданного изображения.

В рассматриваемой задаче визуальной навигации АМР необходимо определять на изображении роботов и препятствия. Так как нам заранее известен внешний вид робота (объекта), можно осуществить его поиск на визуальной сцене с помощью алгоритма SURF [8]. Он состоит из трех основных частей: обнаружение особых точек, локальное описание окрестностей этих точек и поиск соответствий.

С помощью детекторов [9] из изображений сцены и объектов извлекаются особые точки [10], для каждой особой точки строится дескриптор [11]. Дескриптор строится на основе исходного изображения и множества распознанных особых точек. Обработав эти данные, получаем множество векторов признаков – по вектору на каждую особую точку. Признаки строятся на основании информации об интенсивности, цвете и текстуре особой точки относительно полного изображения.

На рис. 3 можно наблюдать результат работы SURF детектора. Зелеными окружностями выделены особые точки на изображении сцены (левая часть рисунка) и особые точки на изображении объекта (правая часть рисунка). Для данных точек строятся дескрипторы и по ним находятся соответствия (красные линии, соединяющие особые точки). Искомый объект выделен синим прямоугольником.

Выделение робота прямоугольником происходит с помощью матрицы гомографии, включающей в себя найденные соответствия. С помощью этой матрицы происходит сравнение особых точек на эталонном изображении и сцене и преобразование вершин эталонного изображения с учетом расположения, ориентации и масштаба найденного робота.

Алгоритм поочередно просматривает каждое эталонное изображение до тех пор, пока не получит отрицательный ответ об обнаружении робота. Если найдено недостаточное количество соответствий или в матрице гомографии выявлено несоответствие, считается, что робота, соответствующего

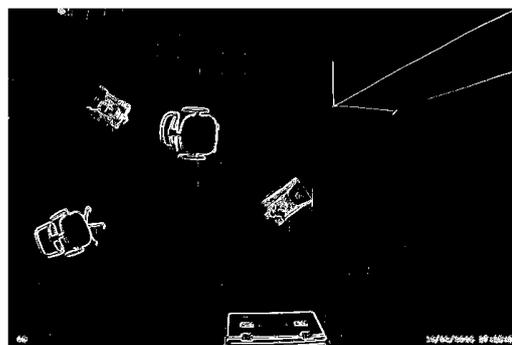


Рис. 4. Применение оператора Собеля

эталонному изображению, на сцене нет. При нахождении робота область, где он расположен, закрашивается.

Задачу определения препятствий можно решить с помощью алгоритмов выделения границ [12], в данном случае задача решена с помощью оператора Собеля (рис. 4) [13].

Оператор Собеля – дискретный дифференциальный оператор, вычисляющий приближенное значение градиента яркости изображения. Результатом применения оператора Собеля в каждой точке изображения является либо вектор градиента яркости в этой точке, либо его норма.

Градиент яркости, вычисленный в каждой точке изображения, позволяет определить направление наибольшего изменения яркости и величину ее изменения. По тому, насколько «резко» или «плавно» меняется яркость изображения, можно судить о вероятности расположения точки на грани объекта.

Карта препятствий (рис. 4), полученная таким образом, позволяет решать вопросы планирования маршрутов передвижения АМР.

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННОГО ДВИЖЕНИЯ АМР С УЧЕТОМ ОБНАРУЖЕННЫХ ПРЕПЯТСТВИЙ

На вход алгоритма поиска траектории подается изображение с выделенными препятствиями и выбранным роботом. Данное изображение делится на равные клетки, по которым может перемещаться робот, и определяется клетка, в которой изначально находится робот. Далее определяется относительное содержание препятствий в каждой клетке по формуле:

$$k = \sum_{x=0}^W \sum_{y=0}^H v_{xy}, \quad (1)$$

где W и H – количество пикселей по горизонтали и вертикали в клетке, соответственно; v_{xy} принимает

значения 1 (если пиксель – белый) и 0 (если пиксель – черный). Все роботы, кроме выбранного, также рассматриваются как препятствия.

Каждая клетка является вершиной графа с меткой, отражающей минимальную длину пути до этой вершины (рис. 5). При создании графа всем меткам присваивается значение бесконечности, кроме метки, соответствующей расположению робота (выделена зеленым цветом), которой присваивается нулевое значение. Робот может перемещаться по ребрам графа, причем стоимость перемещения в каждую соседнюю клетку указана на ребре между данными клетками. В клетки, которые содержат большое процентное соотношение препятствий (выделены красным цветом), робот попасть не может.

Оптимальный маршрут рассчитывается с помощью алгоритма A^* [3]. Данный алгоритм пошагово просматривает все маршруты от начальной вершины к конечной, пока не найдет минимальный. Алгоритм начинает анализ с маршрутов, которые «кажутся» ведущими к цели. Порядок обхода вершин определяется эвристической функцией:

$$f(x) = g(x) + h(x), \quad (2)$$

где $g(x)$ – стоимость пути от начальной вершины; $h(x)$ – функция эвристической оценки расстояния от начальной до конечной вершины.

АЛГОРИТМЫ ОТСЛЕЖИВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Так как расчет маршрута для АМР происходит в реальном времени, существует вероятность появления изменений в рабочей зоне. Алгоритм отслеживания изменений реализован на основе применения низкочастотного фильтра и вычисления хеша по среднему [14].

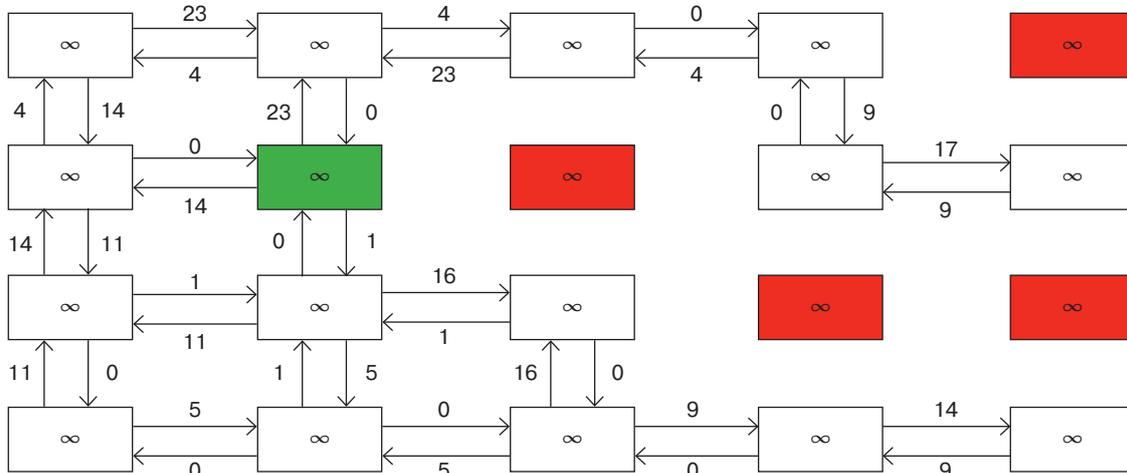


Рис. 5. Модель взвешенного графа

Исходное изображение (для которого рассчитан маршрут) и изображение, полученное с камеры в данный момент времени, уменьшают в размерах, переводят в оттенки серого и вычисляют среднее значение цвета для всех пикселей. Далее строится хеш изображений по формуле:

$$h = \begin{cases} 1, v_i > a \\ 0, v_i \leq a \end{cases} \quad (3)$$

где v_i – значение цвета каждого пикселя; h – среднее значение; a – пороговая величина.

Полученные хеши сравниваются путем подсчета количества разных битов. При нулевом результате картинки, скорее всего, одинаковые, при увеличении данного результата увеличивается вероятность того, что картинки различны.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ И МАРШРУТИЗАЦИИ АМР

При разработке системы видеонаблюдения и маршрутизации АМР упор был сделан на модульность и независимость компонентов, что позволяет изменять и дополнять систему даже на поздних этапах разработки, не нарушая основную структуру программы. Структура ПО системы представлена на рисунке 6.

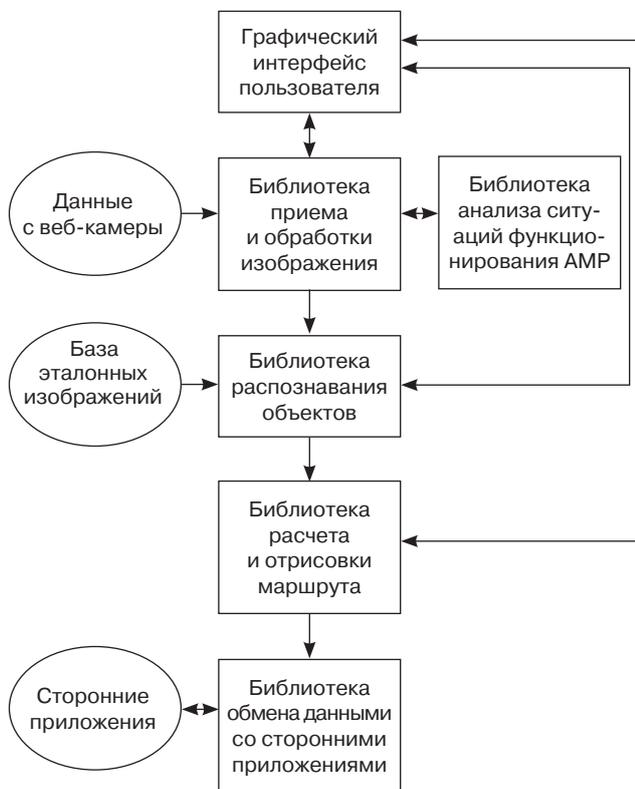


Рис. 6. Структура программного обеспечения системы

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенные эксперименты демонстрируют работоспособность программного комплекса. На рис. 7 приведен пример распознавания нескольких роботов, выбор одного из них (рис. 8) и расчет оптимального маршрута до целевой точки (рис. 9).

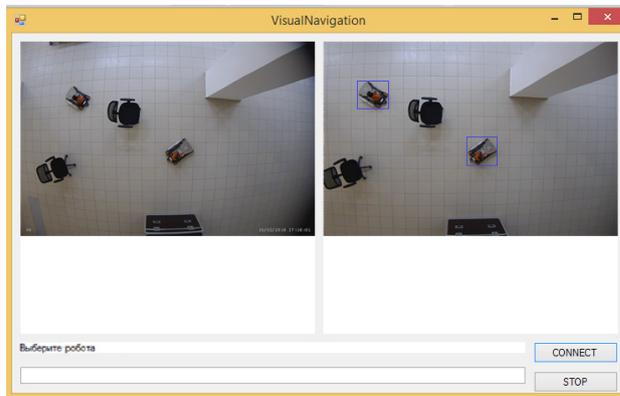


Рис. 7. Режим выбора робота

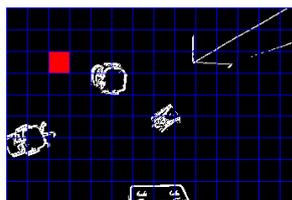


Рис. 8. Выбор робота



Рис. 9. Построение маршрута

Следует отметить, что дискретность маршрута (рис. 9), обусловленная конечным числом разбиений карты местности, может быть устранена за счет применения сплайн-аппроксимации маршрута [15]. Однако данный функционал не включен в перечень возможностей СВПМ в связи с тем фактом, что параметры интерполяции и сглаживания маршрута робота должны определяться в клиентских приложениях на основе передаваемых опорных точек. За счет этого достигается универсальность подсистемы планирования маршрута.

В следующем экспериментальном исследовании рассмотрен случай появления динамического препятствия в рабочей зоне робота. Кроме того, маршрут строится для двурукого робота, который имеет другой внешний вид относительно предыдущего рассмотренного робота, что демонстрирует способность программы распознавать роботов различного типа (рис. 10).

Во время выбора конечной точки маршрута в зоне видимости камеры появляется динамическое препятствие – человек. Программа выдает предупреждение, в котором предлагает пересчитать маршрут с учетом динамического препятствия (рис. 11).

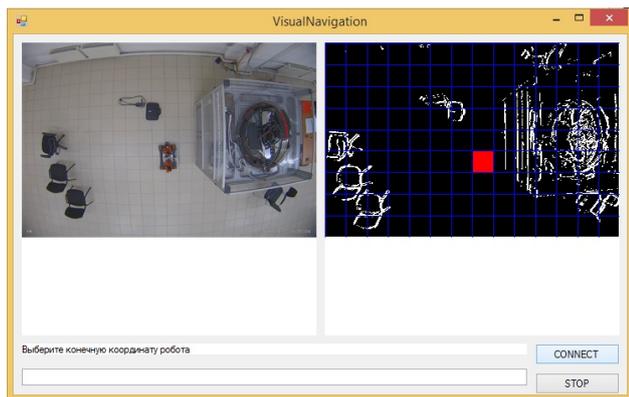


Рис. 10. Распознавание робота

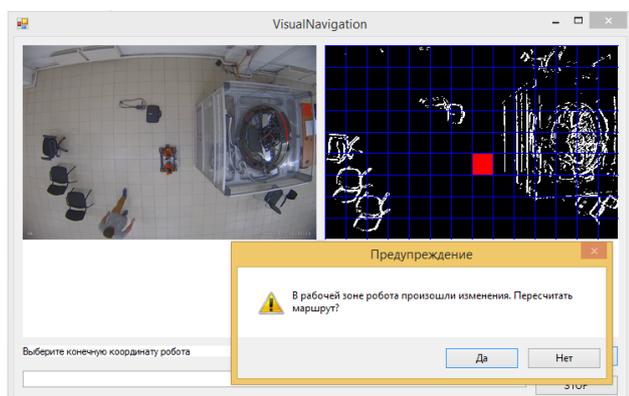


Рис. 11. Появление динамического препятствия

Далее можно выбрать продолжение работы и продолжить расчет маршрута, невзирая на изменения, или начать заново, тогда программа пересчитает траекторию робота.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведенного исследования выявлены основные сферы применения для системы внешнего наблюдения и маршрутизации АМР. В данной области разработано множество технических решений, позволяющих вычислить оптимальный маршрут для АМР, с уменьшением затрат на сенсоры и датчики, расположенные на самом роботе для локализации его на местности. При этом важное значение имеет возможность перепланировать маршрут при возникновении неучтенных заранее препятствий на любом участке пути, попадающем в зону видимости камер.

С учетом широкого спектра проблем в данной сфере в рамках данного исследования были достигнуты следующие результаты:

1. Разработана структура системы внешнего наблюдения и анализа ситуаций функционирования АМР.
2. Разработаны алгоритмы распознавания объектов на изображениях с видеокамер, включая мобильных роботов и препятствия на пути их движения, с применением технологии дескрипторов ключевых точек.

3. Разработаны алгоритмы планирования целенаправленных движений АМР с учетом обнаруженных препятствий.

4. Разработано программное обеспечение для анализа среды перемещения АМР, определения их навигационных параметров и маршрутизации.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили работоспособность и универсальность разработанных алгоритмов. Были получены корректные данные при распознавании различных роботов. Кроме того, система показала свою работоспособность при обнаружении нескольких роботов на изображении одновременно. В каждом из этих случаев программа проложила оптимальный маршрут и осуществила передачу данных удаленным приложениям.

Широта проблематики внешнего наблюдения и маршрутизации АМР открывает целый ряд возможных направлений дальнейшего развития системы. Так, например, можно отслеживать перемещения робота, чтобы была возможность корректировать его движение на протяжении всего маршрута.

Кроме того, отдельное внимание стоит уделить возможности вести наблюдения сразу с нескольких камер. Данная модернизация позволит увеличить рабочую зону робота. Но также появятся новые проблемы, такие как: объединение изображений с нескольких камер в одно или непрерывная работа АМР при смене рабочей камеры.

Интересное направление развития систем визуальной навигации связано с возможностью локализации целевого объекта при наклонном положении видеокамеры, что открывает перспективы для оперативного развертывания подобных систем в полевых условиях.

Не менее важной представляется перспектива применения нейросетевых методов анализа изображений для классификации разнородных объектов в зоне движения мобильного робота. Данная функциональная возможность может оказаться полезной для комплексной оценки ситуаций функционирования робота в ходе выполнения поставленных прикладных задач.

Вклад авторов

М.В. Егорцев – разработка программного обеспечения для распознавания и локализации мобильных роботов, подготовка иллюстраций, описание результатов.

С.А.К. Диане – разработка архитектуры программного комплекса, научное редактирование.

Н.Д. Кац – обзор литературных источников, настройка аппаратного обеспечения системы маршрутизации мобильных роботов.

Authors' contribution

M.V. Egortsev – development of software for detection and localization of mobile robots, preparation of illustrations, description of the results.

S.A.K. Diane – development of the software package architecture, scientific editing.

N.D. Kaz – literature review, configuring the hardware of the mobile robot routing system.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lee D., Parangi A. CS 4758: Automated semantic mapping of environment. 2013. URL: https://www.cs.cornell.edu/courses/cs4758/2013sp/final_projects/spring_2011/Dongsu_Aperahama.pdf
2. Le Saux B., Sanfourche M. Rapid semantic mapping: learn environment classifiers on the fly. In: *Proc. 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. November 3–7, 2013. Tokyo, Japan. <https://doi.org/10.1109/IROS.2013.6696888>
3. Kurose J.F., Ross K.W. *Computer networking: A top-down approach*. 5th ed. Boston, MA: Pearson Education; 2010. 864 p. ISBN 978-0-13-136548-3
4. Преимущества IP-видеонаблюдения над аналоговым на примере BEWARD. URL: <https://www.beward.ru/articles/statya-preimushhestva-ip-videonablyudeniya-nad-analogovym-na-primere-oborudovaniya-beward/>
5. Иофис Е.А., Шебалин И.Ю. *Фотокинетехника*. М.: Советская энциклопедия; 1981. С. 80, 81.
6. Helland T. A simple algorithm for correcting lens distortion. URL: <http://www.tannerhelland.com/4743/simple-algorithm-correcting-lens-distortion/>
7. Манюкова Н.В. Компьютерное зрение как средство извлечения информации из видеоряда. *Математические структуры и моделирование*. 2015;4(36):123–128.
8. Mikolajczyk K., Schmid C. A performance evaluation of local descriptors. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2005;27(10):1615–1630. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2005.188>
9. Абилмажинова Б.С., Андреев В.О. Детекторы углов или как происходит распознавание маркеров дополненной реальности. *Инновации в науке*. 2016;2(51):156–162.
10. Ивашечкин А.П., Василенко А.Ю., Гончаров Б.Д. Методы нахождения особых точек изображения и их дескрипторов. *Молодой ученый*. 2016;15(119):138–140.
11. Бovyрин А.В., Дружков П.Н., Ерухимов В.Л., Половинкин А.Н. и др. *Разработка мультимедийных приложений с использованием библиотек OpenCV и IPP*. М.: ИНТУИТ; 2016. 515 с.
12. Canny J. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1986;PAMI-8(6):679–698. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1986.4767851>
13. Blair B., Murphy C. Difference of gaussian scale-space pyramids for SIFT feature detection. 6.375: Complex Digital Systems Design Final Project Report, Spring 2007. URL: http://www.ballardblair.com/projects/Difference_of_Gaussian_paper.pdf
14. Рудаков И.В., Васютрович И.М. Исследование перцептивных хеш-функций изображений. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2015;08:269–280. <http://dx.doi.org/10.7463/0815.0800596>
15. Юферев В.С. Локальная аппроксимация кубическими сплайнами. *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 1981;21(1):5–10.

REFERENCES

1. Lee D., Parangi A. CS 4758: Automated semantic mapping of environment. 2013. Available from URL: https://www.cs.cornell.edu/courses/cs4758/2013sp/final_projects/spring_2011/Dongsu_Aperahama.pdf
2. Le Saux B., Sanfourche M. Rapid semantic mapping: learn environment classifiers on the fly. In: *Proc. 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. November 3–7, 2013. Tokyo, Japan. <https://doi.org/10.1109/IROS.2013.6696888>
3. Kurose J.F., Ross K.W. *Computer networking: A top-down approach*. 5th ed. Boston, MA: Pearson Education; 2010. 864 p. ISBN 978-0-13-136548-3
4. Preimushchestva IP-videonablyudeniya nad analogovym na primere BEWARD (Advantages of IP-video surveillance over analog by the example of BEWARD). Available from URL: <https://www.beward.ru/articles/statya-preimushhestva-ip-videonablyudeniya-nad-analogovym-na-primere-oborudovaniya-beward/> (in Russ.).
5. Iofis E.A., Shebalin I.Yu. *Fotokinotekhnika (Photocinotechnics)*. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya; 1981, p. 80, 81 (in Russ.).
6. Helland T. A simple algorithm for correcting lens distortion. Available from URL: <http://www.tannerhelland.com/4743/simple-algorithm-correcting-lens-distortion/>
7. Manukova N.V. Computer vision as a means of extracting information from the video. *Matematicheskie struktury i modelirovanie = Mathematical Structures and Modeling*. 2015;4(36):123–128 (in Russ.).
8. Mikolajczyk K., Schmid C. A performance evaluation of local descriptors. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2005;27(10):1615–1630. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2005.188>
9. Abilmazhinova B.S., Andreev V.O. Corner detectors or how to implement marker detection for augmented reality. *Innovatsii v nauke*. 2016;2(51):156–162 (in Russ.).
10. Ivashchkin A.P., Vasilenko A.Yu., Goncharov B.D. Methods for finding special points of an image and their descriptors. *Molodoi uchenyi = Young scientist*. 2016;15(119):138–140 (in Russ.).
11. Bovyryn A.V., Druzhkov P.N., Erukhimov V.L., Polovinkin A.N., et al. *Razrabotka mul'timediinykh prilozhenii s ispol'zovaniem bibliotek OpenCV i IPP (Development of multimedia applications using the OpenCV and IPP libraries)*. Moscow: INTUIT; 2016. 515 p. (in Russ.).
12. Canny J. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1986;PAMI-8(6):679–698. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1986.4767851>
13. Blair B., Murphy C. Difference of gaussian scale-space pyramids for SIFT feature detection. 6.375: Complex Digital Systems Design Final Project Report, Spring 2007. Available from URL: http://www.ballardblair.com/projects/Difference_of_Gaussian_paper.pdf
14. Rudakov I.V., Vasiutovich I.M. Analysis of perceptual image hash functions. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Bauman = Science and Education of Bauman MSTU*. 2015;08:269–280 (in Russ.). <http://dx.doi.org/10.7463/0815.0800596>

15. Yuferev V.S. Local approximation by cubic splines. *U.S.S.R. Comput. Math. Math. Phys.* 1981;21(1):2–7. [https://doi.org/10.1016/0041-5553\(81\)90126-9](https://doi.org/10.1016/0041-5553(81)90126-9)
[Yuferev V.S. Lokal'naya approksimatsiya kubicheskimi splainami. *Zh. vychisl. matem. i matem. fiz. = USSR. Comput. Math. Math. Phys.* 1981;21(1):5–10 (in Russ.)]

Об авторах

Егорцев Максим Викторович, аспирант кафедры проблем управления Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: maksimegortsev1@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-2096-2544>

Диане Секу Абдель Кадер, к.т.н., доцент кафедры проблем управления Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: sekoudiane1990@gmail.com. ResearcherID: T-5560-2017 Scopus Author ID: 57188548666, <https://orcid.org/0000-0002-8690-6422>

Кац Николай Дмитриевич, аспирант кафедры проблем управления Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: nkatz777@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-0740-4628>

About the authors

Maksim V. Egortsev, Postgraduate Student, Department of Control Problems, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: maksimegortsev1@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-2096-2544>

Sekou Abdel Kader Diane, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Control Problems, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: sekoudiane1990@gmail.com. ResearcherID: T-5560-2017, Scopus Author ID: 57188548666, <https://orcid.org/0000-0002-8690-6422>

Nikolai D. Kaz, Postgraduate Student, Department of Control Problems, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: nkatz777@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-0740-4628>

УДК 530.1: 577.3

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-24-39>

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Излучение сверхбыстрых точечных диполей, равномерно движущихся вблизи хиральных сред

В.Н. Каданцев[®]

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[®]Автор для переписки, e-mail: appl.synergy@yandex.ru

Резюме. Обсуждаются особенности излучения сверхбыстрых точечных сгустков заряженных частиц, равномерно движущихся вблизи границ раздела с гиротропной средой. Показано, что некоторые типы электромагнитных излучений – переходное и/или черенковское излучение, обладают характеристиками суперхиральных полей и, следовательно, могут быть эффективно использованы для исследования хиральных структур (например, для обнаружения кругового дихроизма, частотных характеристик показателей преломления), различных материалов и, в том числе, биоматериалов. Сверхбыстрые (релятивистские) частицы могут служить «инструментом» не только для изучения структуры различных материалов, но и использоваться в качестве «генераторов» квазичастиц, определяющих «динамические» свойства исследуемых материалов, а также особенностей их взаимодействия с излучениями различной природы и отклика на внешние воздействия. В работе рассматриваются некоторые типы циркулярно-поляризованных ЭМ-волн, распространяющихся в оптически активных (магнитоактивных, естественноактивных, гиротропных и хиральных) средах. С помощью обобщенной теоремы взаимности для сред, характеризуемых эрмитовым тензором диэлектрической проницаемости, рассмотрены переходное и черенковское излучения, возбуждаемые равномерно движущимся сгустком заряженных частиц при пересечении им (или перемещении вдоль) границы раздела сред, одна из которых – оптически активная гиротропная среда. Показано, что суперхиральные электромагнитные поля переходного и черенковского излучений диполей могут служить источником хиральных коллективных возбуждений в магнитоактивных и естественноактивных средах. Исследованные механизмы взаимодействия электромагнитного излучения с хиральными материалами (структурами и средами) – один из возможных физических подходов к решению проблемы возникновения хиральной чистоты биосферы и выяснению фактора дерацемизации органической первобытной среды. Изложена новая гипотеза, предполагающая, что сверхвысокоскоростные сгустки заряженных частиц космического происхождения могут служить причиной дерацемизации предбиосферы.

Ключевые слова: теорема взаимности, магнитоактивная среда, черенковское излучение, переходное излучение, геликон, хиральность, квазичастицы, дерацемизация

• Поступила: 09.09.2020 • Доработана: 21.12.2020 • Принята к опубликованию: 29.03.2021

Для цитирования: Каданцев В.Н. Излучение сверхбыстрых точечных диполей, равномерно движущихся вблизи хиральных сред. *Российский технологический журнал*. 2021;9(3):24–39. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-24-39>

Прозрачность финансовой деятельности: Автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

The radiation from ultrafast point dipoles, moving uniformly near chiral media

Vasily N. Kadantsev @

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

@ Corresponding author, e-mail: appl.synergy@yandex.ru

Abstract. The article discusses the features of the radiation of ultrafast point clusters of charged particles moving uniformly near a gyrotropic medium interface. It is shown that some types of electromagnetic radiation – transient and/or Cherenkov radiation – have the characteristics of superchiral fields. Therefore, they can be effectively used to study chiral structures (for example, to detect circular dichroism, the frequency characteristics of refractive indices), various materials, including biomaterials. Ultrafast (relativistic) particles can serve as a «tool» not only for studying the structure of various materials. They can also be used as «generators» of quasiparticles that determine the «dynamic» properties of the materials under study, as well as the features of their interaction with radiation of various nature and response to external influences. In this paper, some types of circularly polarized EM waves propagating in optically active (magnetoactive, naturally active, gyrotropic, and chiral) media are considered. Using the generalized reciprocity theorem for media characterized by the Hermitian permittivity tensor, we consider the transient and Cherenkov radiation excited by a uniformly moving bunch of charged particles when it crosses (or moves along) the interface of media, one of which is an optically active gyrotropic medium. It is shown that the superchiral electromagnetic fields of the transition and Cherenkov radiation of dipoles can serve as a source of chiral collective excitations in magnetoactive and naturally active media. The investigated mechanisms of interaction of electromagnetic radiation with chiral materials (structures and media) are one of the possible physical approaches to solving the problem of the chiral purity of the biosphere and to elucidate the factor of deracemization of the organic primeval environment. A new hypothesis is presented, suggesting that ultra-high-speed clumps of charged particles of cosmic origin can cause deracemization of the prebiosphere.

Keywords: remote sensing of the Earth, spacecraft, images of Earth landscapes, mathematical model, compensation of kinematic image blurring, angular velocity

• Submitted: 09.09.2020 • Revised: 21.12.2020 • Accepted: 29.03.2021

For citation: Kadantsev V.N. The radiation from ultrafast point dipoles, moving uniformly near chiral media. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(3):24–39 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-24-39>

Financial disclosure: The author has no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The author declares no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшим объектом исследований современной физики являются различные материалы и структуры, в том числе и биологические. В первую очередь, это связано с появлением искусственно сконструированных (нано)материалов и становлением ядерной медицины. Известно, что в веществе могут происходить коллективные многочастичные физические процессы. Им соответствуют квазичастицы, которые определяют динамические свойства этих материалов и структур. Число известных квазичастиц с каждым годом увеличивается вместе с появлением новых искусственно сконструированных (нано)материалов.

Эксперименты с квазичастицами могут продвинуть современную физику и наше понимание свойств различных материалов на качественно новый уровень, но для этого необходимы конкретные и весьма труднодостижимые условия. Конечной целью этих исследований является создание теории конденсированных состояний вещества, значимость которой для науки и практики человечества трудно переоценить. Однако такую теорию невозможно создать умозрительно, из некоторых общих принципов. Опыт физики показывает, что этого почти никогда не бывает. Для создания теории конденсированных состояний вещества, по-видимому, недостаточно имеющегося фактического материала и требуются эксперименты, основанные

на исследовании особенностей излучения в веществе частиц высокой энергии. Как и при пользовании микроскопом (обычным или электронным), о структуре наблюдаемого объекта по картине рассеяния на нем потока частиц – световых квантов в оптическом микроскопе или электронов – в электронном, мы можем судить по рассеянию и излучению частиц высокой энергии. Источником сверхбыстрых частиц могут служить, например, ускорители, космическое излучение (потоки космических частиц) и пр. Ускорители заряженных частиц – это микроскопы современной физики. В этом смысле электронный микроскоп – тоже ускоритель [1]. Теоретическим пределом разрешения всякого микроскопа является, как известно, длина волны света или дебройлевской волны используемого потока частиц. Чем выше энергия частицы, тем короче длина волны. При этом сверхбыстрые (релятивистские) частицы могут служить «инструментом» не только для изучения *структуры различных материалов, но и являются «генераторами» квазичастиц, определяющих «динамические» свойства* исследуемых материалов, особенности их взаимодействия с излучениями различной природы и отклика на внешние воздействия. Важно отметить, что указанные особенности взаимодействия (характер рассеяния, энергетических потерь и/или условия возбуждения квазичастиц) различных излучений с исследуемыми структурами определяются не только энергетическими и спектральными параметрами электромагнитного поля излучения, но и «конфигурационным соответствием» – симметрией, поляризацией, скоростью пространства и др.

В реальных условиях характеристики излучения будут, вероятно, определяться сразу несколькими процессами и обстоятельствами, в частности неоднородностью среды, изменениями ее свойств во времени и т.д. Только конкретный анализ может в каждом случае выявить, какой из механизмов излучения доминирует. «Поэтому возможность использования быстрых частиц и создаваемого ими излучения (переходного, черенковского) в качестве зонда хотя и не представляется заманчивой, но *о ней не следует забывать*» [2]. Это замечание, сделанное 45 лет назад нобелевским лауреатом академиком В.Л. Гинзбургом, актуально и сегодня.

При движении быстрых заряженных частиц через металлы, полупроводники, т.е. твердые тела, имеющие слабосвязанные с ионами электроны, генерируются элементарные возбуждения – *экситоны, плазмоны* – кванты продольных волн, связанных с коллективным движением электронов относительно тяжелых ионов в твердых телах [3]. Начиная с первого успешного подтверждения существования поверхностных плазмонов [4–7] в тонких металлических пленках, возбуждение плазмонов быстрыми

электронами широко используется в спектроскопии потери энергии электрона (EELS) для исследования плазменных свойств ультраотонких или двумерных, электронных систем, включая графеновые плазмоны.

Кроме *плазмонов*, в плазме и твердых телах – металлах и полупроводниках, имеющих слабосвязанные с ионами электроны, находящихся в магнитном поле, существуют *геликонные* волны или просто *геликоны*, которые являются одними из ряда коллективных движений электронов. Такая волна представляет собой низкочастотное (электромагнитное – ЭМ) возбуждение некомпенсированной плазмы *в магнитном поле* [8–12]. В отличие от газовой плазмы, свойства твердотельной плазмы и среда, в которой она находится, в гораздо большей степени поддаются нашему контролю. Поэтому изучение плазмы твердого тела не только представляет самостоятельный интерес, но и полезно для проверки теории идеальной плазмы. Кроме того, в плазме твердого тела существуют явления, не имеющие аналогов в газовой плазме. Эти эффекты связаны с особенностями электронной структуры твердого тела, и изучение волн, связанных с коллективным движением электронов, может дать важную информацию об этих особенностях. Речь, в частности, идет об электромагнитных геликонных волнах. В то время как первые работы по изучению геликонных волн были направлены на понимание их свойств, в более поздних экспериментах геликонные волны использовались в качестве инструмента для изучения некоторых электронных свойств реальных металлов в магнитном поле [9, 11]. Особенностью этого типа плазменных волн является их *хиральность*. Вид геликонной волны в замагниченной плазме (рис. 1 [13]) отражает проявления хиральности в коллективных явлениях в магнитоактивных средах, таких как газовая и твердотельная плазма, помещенная в магнитное поле.

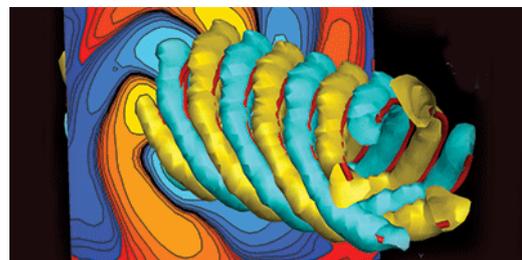


Рис. 1. Вид геликонной волны в замагниченной плазме [13]

Хиральными (или зеркально антиподными – *энантиомерами*) называются объекты, не обладающие центром и плоскостью инверсии. Такие объекты могут существовать в двух формах – правой и левой. Если такой объект отразить в зеркале, то получится объект, несовместимый в пространстве с исходным,

как левая и правая руки (греч. χείρ – рука) (рис. 2). Отсюда, кстати, происходит и термин «хиральность».

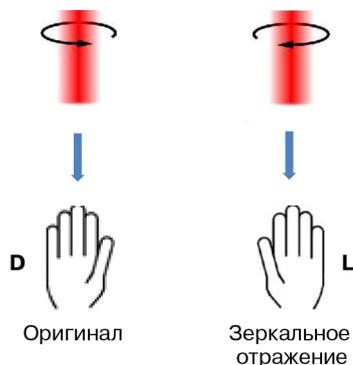


Рис. 2. Зеркальные антиподы – энантиомеры

Как известно, при попадании интенсивного света (ЭМП) на твердые тела образуются экситоны (выбитые из их мест светом отрицательно заряженные электроны) и оставленные на «их месте» положительно заряженные дырки. Недавно обнаружены квазичастицы, которые состоят из связанных частиц и античастиц, вращающихся вокруг друг друга на поверхности твердых тел. Авторы этого исследования назвали их «хиральными поверхностными экситонами» (рис. 3) [14].

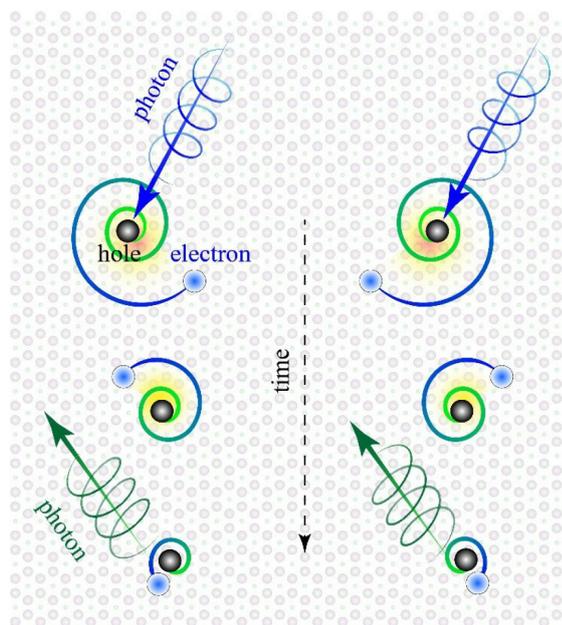


Рис. 3. Хиральные поверхностные экситоны [14]

Команда физиков из США, Сингапура, Тайваня и Японии обнаружила, что в некоторых слоистых материалах имеет место хиральность, которой можно управлять с помощью ЭМП с различной поляризацией [15]. Такой эффект авторы обнаружили

у диселенида титана $TiSe_2$. Обычно этот материал содержит равное количество участков электронной плотности с правым и левым вращениями и его «хиральность» обусловлена не расположением атомов, а распределением электронной плотности. Из результатов данной работы следует, что это отношение можно изменить, воздействуя на материал светом с разной поляризацией и, следовательно, оптическое излучение с известной поляризацией может помочь выяснить хиральность материала.

Некоторые органические молекулы, включая содержащиеся в живых организмах, могут находиться в двух формах, которые относятся друг к другу как зеркальные отражения. Это также проявление хиральности. Пара таких хиральных объектов или систем называется энантиомерами (или энантиомерами) для данного типа молекул. Энантиомеры в большинстве случаев идентичны, и только при взаимодействии с другими хиральными объектами они становятся различимыми [16–23].

Все наиболее важные вещества, из которых построены живые организмы, состоят из диссимметричных, или, как принято говорить, хиральных, молекул, которые могут существовать в двух зеркально-симметричных формах. При этом вещества, составляющие конституциональную основу структуры и несущие основные жизненные функции, во всей биосфере встречаются в организмах преимущественно в одной из этих двух форм. Следствием неравного количества молекул двух указанных форм в веществе и является вращение этим веществом плоскости поляризации света. Таким образом, оптическая активность, которая обнаруживается в живой материи, является индикатором определенной диссимметрии этой материи.

Циркулярно поляризованный свет (CPL) также является примером хирального объекта, и существует множество оптических явлений, обычно называемых *оптической активностью*, происхождение которых можно свести к различной реакции молекул на правый и левый циркулярно поляризованный свет. Одним из примеров таких эффектов является магнитно-оптическое вращение, вращение плоскости поляризации линейно поляризованного пучка при его распространении в хиральной среде, которое может быть описано в терминах *различных показателей преломления* для двух типов CPL. Другой пример – *круговой дихроизм (CD)*, *различная скорость поглощения* хиральных молекул в присутствии левого и правого циркулярно поляризованного света, который преобразует линейно поляризованный пучок в эллиптически поляризованный. Оба явления сосуществуют в частотных областях, которые представляют поглощение. Зачастую такие две формы одной молекулы – энантиомеры имеют различные «оптические» свойства.

Структура биологических материалов – структурный порядок биополимеров, таких как белки, определяет физические и химические свойства и взаимодействия биологических систем с окружающей средой и, следовательно, является критическим параметром в ряде биологических проблем. И наиболее важным в ряду таких параметров является *хиральность* биологических макромолекул. Зеркальные изомеры (энантимеры) таких молекул обычно называют «левыми» и «правыми» изомерами и в биофизической литературе обозначают их буквами L (от лат. *laevo* – левый) и D (от лат. *dextro* – правый). Этими символами мы и будем пользоваться в дальнейшем.

Соотношение молекул с различным типом хиральности в хиральной среде часто характеризуют «параметром порядка» $\eta = (L - D)/(L + D)$, где L и D – концентрации энантимеров. Большинство важных молекулярных строительных блоков жизни, таких как аминокислоты и сахара, существуют в виде левого L ($\eta = 1$), или правого D ($\eta = -1$), изомеров (энантимеров). Одна из самых значимых особенностей жизни заключается в том, что, как отмечалось выше, большинство этих молекул относятся вообще только к одному типу хиральности, при том, что многие химические процессы, проводимые в лабораторных условиях для получения этих веществ, не отдают предпочтения какой-либо конкретной форме хиральности, т.е. результатом таких химических процессов – продуктом, являются *рацемические* смеси ($\eta = 0$). Способность к достижению хирально-селективного синтеза – хиральная индукция ($\eta \neq 0$), имеет большое значение в стереохимии, молекулярной биологии и фармакологии.

Тот факт, что живые организмы используют лишь один из двух зеркальных изомеров и совершенно не используют другой (в нуклеиновых кислотах содержатся лишь D -изомеры сахаров, а в ферментах – лишь L -изомеры аминокислот), до сих пор представляет собой интригующую загадку и указывает на то, что фактор «хиральной чистоты» играет важную, если не решающую роль в жизни. Этот феномен – нарушение зеркальной симметрии молекулярной основы жизни, по-видимому, первый и один из самых ярких примеров нарушения симметрии в естествознании. Несмотря на множество идей о происхождении химической хиральности, удовлетворительного объяснения этому не было найдено. Вопрос о хиральности молекул в живых организмах – казалось бы, узко биохимический вопрос, вырос в крупную и очень разностороннюю проблему физики и биологии, до сего времени не решенную, а вопрос о диссимметрии живых систем, в значительной мере, перешел в компетенцию физики, вплоть до построения теорий, объясняющих всю «сложность»

нашего мироздания хиральностью его базовых элементов [24–31].

Зондирование структурного порядка в биопластах является сложной задачей, учитывая необходимую высокую чувствительность в случае малых количеств материала, что делает обычные инструменты биоструктурного зондирования неэффективными. Известные спектроскопические методы для рутинного быстрого контроля структурного порядка в биопластах обычно применяются только для моделирования однокомпонентных систем, обладающих сложными спектрами (спектрограммами) со многими перекрывающимися полосами, которые очень чувствительны к ориентации. Поэтому такие методы не являются универсальными и не могут быть применены к реальным многокомпонентным биопластам.

Одним из наиболее перспективных путей решения проблем, связанных с разработкой методов зондирования структурного порядка в хиральных плазмонных наноструктурах и биоматериалах, является создание электромагнитных «ближних полей» вокруг хиральных структур и молекул, которые характеризуются значительной хиральной асимметрией (рис. 4). Степень асимметрии таких ЭМП удобно характеризовать параметром [24]:

$$\alpha = \frac{E_L^2 - E_D^2}{E_L^2 + E_D^2}, \quad (1)$$

где E_L, E_D – значения векторов напряженности электрического лево- и право- поляризованных составляющих хирального ЭМП. Степень асимметрии ЭМП, проявляющих большую хиральную асимметрию, чем циркулярно поляризованный свет в свободном пространстве ($|\alpha| = 0$), называют суперхиральными полями (по терминологии авторов – *superchiral fields, superchirality* [17], $|\alpha| > 0$). В суперхиральной спектроскопии измеряются асимметричные спектральные сдвиги, вызванные хиральными молекулами; они возникают из-за различия эффективных показателей преломления для левого E_L и правого E_D суперхиральных полей. Эта спектроскопия основана на том же принципе, что и для датчика поверхностного плазмонного резонанса [4], то есть на зависимости спектральных положений плазмонных резонансов от диэлектрических сред на поверхностях наноструктур. Асимметрия вызванного хиральностью спектрального сдвига пика должна быть максимальной, когда хиральная асимметрия ближнего ЭМП достигает максимальных значений. В работе [13] путем численного моделирования продемонстрирована эффективность суперхиральных полей, генерируемых хиральными наноструктурами для

исследования структурного порядка белковых молекул в сложных многокомпонентных биологических слоях, которые используются в реальных сложных биологических интерфейсах и в биосенсинге. Для этого авторы исследовали характер взаимодействия света с веществом в зависимости от электрического и магнитного векторов поля оптического пучка, а также электрических и магнитных дипольных моментов хиральных молекул иммуноглобулина и, соответственно, их поляризуемости.

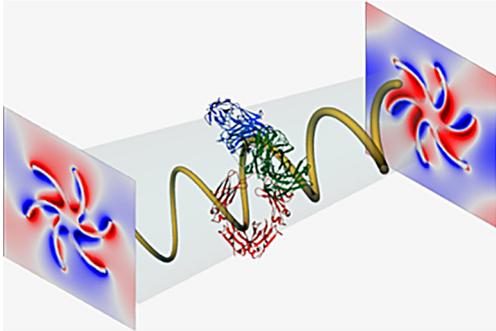


Рис. 4. Схема, иллюстрирующая метод зондирования структурного порядка в хиральных плазмонных наноструктурах и биоматериалах путем создания электромагнитных «ближних полей» [24]

В данной работе рассматриваются особенности в излучении ЭМ-полей сверхбыстрыми точечными диполями, равномерно движущимися в оптически активных (магнитоактивных, гиротропных и хиральных) средах при наличии границ раздела между оптически активной средой и диэлектриком. Показано, что некоторые типы оптических излучений – переходное и/или черенковское излучение, обладают характеристиками суперхиральных полей и, следовательно, могут быть эффективно использованы для исследования хиральной структуры (например, для обнаружения кругового дихроизма, частотных характеристик показателей преломления) различных материалов и, в том числе, различных биоматериалов.

1. ИЗЛУЧЕНИЕ СГУСТКА ЗАРЯДОВ, ОБЛАДАЮЩЕГО СОБСТВЕННЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ И/ИЛИ МАГНИТНЫМ МОМЕНТОМ, ДВИЖУЩЕГОСЯ С ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТЬЮ В ГИРОТРОПНОЙ СРЕДЕ

Как известно, *излучение Вавилова – Черенкова* (ниже – В.–Ч.) имеет место, если заряд (или другой источник с равной нулю собственной частотой, например, постоянный электрический или магнитный диполь) *равномерно* движется со скоростью v , превышающей фазовую скорость света в рассматриваемой прозрачной среде $c_{\phi} = c/n(\omega)$, где $n(\omega = \sqrt{\epsilon\mu})$ – показатель преломления на частоте ω [2]. При этом,

если среда однородна в пространстве и не изменяется во времени, то излучение В.–Ч. является единственно возможным типом излучения равномерно движущегося заряда. Угол θ , под которым происходит излучение (угол между v и волновым вектором волны κ), определяется при этом соотношением $\cos \theta = c/vn(\omega)$.

Переходное излучение. Если среда неоднородна и/или изменяется во времени или если такая среда расположена вблизи траектории источника, ситуация существенно изменяется. Именно в таких условиях, вообще говоря, возникает переходное излучение, понимаемое в широком смысле слова и представляющее собой излучение, имеющее место при равномерном и прямолинейном движении заряда (или других источников, не обладающих собственной частотой) в неоднородной среде, в переменной во времени среде или вблизи таких сред и границ раздела между средами. При этом источник может перемещаться с постоянной скоростью $v < c_{\phi} = c/n(\omega)$, т.е. когда излучение В.–Ч. не возникает. Разумеется, переходное излучение в общем случае может сосуществовать и интерферировать с черенковским излучением. Однако для понимания физики интересующих нас явлений естественно рассмотреть переходное и В.–Ч. излучения каждое в отдельности.

Важно отметить, что всякое излучение и, в т.ч. переходное и черенковское излучение с длиной волны λ , формируется не в точке, а в некоторой области («зоне формирования»), размер которой определяется длиной λ , но может и значительно ее превосходить [34]. Поэтому, например, эффект В.–Ч. возникает не только при движении частицы в вакууме, но и вблизи среды, в которой выполнены соответствующие условия излучения – в канале, в щели или вблизи границы раздела сред с различными оптическими свойствами) [2].

2. ЭМ-ВОЛНЫ В ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ СРЕДАХ. СУПЕРХИРАЛЬНОСТЬ

Здесь мы рассмотрим некоторые типы циркулярно-поляризованных ЭМ-волн, распространяющихся в оптически активных (магнитоактивных, естественноактивных, гиротропных и хиральных) средах. Свойства таких волн и их квантов – квазичастиц, определяются электронной структурой таких материалов (сред). Разумеется, исследовав свойства этих волн и условия их генерации, мы можем получить информацию о динамических свойствах указанных материалов и сред. Кроме того, в принципе такие поля могут быть использованы для обнаружения, например, *усиленного эффекта кругового дихроизма* (суперхиральности молекулярных структур). Как отмечалось ранее, исследования взаимодействия света с веществом [17–24] выявили связь конфигурации

суперхиральных ЭМП с наведенными электрическими и магнитными дипольными моментами хиральных молекул и, соответственно, электрическими и магнитными дипольными поляризуемостями среды. Отметим, что не только дипольные, но и мультиполя более высокого порядка могут также вносить свой вклад во взаимодействие световых пучков с веществом, но мы предполагаем здесь, что эти вклады достаточно малы, чтобы ими можно было безопасно пренебречь.

Кратко рассмотрим свойства ЭМП излучения в оптически активных (естественноактивных, гиротропных и хиральных) средах на примере магнитоактивной среды – плазмы, помещенной в магнитное поле.

Находящаяся в магнитном поле плазма становится анизотропной, и ее электромагнитные свойства при пренебрежении пространственной дисперсией характеризуются зависящим от частоты тензором комплексной диэлектрической проницаемости. В отсутствие поглощения тензор диэлектрической проницаемости не является вещественным и удовлетворяет лишь условию эрмитовости

$$\hat{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_1 & -i\chi & 0 \\ i\chi & \epsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_2 \end{pmatrix}, \quad \epsilon_{ij} = \epsilon_{ji}^*, \quad (2)$$

где * – знак комплексного сопряжения.

Находящаяся в магнитном поле среда называется магнитоактивной, причем термин «активная» (или «гиротропная») среда указывает на то, что и при отсутствии поглощения тензор $\epsilon_{ij} = \epsilon_{ji}^*$ не является вещественным. При отсутствии магнитного поля и пренебрежении пространственной дисперсией все среды неактивны. Однако для кристаллов без центра симметрии или для растворов молекул, не обладающих центром симметрии (например, растворов сахара), учет пространственной дисперсии приводит к появлению членов первого порядка относительно a/λ , влияние которых обычно можно учесть, вводя комплексный тензор ϵ_{ij} [2, 34, 35]. Соответствующие среды называют естественноактивными или просто гиротропными. В естественноактивной, но магнитоактивной среде тензор ϵ_{ij} является комплексным только при наличии внешнего магнитного поля. Итак, находящаяся в магнитном поле плазма является магнитоактивной средой, причем ее активность может быть сильно выражена даже в магнитных полях, которые обычно считаются весьма слабыми.

В негиротропной (неактивной) анизотропной среде тензор ϵ_{ij} симметричен и при отсутствии поглощения веществен. Поэтому существуют три

главных направления, в которых вектор \mathbf{D} параллелен вектору \mathbf{E} . В магнитоактивной среде это не так; в направлении магнитного поля $D_z = \epsilon_2 E_z$, но

$$D_x \pm iD_y = (\epsilon_1 \mp i\chi)(E_x \pm iE_y).$$

Поскольку величина $\epsilon_{\pm} = (\epsilon_1 \mp i\chi)$ вещественна, отсюда следует, что в плоскости xy вектор \mathbf{D} пропорционален \mathbf{E} для постоянного по величине поля \mathbf{E} , вращающегося по или против часовой стрелки. Для такого поля

$$\begin{aligned} E_x &= E_0 e^{i\omega t}, & E_y &= \mp E_0 e^{i\omega t}, \\ \text{Re} E_x &= E_0 \cos \omega t, & \text{Re} E_y &= \pm E_0 \sin \omega t. \end{aligned} \quad (3)$$

Такая связь между \mathbf{D} и \mathbf{E} и является характерным физическим отличием гиротропной среды от негиротропной. Тензор $\epsilon_{ij}(\omega, \mathbf{k}, \mathbf{H})$ и другие аналогичные тензоры обладают рядом свойств общего характера. Например,

$$\epsilon_{ij}(\omega, \mathbf{k}, \mathbf{H}) = \epsilon_{ji}(\omega, -\mathbf{k}, -\mathbf{H}). \quad (4)$$

В условиях, когда вид тензора ϵ_{ij} неизвестен, использование его общих свойств может представить существенный интерес. Однако в плазме, особенно при отсутствии пространственной дисперсии, вид тензора $\epsilon_{ij}(\omega, \mathbf{k}, \mathbf{H})$ обычно известен и различные свойства симметрии или дисперсионные соотношения выполняются автоматически.

Важно отметить, что для любой анизотропной среды характерно наличие *двух нормальных волн, т.е. волн с определенной скоростью, поглощением и поляризацией*. В случае магнито- и/или оптически активной среды нормальные волны, вообще говоря, *поляризованы эллиптически*. В частном случае продольного распространения поляризация является круговой. В изотропной среде имеет место вырождение, заключающееся в том, что поперечные волны любой поляризации имеют одинаковые скорость и поглощение.

3. ИЗЛУЧЕНИЕ БЫСТРЫХ ДИПОЛЕЙ ПРИ НАЛИЧИИ ГРАНИЦ РАЗДЕЛА

Далее с помощью обобщенной теоремы взаимности для сред, характеризуемых эрмитовым тензором диэлектрической проницаемости (2), (4), рассмотрим переходное или черенковское излучение – поля, возбуждаемые сторонним током (равномерно движущимся сгустком заряженных частиц) при пересечении им или перемещении вдоль границы раздела сред, одна из которых оптически активная гиротропная (хиральная) среда или металл (плазма) и феррит, помещенные в магнитное поле (рис. 5) [33, 34].

Как известно, излучение В.-Ч. сгустками зарядов, обладающими собственным электрическим и/или магнитным моментом, имеет ряд особенностей [32]. Так, например, при движении диполя в узком канале или щели в диэлектрике (рис. 4) энергия излучения существенно отличается от соответствующей величины в неограниченном пространстве, если момент диполя ориентирован перпендикулярно границе раздела. Если диполь движется равномерно в узкой щели, то излучаемая им энергия возрастет в ϵ^2 (ϵ – диэлектрическая проницаемость среды) раз, а при движении в цилиндрическом канале – в $4\epsilon^2 / (1 + \epsilon)^2$ раз по сравнению со сплошной средой [32]. В случае, когда диэлектрик обладает тензорными свойствами, естественно ожидать, что имеют место аналогичные эффекты [33].

Интересующие нас особенности в излучении сгустков заряженных частиц, обладающих дипольным электрическим и/или магнитным моментом, возникают в случае, когда диполь ориентирован под углом к границе полости (оси канала, поверхности плоской полости или плоской границе раздела двух сред). Поэтому в дальнейшем речь пойдет о сгустках заряженных частиц, обладающих только дипольными электрическим и/или магнитными моментами, называемых просто диполями. Мы уже отмечали, что излучение имеет место и при равномерном движении мультиполей более высокого порядка, но их вклад в общие потери энергии на излучение сгустков будем считать пренебрежимо малыми [35].

Положим для определенности, что одна из граничащих сред характеризуется тензором диэлектрических проницаемостей $\hat{\epsilon}$, который описывает, например, электродинамические свойства холодной плазмы или оптически активную (гиротропную, хиральную) среду, а другая – однородный диэлектрик с диэлектрической постоянной ϵ_0 . При этом магнитные проницаемости обеих сред $\mu_1 = \mu_2 = 1$ (рис. 6б).

Рассмотрим далее несколько частных случаев.

Получим сначала теорему взаимности в нужной нам форме. Рассмотрим среды 1 и 2, оптические свойства которых характеризуются эрмитовыми тензорами $\hat{\epsilon}$ и $\hat{\mu}$, а ЭМП возбуждается системой сторонних токов \mathbf{j}_e и \mathbf{j}_m . ЭМП, возбуждаемые этими токами, удовлетворяют следующим уравнениям Максвелла:

$$\begin{aligned} \text{rot } \mathbf{E}_1 &= i \frac{\omega}{c} \hat{\mu} \mathbf{H}_1 - \frac{4\pi}{A} \mathbf{j}_m; & \text{rot } \mathbf{E}_2^* &= -i \frac{\omega}{c} \hat{\mu}^* \mathbf{H}_2^* - \frac{4\pi}{A} \mathbf{j}_m^*; \\ \text{rot } \mathbf{H}_1 &= -i \frac{\omega}{c} \hat{\epsilon} \mathbf{E}_1 + \frac{4\pi}{A} \mathbf{j}_e; & \text{rot } \mathbf{H}_2^* &= i \frac{\omega}{c} \hat{\epsilon}^* \mathbf{E}_2^* + \frac{4\pi}{A} \mathbf{j}_e^*. \end{aligned} \quad (5)$$

Учитывая эрмитовость тензоров $\hat{\epsilon}$ и $\hat{\mu}$, можно показать, что имеет место соотношение

$$\begin{aligned} \text{div} \left\{ \left[\mathbf{E}_1 \mathbf{H}_2^* \right] + \left[\mathbf{E}_2^* \mathbf{H}_1 \right] \right\} &= \\ &= -\frac{4\pi}{A} \left\{ \mathbf{j}_m \mathbf{H}_2^* + \mathbf{j}_m^* \mathbf{H}_1 + \mathbf{j}_e \mathbf{E}_2^* + \mathbf{j}_e^* \mathbf{E}_1 \right\}. \end{aligned} \quad (6)$$

Интегрируя это соотношение по всему пространству и полагая, что на бесконечности поле убывает достаточно быстро, получим

$$\int \left\{ \mathbf{j}_e \mathbf{E}_2^* + \mathbf{j}_e^* \mathbf{E}_1 + \mathbf{j}_m \mathbf{H}_2^* + \mathbf{j}_m^* \mathbf{H}_1 \right\} dV = 0. \quad (7)$$

Полученное уравнение является математической записью теоремы взаимности для магнитоактивных и гиротропных (хиральных) сред.

Для вычисления поля, движущегося в узкой полости сгустка заряженных частиц, обладающего дипольным моментом \mathbf{p} или магнитным моментом \mathbf{m} , будем следовать далее работе [33].

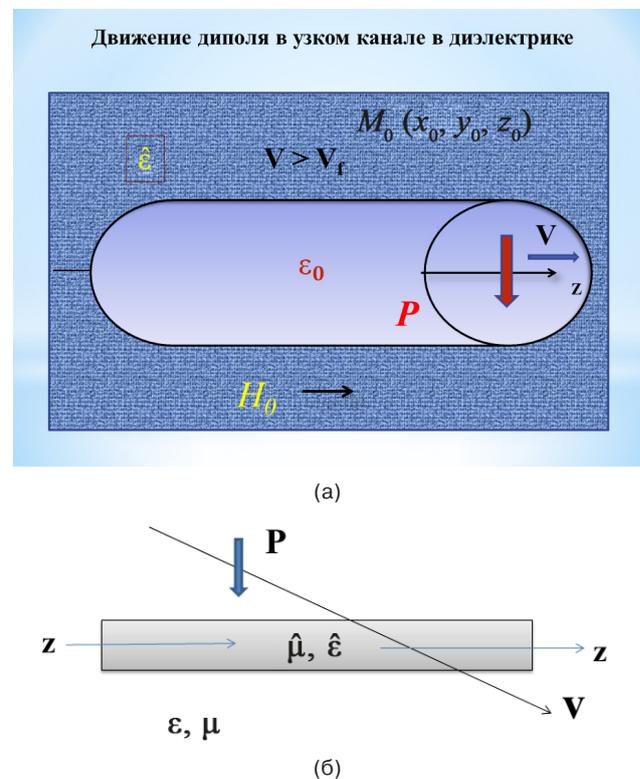


Рис. 5. Прохождение точечного сгустка \mathbf{p} через цилиндрический канал (а) и щель (пластинку) (б)

Пусть вдоль оси z с постоянной скоростью точечный сгусток заряженных частиц, обладающий дипольным моментом \mathbf{p} . Поле этого диполя вне полости обозначим через \mathbf{E} . Поместим \mathbf{p}_1 далее вне полости в точке $M_0(x_0, y_0, z_0)$. Точечный гармонический осциллятор $\mathbf{p}_1 e^{-i\omega t}$ и его поле внутри полости обозначим через \mathbf{E}_1 . Подставляя поле \mathbf{E} диполя \mathbf{p} , движущегося в канале с постоянной скоростью \mathbf{v} , и поле \mathbf{E}_1 , создаваемое в канале точечным гармоническим осциллятором $\mathbf{p}_1 e^{-i\omega t}$, помещенным в точку $M_0(x_0, y_0, z_0)$, получим:

$$\int \mathbf{p} \mathbf{E}_{1\omega}^* \exp\left(i \frac{\omega}{v} \mathbf{s} \mathbf{r}\right) ds = \mathbf{p}_1^* \mathbf{E}_\omega(M_0), \quad (8)$$

где для полей используется Фурье-представление и соотношение $\mathbf{j}_{e\omega} = i\omega \mathbf{p}_\omega$, а \mathbf{s} – орт, задающий прямолинейную траекторию движения источника.

В случае движущихся магнитных диполей \mathbf{m} и $\mathbf{m}_1 e^{-i\omega t}$ Фурье-компонента тока определяются соотношением $\mathbf{j}_{m\omega} = i\omega \mathbf{m}_\omega$ и для векторов магнитных напряженностей полей получим:

$$\int \mathbf{m} \mathbf{H}_{1\omega}^* \exp\left(i \frac{\omega}{v} \mathbf{s} \mathbf{r}\right) ds = \mathbf{m}_1^* \mathbf{H}_\omega(M_0), \quad (9)$$

В выражениях (8) и (9) интегралы в левых частях берутся вдоль траекторий движения диполей. В пределах каждой из сред 1 и 2 диэлектрическая и магнитная проницаемости являются постоянными величинами (рис. 2) и не зависят от z . Однако на границе раздела сред они испытывают скачок. Для использования граничных условий необходимо знать тангенциальные к границе раздела компоненты электрического поля в каждой из сред и сшить решения, используя граничные условия – равенство на границе нормальных компонент индукции \mathbf{D}_1 , \mathbf{D}_2 и тангенциальных компонент электрического поля \mathbf{E}_1 , \mathbf{E}_2 . При этом необходимо учитывать проникновение поля в вакуум ($\epsilon_0 = 1$) при решении любых граничных задач.

Если движущийся диполь ориентирован параллельно границе раздела сред, то в интегралы (8) и (9) входят только тангенциальные к поверхности раздела составляющие векторов \mathbf{E}_1 и \mathbf{H}_1 . Но в силу граничных условий эти составляющие имеют одинаковые значения по обе стороны границы раздела. Следовательно, наличие границ раздела не влияет на характер излучения такого диполя, а особенности возникают только при отличной от нуля составляющей дипольного момента, перпендикулярной границе раздела сред.

Рассмотрим далее несколько частных случаев.

1. В неограниченном диэлектрике с диэлектрической постоянной ϵ_0 прорезана плоско-параллельная полость (рис. 6б). Ориентация плоскостей полости задается вектором \mathbf{n} . Полость заполнена гиротропной (хиральной) средой с тензором диэлектрических проницаемостей $\hat{\epsilon}$ (2), (3) так, что диэлектрическая проницаемость вдоль оси Oz $\epsilon_{zz} = \epsilon_2$. Движущийся диполь ориентирован вдоль вектора \mathbf{n} . Тогда в выражении (9) под интегралом входит компонента поля E_{1n} , перпендикулярная к поверхности раздела. Так как полость считается тонкой $\frac{\lambda}{d} \gg 1$ (λ – длина волны, d – ширина полости), то выражение для E_{1n} можно найти из соответствующей электростатической

задачи [2, 32–34]. Проведя это решение, получим, что в тонкой полости величина нормальной составляющей поля отличается в

$$\frac{\epsilon_0}{(\mathbf{n}\hat{\epsilon}\mathbf{n})} = \frac{\epsilon_0}{\epsilon_1 \sin^2 \alpha + \epsilon_2 \cos^2 \alpha} \quad (10)$$

раз от поля во внешней среде, где α – угол между вектором \mathbf{n} и Oz .

Такое возрастание нормальной составляющей поля движущегося диполя означает, что излучаемая им энергия возрастает в $\left[\frac{\epsilon_0}{(\mathbf{n}\hat{\epsilon}\mathbf{n})}\right]^2$ раз.

Отметим, что в (10) не входит недиагональная компонента тензора $\hat{\epsilon}$.

2. Рассмотрим далее случай, когда электрический диполь движется в тонком слое диэлектрика с ϵ_0 . Слой помещен в гиротропную среду с $\hat{\epsilon}$. В этом

случае излучение диполя возрастает в $\left[\frac{(\mathbf{n}\hat{\epsilon}\mathbf{n})}{\epsilon_0}\right]^2$ раз

по сравнению с излучением диполя, движущегося в сплошной среде. Полученные результаты легко обобщить в силу симметрии уравнений Максвелла (5) на случай магнитного диполя, движущегося в плоской тонкой полости, когда одна из сред внутри или вне полости, характеризуется тензором магнитной проницаемости $\hat{\mu}$, а другая – μ_0 и диэлектрические проницаемости обеих сред одинаковы $\epsilon = \epsilon_0$. Интересующий нас результат получается путем замен $\hat{\epsilon} \leftrightarrow \hat{\mu}$ и $\epsilon_0 \leftrightarrow \mu_0$.

3. В диэлектрике с $\epsilon = \epsilon_0$ прорезан тонкий канал с осью Oz , радиус которого много меньше длины волны излучения λ . Канал заполнен гиротропной (оптически активной) средой $\hat{\epsilon}$ (рис. 5а). Вдоль оси канала равномерно движется диполь, электрический момент которого ориентирован перпендикулярно его скорости \mathbf{v} . Поскольку радиус канала предполагается малым, то решение соответствующей электростатической граничной задачи с учетом теоремы взаимности (9) показывает, что нормальная составляющая электрического поля E_r (r – радиус канала) внутри канала в

$$\gamma_1 = \frac{2\epsilon_0 \left[(\epsilon_0 + \epsilon_1)^2 + \chi^2 \right]^{1/2}}{(\epsilon_0 + \epsilon_1)^2 - \chi^2}. \quad (11)$$

раз больше соответствующей величины поля вне канала. Следовательно, энергия, излучаемая источником, движущимся в канале, в γ_1^2 раз больше, чем энергия, излучаемая таким же источником в сплошной среде.

В случае, когда канал заполнен однородным диэлектриком ϵ_0 , а окружение канала – неограниченная гиротропная среда с $\hat{\epsilon}$, имеет место следующее соотношение между напряженностью поля внутри и вне канала:

$$\gamma_2 = \frac{2\epsilon_1 \left[(\epsilon_0 + \epsilon_1)^2 + \chi^2 \right]^{1/2}}{(\epsilon_0 + \epsilon_1)^2 - \chi^2}, \quad (12)$$

а, следовательно, потери энергии такого диполя на излучение в γ_2^2 раз отличаются от потерь при движении в сплошной гиротропной среде. Как и ранее, эти результаты можно обобщить на случай магнитного диполя, движущегося вдоль оси канала в феррите или в ферритовом стержне в магнитном поле.

4. ГЕНЕРАЦИЯ ГЕЛИКОННОЙ ВОЛНЫ БЫСТРЫМ ДИПОЛЕМ

Геликонная волна и ее основные свойства. Переходное излучение на границе с гиротропной средой

Константинов и Перель [9] показали, что в чистых щелочных металлах, помещенных в сильное магнитное поле, перпендикулярное их поверхности, при гелиевой температуре могут распространяться поперечные электромагнитные волны с круговой поляризацией. Эти волны получили название *геликонов*. Кратко говоря, геликон представляет собой электромагнитную волну, которая может распространяться в хорошо проводящей среде в присутствии сильного магнитного поля.

В 1961 г. Бауэрс и Леджэнди Роуз [10] экспериментально обнаружили геликоны в натрии. Рассмотрим поведение свободных электронов в магнитном поле, чтобы выяснить условия, необходимые для распространения геликонной волны, и определить ее основные свойства. В отсутствие магнитного поля тензор диэлектрической проницаемости щелочных металлов диагонален

$$\hat{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_2 \end{pmatrix}, \quad \epsilon_1 = \epsilon_2 = 1 - \omega_p^2 / \omega(\omega + i/\tau), \quad (13)$$

где $\omega_p^2 = 4\pi n_0 e^2 / m^*$ – квадрат плазменной частоты; n_0, m^* – плотность и эффективная масса электронов; τ – среднее время между столкновениями электронов с фононами, дефектами решетки, примесями и между собой.

Если металл помещен в постоянное магнитное поле \mathbf{H}_0 , то появляется новая важная характеристика движения электрона – *циклотронная (ларморовская) частота*

$$\omega_c = e\mathbf{H}_0/m^*c. \quad (14)$$

Как показано на рис. 6, мы берем \mathbf{B}_0 параллельным оси z , а металл, характеризуемый свободными носителями заряда e и массой m^* , которые релаксируют к равновесию с решеткой за среднее время τ , заполняет полупространство $z > 0$. Предположим, что поперечная электромагнитная волна, зависимость поля которой от времени имеет вид $\exp(-i\omega t)$, падает на поверхность металла. При этом в металле возбуждается электромагнитная волна той же самой частоты, имеющая волновой вектор \mathbf{q} , т.е. в металле

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp[i(\mathbf{q}\mathbf{z} - \omega t)]. \quad (15)$$

Задача состоит в определении характера \mathbf{q} . Предположим теперь, что носители находятся в мгновенном локальном равновесии, т.е. $\omega\tau < 1$. Это имеет место при достаточно низких частотах и оказывается достаточно хорошим приближением. Считая магнитное поле волны малым по сравнению с \mathbf{B}_0 , мы можем записать уравнение движения свободных электронов в металле в виде:

$$e\mathbf{E} + [e\mathbf{v}\mathbf{B}_0] - m^* \mathbf{v}/\tau = 0. \quad (16)$$

Если сила Лоренца (второе слагаемое в уравнении) оказывает на носители преобладающее воздействие, то в хорошо проводящей среде может распространяться низкочастотная электромагнитная волна. Такая распространяющаяся волна имеет место при условии, что $|\text{Re } q| > |\text{Im } q|$, т.е. q^2 должно быть положительным и в основном вещественным. Продольные волны – плазмоны существуют, если

$$1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i/\tau)} = 0. \quad (17)$$

Из этого уравнения, при условии $\omega\tau \gg 1$ следует, что в длинноволновом приближении плазмоны не обладают дисперсией: $\omega = \omega_p$.

Две поперечные волны удовлетворяют дисперсионному уравнению

$$q^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i/\tau)} \right). \quad (18)$$

Из этого уравнения следует, что при $\omega_c\tau \gg 1$ и $\omega < \omega_p$ волновой вектор поперечной волны является

чисто мнимым, поэтому такие волны полностью отражаются металлом.

При условии $\omega_c \tau \gg 1$ электроны совершают много витков спирали вокруг магнитного поля до столкновения. Такое упорядоченное движение изменяет отклик металла на низкочастотное ($\omega \ll \omega_c$) электромагнитное возмущение. Это возможно для «левой» поляризации (+), если константа Холла положительна, и для «правой» поляризации (–), если константа Холла много меньше нуля. Когда падающая волна линейно поляризована, то возбуждаются обе волны. В рассматриваемом нами случае свободных электронов одна из волн (–) распространяется, а другая (+) – сильно поглощается. Поэтому в полубесконечном металле геликон представляет собой поперечную, циркулярно поляризованную электромагнитную волну. Электрическое и магнитное поля вращаются вокруг постоянного магнитного поля (направления распространения) в том же направлении, что и электроны.

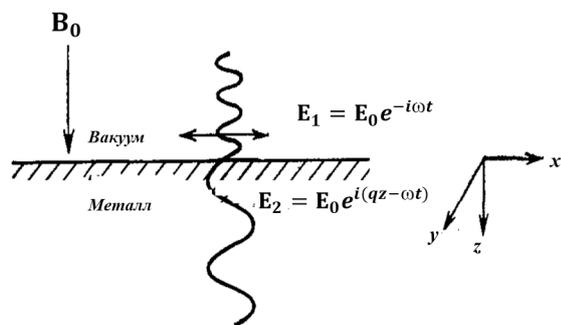


Рис. 6. Схематическое изображение поперечной линейно поляризованной волны, падающей нормально на границу металла с вакуумом. Возбуждаемая в металле волна имеет ту же частоту, что и падающая волна, но ее длина зависит от электромагнитных свойств металла

Рассмотрим далее особенности в излучении равномерно движущегося диполя на примере генерации геликонов (геликонной волны) при скорости движения диполя $v > v_f$ в среде, характеризуемой тензором диэлектрических проницаемостей $\hat{\epsilon}$. Для этого воспользуемся далее результатами, полученными в предыдущем разделе в случае с движением диполя в цилиндрическом канале.

Если ось канала Oz направлена вдоль магнитного поля, то компонента диэлектрической проницаемости

$$\epsilon_{zz}(\omega) = 1 - \omega_p^2 / \omega(\omega + i/\tau) = \epsilon_2 \quad (19)$$

не зависит от этого поля. Диэлектрическая проницаемость относительно циркулярно поляризованной волны с волновым вектором, направленным вдоль магнитного поля, в длинноволновом приближении ($\mathbf{q} \approx 0$) в области малых частот ($\omega \ll \omega_p$) в отсутствии соударений ($\tau \rightarrow \infty$) принимает вид

$$\chi(\omega) = \omega_p^2 \omega_c / \omega(\omega^2 - \omega_c^2). \quad (20)$$

При условии $\omega \ll \omega_c$ диэлектрическая проницаемость $\chi > 0$ и определяет электромагнитные волны, распространяющиеся в кристалле. Поведение этого поля в кристалле определяется сингулярностями диэлектрической проницаемости $\chi(\omega)$. В длинноволновом приближении диэлектрическая проницаемость $\chi(\omega, \mathbf{q})$ не зависит от \mathbf{q} , и уравнение $q^2 = \omega^2 \chi(\omega, q) / c^2$ определяет единственное значение комплексного волнового вектора возбуждаемой в кристалле циркулярной волны – геликона. Фазовая скорость геликона $v_f = c \sqrt{\omega \omega_c} / \omega_p$.

При движении диполя \mathbf{p} вдоль оси Oz диэлектрического канала с ϵ_0 , прорезанного в магнитоактивной среде, в постоянном магнитном поле, параллельном оси канала, нормальная составляющая электрического поля вне канала больше составляющей напряженности поля внутри его в $E/E_1 = \gamma_2$ (11) раз, а потери энергии такого диполя на излучение возрастают в γ_2^2 . Данные соотношения (11), (12) справедливы при условии, что радиус канала a много меньше длины волны излучения. Знаменатель в формулах (11), (12) может, вообще говоря, обращаться в нуль на частотах

$$\omega_{1,2} = \frac{1}{2} \left\{ \left(\omega_c^2 + 2\omega_p^2 \right)^{1/2} \pm \omega_c \right\}. \quad (21)$$

В этом случае в разложении функции $(\epsilon_0 + \epsilon_1)^2 - \chi^2$ по параметру $(a\omega/c) \ll 1$ необходимо учитывать члены более высокого порядка малости. Следовательно, полученные формулы имеют смысл для всех частот, на которых выполняются условия для излучения В.–Ч. за исключением узких областей:

$$\omega_{1,2} = \omega_{1,2} \pm \Delta\omega_{1,2}.$$

Наличие особенностей вблизи частот $\omega_{1,2}$ указывает на возрастание мощности излучения при движении вблизи границ раздела сред, обусловленное интерференцией падающего и отраженного (и/или индуцированного «границами») полей излучения.

5. ИЗЛУЧЕНИЕ СВЕРХБЫСТРЫХ СГУСТКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ КАК ВОЗМОЖНАЯ ПРИЧИНА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДИССИМЕТРИИ ЖИВЫХ СИСТЕМ

Выше мы отметили, что все наиболее важные вещества, из которых построены живые организмы, и несущие основные жизненные функции, во всей биосфере встречаются в организмах

преимущественно в одной из двух хиральных форм. Хиральность первичных молекул – аминокислот, сахаров, нуклеозидов – с определенным знаком влечет за собой хиральность биополимеров с тем или иным, но определенным знаком. В свою очередь, диссимметрия биополимеров, видимо, влечет за собой и диссимметрию живых систем; механизм связей на современном уровне не прослеживается, но возможность их существования, хотя бы в принципе, поддается пониманию. Однако пока остается без ответа важнейший вопрос, относящийся к «первичным» структурам. В настоящее время достаточно убедительно показано, что такие основные вещества, как, например, аминокислоты, могли синтезироваться в природных условиях из простейших молекул – HCNO , HCN , NH_4 , CHO_2 и т.п. [25–31]. Видимо, из тех же молекул могут синтезироваться и основания РНК и ДНК, например, аденин и гуанин. При этом все названные простейшие молекулы ахиральны, и поэтому в обычных условиях равновероятно образование обоих антиподов; весьма вероятна рацемизация хирально чистого вещества, даже если оно и оказалось в избытке. Поэтому для возникновения чистоты на одном из начальных (предбиологических) этапов эволюции потребовалось участие какого-то дерацемизирующего (диссимметризирующего) агента. Вопрос, о том, каким был этот «агент», остается нерешенным. Очевидно, этот вопрос о природе этого «диссимметризирующего агента» (фактора преимущества – ФП [37]), сыгравшего определяющую роль при образовании первых биологически важных хиральных молекул, создав достаточно большой исходный перевес хиральных молекул одного знака – один из важнейших в проблеме физических механизмов происхождения жизни. В настоящее время в литературе можно найти самые разнообразные предположения о природе ФП, обусловившего нарушение зеркальной симметрии в ходе биопоза (см., например, ссылки в [36–38]). Однако, все изложенные соображения, основанные на квантовой механике, термодинамике, теории электромагнитных взаимодействий и др., по существу своему предполагают равноправие знаков и не объясняют достаточно обоснованно механизм нарушения хиральной симметрии.

Одна из групп предположений связывает диссимметрию с возможностями контактов с гиротропными минералами. Так, например, естественный кварц довольно распространен в виде оптически чистых энантиоморфных кристаллов; с другой стороны, известно, что химические реакции, проводимые в присутствии кварца, как катализатора, ведут к образованию преимущественно одного антипода. Для ряда минералов отмечалась возможность их каталитического влияния при зарождении жизни. Не отрицая такую возможность, укажем здесь на ту же

трудность – даже в пределах одного месторождения количество правых и левых кристаллов статистически одинаково.

Высказывалось и предположение о возможной роли контактов с естественными магнитными породами (например, ферритмагнитный магнетит). Однако одного магнитного поля недостаточно: как показал еще П. Кюри, для получения гиротропии необходимы два асимметрично расположенных поля. Неясна и возможность получения одного знака хиральности.

Весьма важным фактором может быть циркулярная поляризация солнечного света, достигающего поверхности Земли. Поскольку хиральные молекулы обладают циркулярным дихроизмом, такой свет, будучи поглощен этими молекулами, может вызывать фотохимический асимметрический синтез или асимметрическую деструкцию, даже в рацемате. Наиболее активно фотохимически коротковолновое излучение с $\lambda < 3000 \text{ \AA}$; доля его в солнечном свете, достигающем поверхности Земли, порядка 1.5%, т.е. не мала, а в первичной бескислородной атмосфере была значительно больше. В литературе имеются сообщения, что свет, рассеиваемый атмосферами всех планет, частично циркулярно поляризован. В литературе высказывались и утверждения об избытке в дневном свете на поверхности Земли право циркулярно поляризованной компоненты. Но немногочисленные экспериментальные сведения из геофизики это надежно не подтверждают – доля эллиптической поляризации в дневном свете оказалась весьма малой, причем избыток определенного знака не установлен. Круговая поляризация может возникать при отражении света от поглощающих поверхностей (рудные тела, ионосфера), в особенности при наклонном падении, при полном внутреннем отражении в морской воде, в бухтах и т.п. Однако экспериментальных наблюдений такого рода мало, и наличие одного определенного знака поляризации в различных условиях весьма сомнительно. Оставляя в стороне подробности перечисленных гипотез, подчеркнем, что выбор знака хиральности биосферных элементов в данных версиях должен был произойти на ранних стадиях химической эволюции.

Поиск «дерацемизирующего агента» – ФП – продолжается, и в данной работе излагается гипотеза, основанная на полученных автором результатах рассмотрения возможной роли излучения сверхбыстрых точечных сгустков заряженных частиц космического происхождения, равномерно движущихся в хиральной среде, при наличии границ раздела.

Излучение сверхбыстрых сгустков заряженных частиц в многочисленных и долговременных потоках космического излучения и космических струях могли стать причиной возникновения асимметрии

живых систем [39]. При этом, определяющим фактором может быть суперхиральность черенковского и/или переходного излучения, возникающего при взаимодействии сгустков зарядов, достигающих поверхности Земли, с биопластами из хиральных молекул и/или гиротропными минералами. Следует отметить, что при определенных условиях черенковское излучение может быть и «хирально чистым» ($|\alpha| = 1$), например, когда условие В.–Ч. излучения выполняется только для одного из типов поляризации: E_L или E_D , где E_L и E_D – значения векторов напряженности электрического лево- и правополяризованных составляющих хирального ЭМП излучения. Асимметричные циркулярно поляризованные поля, действуя на хиральные молекулы, в которых электрические и магнитные моменты расположены неодинаково, могли бы в некоторых случаях создать асимметрию при синтезе. Поскольку хиральные молекулы обладают циркулярным дихроизмом, такой свет, будучи поглощен этими молекулами, может вызывать фотохимический асимметрический синтез или асимметрическую деструкцию, даже в рацемате. Эффект такого взаимодействия суперхиральных полей излучения может усиливаться в случае контактов хиральных молекул с гиротропными минералами.

Подчеркнем, что согласно этой гипотезе, последовательность всей совокупности событий, приведших к появлению хиральной чистоты, а затем и жизни на Земле, *носит характер спонтанной дерацемизации* и с равным успехом может привести к такой биосфере, которая использует *D*-аминокислоты и *L*-сахара. Причину дерацемизации органической первобытной среды, с этой точки зрения, нет необходимости увязывать с какими-либо априорными различиями в эволюционной динамике левых и правых зеркально-изомерных молекул. В основе нарушения симметрии лежит неустойчивость рацемического состояния, благодаря которой любые, сколь угодно малые, флуктуационные отклонения соотношения концентрации изомеров от рацемата, автокаталитически усиливаясь, способны привести к практически полному преобладанию одной из изомерных форм в конечном состоянии эволюционного процесса на стадии предбиологической эволюции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хиральность повсеместно распространена в природе, при этом, распределения энантиомеров различного знака отдельных видов хиральных структур удивительно асимметричны на фундаментальных уровнях. Примеры варьируются от нарушения четности в слабых взаимодействиях до гомохиральности в биомолекулах. Способность «хиральных систем» к хирально-селективному синтезу (хиральной

индукции) имеет большое значение в стереохимии, молекулярной биологии и фармакологии. В физике конденсированного состояния кристаллическая электронная система геометрически хиральна, когда в ней отсутствуют зеркальные плоскости, центры пространственной инверсии или оси вращательной инверсии.

Структурный порядок биополимеров, таких как белки, определяет физические и химические взаимодействия биологических систем с окружающей средой и, следовательно, является критическим параметром в ряде биологических проблем. Зондирование структурного порядка в хиральных материалах, например, биопластах, является сложной задачей, учитывая необходимую высокую чувствительность метода, особенно при наличии малых количеств материала, что делает обычные инструменты биоструктурного зондирования неэффективными.

В настоящее время активно разрабатываются различные методы усиления хирального ответа молекул, основанные на использовании циркулярно-поляризованного света в различных конфигурациях, в частности, суперхиральных полей.

В данной работе мы представляем новую концепцию для зондирования ориентационного порядка внутри хиральных сред. Показано, что черенковское и/или переходное излучение некоторых типов сверхбыстрых сгустков заряженных частиц, могут индуцировать усиленный локальный хиральный отклик, даже больший, чем отклик, который может быть получен при использовании интенсивного циркулярно-поляризованного света. В качестве модельного исследования рассмотрены переходное и черенковское излучения, возбуждаемые сторонним током (равномерно движущимся сгустком заряженных частиц) при пересечении им или перемещении вдоль границы раздела двух сред, одна из которых оптически активная гиротропная (хиральная) среда или металл (плазма) и феррит, помещенные в магнитное поле. Такие излучения – переходное и/или черенковское, обладают характеристиками суперхиральных полей и, следовательно, могут быть эффективно использованы для исследования хиральной структуры (например, для обнаружения кругового дихроизма, частотных характеристик показателей преломления) различных материалов и, в том числе, различных биоматериалов. Кроме того, сверхбыстрые (релятивистские) частицы могут служить не только «инструментом» для изучения структуры различных материалов, но и являются «генераторами» квазичастиц, определяющих «динамические» свойства исследуемых материалов, особенности их взаимодействия с излучениями различной природы и отклика на внешние воздействия. В качестве примера в статье рассмотрена генерация геликонной волны быстрым диполем.

Рассмотренные в статье механизмы взаимодействия электромагнитного излучения сверхбыстрых точечных равномерно движущихся диполей с хиральными материалами (структурами, средами) – один из возможных физических подходов к проблеме возникновения хиральной чистоты биосферы – выяснению фактора дерацемизации органической первобытной среды. В данной работе автор стремился продемонстрировать, что такие подходы позволяют не только формулировать новые гипотезы о механизмах нарушения зеркальной симметрии, но и качественно, и количественно их анализировать. В результате сформулирована гипотеза, согласно которой сверхбыстрые сгустки заряженных частиц в долговременных потоках космического излучения и космических струях могли стать причиной

возникновения хиральной асимметрии живых систем. При этом, определяющим фактором преимущества явилась суперхиральность черенковского и/или переходного излучения, возникающего при взаимодействии сгустков зарядов, достигающих поверхности Земли, с биопластами из хиральных молекул и/или гиротропными минералами. Предлагаемая гипотеза может быть проверена экспериментально, путем облучения мишеней из соединений с различной хиральностью и энантиомерным составом, потоками заряженных частиц, ускоренных до необходимых энергий и скоростей.

Благодарности

Автор выражает признательность профессору Всеволоду Александровичу Твердислову за конструктивное обсуждение результатов работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будкер Г.И. Ускорители со встречными пучками частиц. *УФН*. 1966;89(4):533–547. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0089.196608a.0533>
2. Гинзбург В.Л. *Теоретическая физика и астрофизика*. М.: Наука; 1975. 414 с.
3. Пайнс Д. *Элементарные возбуждения в твердых телах*. М.: Мир; 1965. 382 с.
4. García de Abajo F.J. Optical excitations in electron microscopy. *Rev. Mod. Phys.* 2010;82(1):209–275. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.82.209>
5. Ritchie R.H. Plasma losses by fast electrons in thin films. *Phys. Rev.* 1957;106(5):874–881. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.106.874>
6. García de Abajo F.J. Multiple excitation of confined graphene plasmons by single freeelectrons. *ACS Nano*. 2013;7(12):11409–11419. <https://doi.org/10.1021/nn405367e>
7. Агранович В.М. *Теория экситонов*. М.: Наука; 1968. 382 с.
8. Aigrain P. Les «Helicons» dans les semiconducteurs. In: *Proc. Int. Conf. on Semiconduction Phys.* Prague; 1960, p. 224.
9. Константинов О.В., Перель В.И. О возможности прохождения электромагнитных волн через металлы в сильном магнитном поле. *ЖЭТФ*. 1960;38(1):161–164.
10. Bowers R., Legendy C., Rose F. Oscillatory galvanomagnetic effect in metallic Sodium. *Phys. Rev. Letts.* 1961;7(9):339–341. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.7.339>
11. Liu Y., Willis R.F., Emtsev K.V., Seyller T. Plasmon dispersion and damping in electrically isolated two-dimensional charge sheets. *Phys. Rev. B*. 2008;78(20):201403. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.78.201403>
12. Maxfield B.W. Helicon waves in solids. *Amer. J. Phys.* 1969;37(3):241–269. <https://doi.org/10.1119/1.1975500>
13. Stenzel R.L., Urrutia J.M. Helicons in unbounded plasmas. *Phys. Rev. Lett.* 2015;114(20):205005. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.205005>
14. Kung H.-H., Goyal A.P., Maslov D.L., Wang X., Lee A., Kemper A., Cheong S.-W., Blumberg G.E. Observation of chiral surface excitons in a topological insulator Bi₂Se₃. In: *PNAS*. 2019;116(10):4006–4011. <https://doi.org/10.1073/pnas.1813514116>

REFERENCES

1. Budker G.I. Accelerators with colliding particle beams. *Sov. Phys. Usp.* 1967;9:534–542. <https://doi.org/10.1070/%2FPU1967v009n04ABEH003010> [Budker G.I. Uskoriteli so vstrechnymi puchkami chastits. *UFN*. 1966;89(4):533–547 (in Russ.).]
2. Ginzburg V.L. *Teoreticheskaya fizika i astrofizika (Theoretical physics and astrophysics)*. Moscow: Nauka; 1975. 441 p. (in Russ.).
3. Pines D. *Elementary excitations in solids*. University of Illinois; 1961. 320 p. [Pains D. *Elementarnye vozvuzhdeniya v tverdykh telakh*. Moscow: Mir; 1965. 382 p. (in Russ.).]
4. García de Abajo F.J. Optical excitations in electron microscopy. *Rev. Mod. Phys.* 2010;82(1):209–275. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.82.209>
5. Ritchie R.H. Plasma losses by fast electrons in thin films. *Phys. Rev.* 1957;106(5):874–881. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.106.874>
6. García de Abajo F.J. Multiple excitation of confined graphene plasmons by single freeelectrons. *ACS Nano*. 2013;7(12):11409–11419. <https://doi.org/10.1021/nn405367e>
7. Agranovich V.M. *Teoriya eksitonov (Theory of excitons)*. Moscow: Nauka; 1968. 382 p. (in Russ.).
8. Aigrain P. Les «Helicons» dans les semiconducteurs. In: *Proc. Int. Conf. on Semiconduction Phys.* Prague; 1960, p. 224.
9. Konstantinov O.V., Perel' V.I. Possible transmission of electromagnetic waves through a metal in a strong Magnetic Field. *JETP*. 1960;11(1):117–119. [Konstantinov O.V., Perel' V.I. O vozmozhnosti prokhozheniya elektromagnitnykh voln cherez metall v sil'nom magnitnom pole. *ZhETF*. 1960;38(1):161–164 (in Russ.).]
10. Bowers R., Legendy C., Rose F. Oscillatory galvanomagnetic effect in metallic Sodium. *Phys. Rev. Letts.* 1961;7(9):339–341. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.7.339>
11. Liu Y., Willis R.F., Emtsev K.V., Seyller T. Plasmon dispersion and damping in electrically isolated two-dimensional charge sheets. *Phys. Rev. B*. 2008;78(20):201403. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.78.201403>

15. Ciarrocchi A., Unuchek D., Avsar A., *et al.* Polarization switching and electrical control of interlayer excitons in two-dimensional van der Waals heterostructures. *Nature Photon.* 2019;13(2):131–136. <https://doi.org/10.1038/s41566-018-0325-y>
16. Jirgensons B. Optical rotatory dispersion of proteins and other macromolecules: 2nd ed. Berlin: Springer; 1973. 168 p. ISBN 978-3-642-87713-1
17. Gilroy C., Hashiyada S., Endo K., Karimullah A.S., Barron L.D., Okamoto H., Togawa Y., Kadodwala M. Roles of superchirality and interference in chiral plasmonic biodetection. *J. Phys. Chem. C.* 2019;123(24):15195–15203. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b02791>
18. Koch R.J., Seyller T., Schaefer J.A. Strong phonon-plasmon coupled modes in the graphene/silicon carbide heterosystem. *Phys. Rev. B.* 2010;82(20):201413. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.82.201413>
19. Shin S.Y., Kim N.D., Kim J.G., Kim K.S., Noh D.Y., Kim K.S., Chung J.W. Control of the π plasmon in a single layer graphene by charge doping. *Appl. Phys. Lett.* 2011;99(8):082110. <https://doi.org/10.1063/1.3630230>
20. Piazza L., Lummen T.T.A., Quiñonez E., Murooka Y., Reed B.W., Barwick B., Carbone F. Simultaneous observation of the quantization and the interference pattern of a plasmonic near-field. *Nat. Commun.* 2015;6:6407. <https://doi.org/10.1038/ncomms7407>
21. Zhou W., Lee J., Nanda J., Pantelides S.T., Pennycook S.J., Idrobo J.C. Atomically localized plasmon enhancement in monolayer graphene. *Nat. Nanotechnol.* 2012;7(3):161–165. <https://doi.org/10.1038/nnano.2011.252>
22. Song J., Zhang L., Xue Y., Wu Xia F., Zhang C., Zhong Y.-L., Zhang Y., Teng J., Premaratne M., Qiu Bao Q. Efficient excitation of multiple plasmonic modes on three-dimensional graphene: An unexplored dimension. *ACS Photonics.* 2016;3(10):1986–1992. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.6b00566>
23. Lu Y., Song J., Yuan J., Zhang L., Wu Q.Y.S., Yu W., Zhao M., Qiu C.-W., Teng J., Loh K.P., Zhang C., Bao Q. Highly efficient plasmon excitation in graphene-Bi₂Te₃ heterostructure. *J. Opt. Soc. Am. B.* 2016;33(9):1842–1846. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.33.001842>
24. Kelly C., Tullius R., Laphorn A.J., Gadegaard N., Cooke G., Barron L.D., Karimullah A.S., Rotello V.M., Kadodwala M. Chiral plasmonic fields probe structural order of biointerfaces. *J. Am. Chem. Soc.* 2018;140(27):8509–8517. <https://doi.org/10.1021/jacs.8b03634>
25. Пастер Л. *Избранные труды: в 2 т.*: Пер. с фр.; под ред. А.А. Имшенецкого. М.: Изд-во АН СССР; 1960. Т. 1. С. 9–48
26. Поннамперума С. *Происхождение жизни*: Пер. с англ.; под ред. Г.А. Деборина. М.: Мир; 1977. 176 с.
27. Fox S., Dose K. *Molecular evolution and the origin of life*. Washington: Freeman and Co.; 1972. 360 p.
28. Ponnampereuma C. Primordial organic chemistry and the origin of life. *Quart. Rev. Biophys.* 1971;4(2–3):77–106. <https://doi.org/10.1017/S0033583500000603>
29. Руттен М. *Происхождение жизни*: Пер. с англ.; под ред. А. И. Опарина. М.: Мир; 1973. 412 с.
30. Брода Э. *Эволюция биоэнергетических процессов*: пер. с англ.; под ред. А.И. Опарина. М.: Мир; 1978. 304 с.
31. Твердислов В.А. Хиральность как первичный переключатель иерархических уровней в молекулярно-био-
12. Maxfield B.W. Helicon waves in solids. *Amer. J. Phys.* 1969;37(3):241–269. <https://doi.org/10.1119/1.1975500>
13. Stenzel R.L., Urrutia J.M. Helicons in unbounded plasmas. *Phys. Rev. Lett.* 2015;114(20):205005. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.205005>
14. Kung H.-H., Goyal A.P., Maslov D.L., Wang X., Lee A., Kemper A., Cheong S.-W., Blumberg G.E. Observation of chiral surface excitons in a topological insulator Bi₂Se₃. In: *PNAS*. 2019;116(10):4006–4011. <https://doi.org/10.1073/pnas.1813514116>
15. Ciarrocchi A., Unuchek D., Avsar A., *et al.* Polarization switching and electrical control of interlayer excitons in two-dimensional van der Waals heterostructures. *Nature Photon.* 2019;13(2):131–136. <https://doi.org/10.1038/s41566-018-0325-y>
16. Jirgensons B. Optical rotatory dispersion of proteins and other macromolecules: 2nd ed. Berlin: Springer; 1973. 168 p. ISBN 978-3-642-87713-1
17. Gilroy C., Hashiyada S., Endo K., Karimullah A.S., Barron L.D., Okamoto H., Togawa Y., Kadodwala M. Roles of superchirality and interference in chiral plasmonic biodetection. *J. Phys. Chem. C.* 2019;123(24):15195–15203. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b02791>
18. Koch R.J., Seyller T., Schaefer J.A. Strong phonon-plasmon coupled modes in the graphene/silicon carbide heterosystem. *Phys. Rev. B.* 2010;82(20):201413. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.82.201413>
19. Shin S.Y., Kim N.D., Kim J.G., Kim K.S., Noh D.Y., Kim K.S., Chung J.W. Control of the π plasmon in a single layer graphene by charge doping. *Appl. Phys. Lett.* 2011;99(8):082110. <https://doi.org/10.1063/1.3630230>
20. Piazza L., Lummen T.T.A., Quiñonez E., Murooka Y., Reed B.W., Barwick B., Carbone F. Simultaneous observation of the quantization and the interference pattern of a plasmonic near-field. *Nat. Commun.* 2015;6:6407. <https://doi.org/10.1038/ncomms7407>
21. Zhou W., Lee J., Nanda J., Pantelides S.T., Pennycook S.J., Idrobo J.C. Atomically localized plasmon enhancement in monolayer graphene. *Nat. Nanotechnol.* 2012;7(3):161–165. <https://doi.org/10.1038/nnano.2011.252>
22. Song J., Zhang L., Xue Y., Wu Q.Y.S., Xia F., Zhang C., Zhong Y.-L., Zhang Y., Teng J., Premaratne M., Qiu C.-W., Bao Q. Efficient excitation of multiple plasmonic modes on three-dimensional graphene: An unexplored dimension. *ACS Photonics.* 2016;3(10):1986–1992. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.6b00566>
23. Lu Y., Song J., Yuan J., Zhang L., Wu Q.Y.S., Yu W., Zhao M., Qiu C.-W., Teng J., Loh K.P., Zhang C., Bao Q. Highly efficient plasmon excitation in graphene-Bi₂Te₃ heterostructure. *J. Opt. Soc. Am. B.* 2016;33(9):1842–1846. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.33.001842>
24. Kelly C., Tullius R., Laphorn A.J., Gadegaard N., Cooke G., Barron L.D., Karimullah A.S., Rotello V.M., Kadodwala M. Chiral plasmonic fields probe structural order of biointerfaces. *J. Am. Chem. Soc.* 2018;140(27):8509–8517. <https://doi.org/10.1021/jacs.8b03634>
25. Paster L. *Izbrannyye trudy: v 2 t. (Selected works: in 2 v.)*. Imshenetskii A.A. (Ed.). Moscow: Izdatel'stvo AN SSSR; 1960. V 1. P. 9–48. (in Russ.).
26. Ponnampereuma S. *Proiskhozhdenie zhizni (The origin of life)*. Deborin G.A. (Ed.). Moscow: Mir; 1977. 176 p. (in Russ.).
27. Fox S., Dose K. *Molecular evolution and the origin of life*. Washington: Freeman and Co.; 1972. 360 p.

- логических системах. *Биофизика*. 2013;58(1):159–164.
32. Гинзбург В.Л., Эйдем В.Я. О черенковском излучении дипольных моментов. *ЖЭТФ*. 1959;35(6):1508–1512.
 33. Барсуков К.А., Каданцев В.Н. Об особенностях в излучении точечных диполей, движущихся в узких полостях в магнитоактивных средах. *ЖТФ*. 1965;35(9):1606.
 34. Гинзбург В.Л., Цытович В.Н. *Переходное излучение и переходное рассеяние: некоторые вопросы теории*. М.: Наука; 1984. 360 с.
 35. Гинзбург В.Л. *Распространение электромагнитных волн в плазме*. М.: Наука; 1967. 683 с.
 36. Кизель В.А. *Физические причины диссимметрии живых систем*. М.: Наука, 1985. 119 с.
 37. Гольдманский В.И., Кузьмин В.В. Спонтанное нарушение зеркальной симметрии в природе и происхождение жизни. *УФН*. 1989;157(1):3–50. <https://doi.org/10.3367/UFN.0157.198901a.0003>
 38. Даванков В.А. Естественная гомохиральность элементарных частиц и метеоритная бомбардировка как возможный источник добиологической молекулярной хиральности. *Журн. физ. химии*. 2009;83(8):1405–1416.
 39. Globus N., Blandford R.D. The chiral puzzle of life. *Astrophys. J. Lett.* 2020;895(1):L11. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab8dc6>
 28. Ponnampertuma C. Primordial organic chemistry and the origin of life. *Quart. Rev. Biophys.* 1971;4(2–3):77–106. <https://doi.org/10.1017/S0033583500000603>
 29. Rutten M. *Proiskhozhdenie zhizni (The origin of life)*. Oparin A.I. (Ed.). Moscow: Mir; 1973. 412 p. (in Russ.).
 30. Broda E. *Evolutsiya bioenergeticheskikh protsessov (Evolution of bioenergetic processes)*. Oparin A.I. (Ed.). Moscow: Mir; 1978. 304 p. (in Russ.).
 31. Tverdislov V.A. Chirality as a primary switch of hierarchical levels in molecular biological systems. *Biophysics*. 2013;58(1):128–131. <https://doi.org/10.1134/S000635091301015632> [Tverdislov V.A. Khiral'nost' kak pervichnyi pereklyuchatel' ierarkhicheskikh urovnei v molekulyarno-biologicheskikh sistemakh. *Биофизика*. 2013;58(1):159–164 (in Russ.).]
 32. Ginzburg V.L., Eidman V.Ia. Cherenkov radiation from dipoles. *JETP*. 1959;8(6):1055–1058. [Ginzburg V.L., Eidman V.Ia. O cherenkovskom izluchenii dipol'nykh momentov. *ZhETF*. 1959;35(6):1508–1512 (in Russ.).]
 33. Barsukov K.A., Kadantsev V.N. Ob osobennostyakh v izluchenii tochechnykh dipolei, dvizhushchikhsya v uzkiykh polostyakh v magnitoaktivnykh sredakh. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki = Technical Physics*. 1965;35(9):1606 (in Russ.).
 34. Ginzburg V.L., Tsytovich V.N. *Perekhodnoe izluchenie i perekhodnoe rasseyanie: nekotorye voprosy teorii (Transition radiation and transition scattering: some theoretical questions)*. Moscow: Nauka; 1984. 360 p. (in Russ.).
 35. Ginzburg V.L. *Rasprostranenie elektromagnitnykh voln v plazme (Propagation of electromagnetic waves in plasma)*. Moscow: Nauka; 1967. 683 p. (in Russ.).
 36. Kizel' V.A. *Fizicheskie prichiny dissimmetrii zhivykh sistem (Physical reasons for the dissymmetry of living systems)*. Moscow: Nauka; 1985. 119 p. (in Russ.).
 37. Gol'danskii V.I., Kuz'min V.V. Spontaneous breaking of mirror symmetry in nature and the origin of life. *Sov. Phys. Usp.* 1989;32(1):1–29. <https://doi.org/10.1070%2FPU1989v032n01ABEH002674> [Gol'danskii V.I., Kuz'min V.V. Spontannoe narushenie zerkal'noi simmetrii v prirode i proiskhozhdenie zhizni. *UFN*. 1989;157(1):3–50 (in Russ.).]
 38. Davankov V.A. Inherent homochirality of primary particles and meteorite impacts as possible source of prebiotic molecular chirality. *Russ. J. Phys. Chem.* 2009;83(8):1247–1256. <https://doi.org/10.1134/S0036024409080019> [Davankov V.A. Estestvennaya gomokhiral'nost' elementarnykh chastits i meteoritnaya bombardirovka kak vozmozhnyi istochnik dobiologicheskoi molekulyarnoi khiral'nosti. *Zhurn. fiz. khimii*. 2009;83(8):1405–1416 (in Russ.).]
 39. Globus N., Blandford R.D. The chiral puzzle of life. *Astrophys. J. Lett.* 2020;895(1):L11. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab8dc6>

Об авторе

Каданцев Василий Николаевич, д.ф.-м.н., профессор кафедры биокрибернетических систем и технологий Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: appl.synergy@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9205-6527>

About the author

Vasiliy N. Kadantsev, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Department of Biocybernetic Systems and Technologies, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: appl.synergy@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9205-6527>

УДК 538.951

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-40-48>

ОБЗОР

Методы оценки механических свойств изолирующих материалов с низкой диэлектрической проницаемостью

И.С. Овчинников [®]

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: ivan-ovchinnikov@mail.ru

Резюме. Представлены обзор и исследование современных методов оценки механических свойств изолирующих материалов с низкой диэлектрической проницаемостью. Определены основные особенности измерения модуля Юнга тонких пленок изолирующих материалов с низкой диэлектрической проницаемостью с использованием методов бриллюэновского рассеяния света, спектроскопии поверхностных акустических волн, пикосекундного лазерно-акустического метода, эллипсометрической порозиметрии, наноиндентирования и метода атомно-силовой микроскопии в различных режимах. Дана оценка латеральному разрешению и разрешению по глубине для указанных методов. Установлена степень сложности подготовки образцов для измерения указанными методами, а также являются ли измерения деструктивными по отношению к образцу. Проведено сравнение результатов оценки модуля Юнга изолирующих материалов с низкой диэлектрической проницаемостью, полученные указанными методами. В результате сравнительного анализа методов оценки механических свойств изолирующих материалов установлено, что метод атомно-силовой микроскопии в режиме количественного наномеханического картирования превосходит другие описанные методы как по латеральному разрешению (8 нм), так и по глубине (10 нм). Показано, что ввиду малой силы воздействия зонда атомно-силового микроскопа на поверхность метод не оказывает деструктивного воздействия на исследуемый образец. Кроме того, отсутствие необходимости создания специальных условий для проведения эксперимента (класс чистоты помещений, возможность эксперимента при условиях окружающей среды и т.д.) делает его относительно простым с точки зрения подготовки объекта исследования. Также установлено, что метод атомно-силовой микроскопии в режиме количественного наномеханического картирования позволяет формировать карту распределения модуля Юнга изолирующего материала в составе системы металлизации интегральных микросхем.

Ключевые слова: модуль Юнга, low-*k* диэлектрики, наноиндентирование, атомно-силовая микроскопия, режим количественного наномеханического картирования

• Поступила: 24.03.2021 • Доработана: 30.03.2021 • Принята к опубликованию: 05.04.2021

Для цитирования: Овчинников И.С. Методы оценки механических свойств изолирующих материалов с низкой диэлектрической проницаемостью. *Российский технологический журнал*. 2021;9(3):40–48. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-40-48>

Прозрачность финансовой деятельности: Автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

REVIEW ARTICLE

Evaluation methods of mechanical properties for low- k dielectrics

Ivan S. Ovchinnikov[@]

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: ivan-ovchinnikov@mail.ru

Abstract. This review introduces the study of state-of-art methods for assessing the mechanical properties of insulating materials with low dielectric constant. The main features of measuring Young's modulus of thin films insulating materials with low dielectric constant are determined by usage of Brillouin light scattering, surface acoustic wave spectroscopy, picosecond laser-acoustic method, ellipsometric porosimetry, nanoindentation and atomic force microscopy in various modes. The author estimated the optimum lateral and optimum depth resolution for each above method. The review analyzes the degree of sample preparation complexity for the measurements by these methods and describes what methods of measurement are destructive for the samples. Besides, the review makes a comparison for the results of evaluating Young's modulus of insulating materials with low dielectric constant achieved by different methods. Comparative analysis of the methods for assessing mechanical properties lead us to the conclusion that the method of atomic force microscopy is superior to other methods described above, both in lateral (8 nm) and optimum depth (10 nm) resolution. It is shown that due to the small impact force of the atomic force microscope probe on the surface, the method does not have a destructive effect on the sample. In addition, there is no need to create special conditions for the experiment (e.g., the cleanliness level of the premises, the possibility of an experiment under environmental conditions, etc.). This makes the experiment relatively simple in terms of preparing the object of research. It has been also established that the method of atomic force microscopy in the mode of quantitative nanomechanical mapping allows forming a map of the distribution of the Young's modulus of the insulating material as part of the metallization system of integrated circuits.

Keywords: Young's modulus, low- k dielectrics, nanoindentation, atomic force microscopy, quantitative nanomechanical mapping mode

• Submitted: 24.03.2021 • Revised: 30.03.2021 • Accepted: 05.04.2021

For citation: Ovchinnikov I.S. Evaluation methods of mechanical properties for low- k dielectrics. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(3):40–48 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-40-48>

Financial disclosure: The author has no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The author declares no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение производительности вычислительных устройств является одной из основных задач развития индустрии микро- и нанoeлектроники. Долгое время для этого масштабировали активные элементы микросхем – транзисторы. Однако увеличение числа и плотности компоновки транзисторов на кристалле увеличило длину проводников в системе металлизации. Кроме того, значительно уменьшились площадь сечения проводников и расстояния между ними [1].

Анализ тенденции развития технологических процессов показывает, что, начиная с технологии 250 нм, время прохождения сигнала по проводникам начинает превалировать над временем

переключения транзистора. Это обусловлено ростом, так называемых, резистивно-емкостных (RC) задержек. Основным способом снижения резистивно-емкостных задержек является уменьшение диэлектрической проницаемости материалов, используемых в межуровневой изоляции [2].

На величину диэлектрической проницаемости оказывают влияние поляризуемость молекул и плотность материала. До 45 нм технологического процесса диэлектрическую проницаемость снижали путем интеграции материалов с меньшей поляризуемостью. Когда подобный подход себя исчерпал, в индустрии для межуровневой изоляции начали применять материалы с меньшей плотностью за счет формирования в них пористой структуры [3].

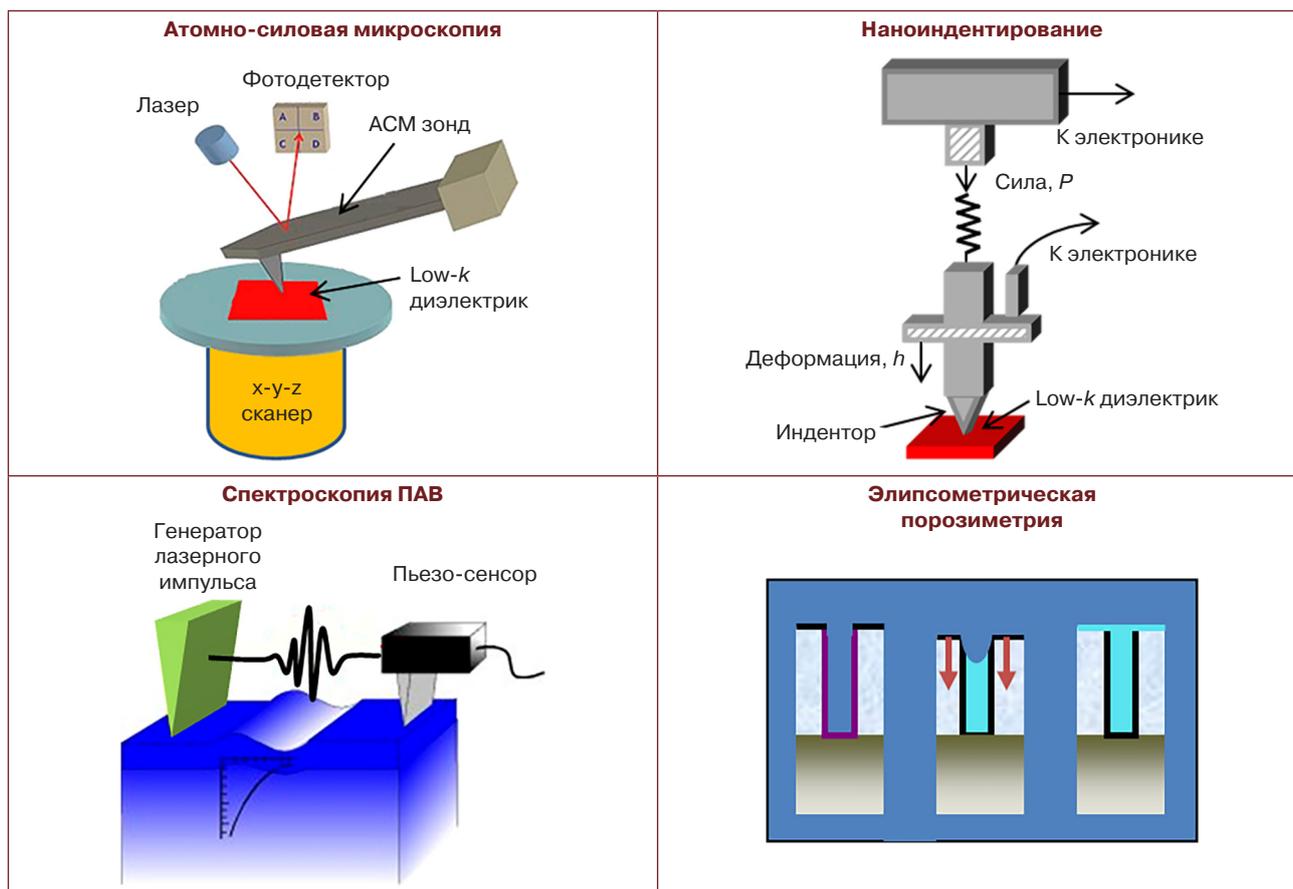


Рис. 1. Методы оценки модуля Юнга тонких пленок изолирующих материалов с низкой диэлектрической проницаемостью

Однако дальнейшее снижение величины диэлектрической проницаемости становится невозможным. Из-за увеличения пористости существенно снижается механическая прочность диэлектрика, что делает его несовместимым с последующими технологическими процессами создания интегральных схем [4, 5]. Таким образом, задача контроля механических характеристик является важной и актуальной для дальнейшего развития индустрии микро- и наноэлектроники.

Основной механической характеристикой, которую используют для оценки прочности диэлектрика, является модуль Юнга (E). Считается, что диэлектрик будет совместим со всеми применяемыми сейчас технологическими операциями, если $E > 5$ ГПа [3].

Для оценки величины E low-*k* пленок применяются различные аналитические методики (рис. 1): бриллюэновское рассеяние света (БС) [6], спектроскопия поверхностных акустических волн (СПАВ) [7], пикосекундный лазерно-акустический метод (ПЛА) [8], эллипсометрическая порозиметрия (ЭП) [9], наноиндентирование (НИ) [10] и методы, основанные на атомно-силовой микроскопии (АСМ) [11]. В данной работе проведена оценка всех указанных выше методик, продемонстрированы их

достоинства и недостатки, характерные для оценки материалов с низкой диэлектрической проницаемостью.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ

Наноиндентирование

Метод НИ является основным традиционным инструментом для оценки модуля упругости и твердости широкого спектра материалов, в том числе диэлектриков. Наноиндентирование представляет собой совокупность методов прецизионного локального силового воздействия на материал индентором, свойства которого известны, при одновременной регистрации деформационных откликов с нанометровым разрешением. В качестве индентора используют конический индентор, кубический индентор, индентор Берковича и индентор Виккерса. Важно отметить, что радиус закругления индентора наряду с точностью его позиционирования определяют латеральное разрешение метода НИ. На сегодняшний день известны инденторы с радиусом закругления наконечника 50 нм и точностью позиционирования 100 нм [12].

При наноиндентировании нагрузка, приложенная к образцу (P), и деформация образца (h) регистрируются в виде зависимости «нагрузка – смещение» [13]. Обычно в эксперименте индентор воздействует на образец с усилием, равномерно увеличивающимся до установленного порогового значения, затем воздействие прекращается, и индентор возвращается в начальное положение.

Определение механических свойств по кривой «нагрузка – смещение» выполняется с использованием аналитического метода, предложенного Oliver W.C. и Pharr G.M. [10]. Этот метод разработан для оценки механических свойств объемных материалов. При исследовании тонких пленок возникают погрешности, которые оказывают влияние на корректность оценки величины модуля Юнга. Деформационный отклик индентора в процессе погружения в структуру образца находится в зависимости не только от механики пленки, но и от упругих свойств подложки.

Принято считать, что наноиндентирование завышает показатели модуля Юнга по причине влияния подложки на результат измерений [14, 15]. Важно отметить, что подобное явление наблюдается для пленок с толщиной менее 500 нм. Кроме того, наноиндентирование является разрушающим методом, что делает его непригодным для применения непосредственно в технологическом производственном процессе [16]. Однако это не помешало использовать метод НИ для оценки механических свойств как плотных [17], так и пористых [18] диэлектрических пленок.

Непрерывное масштабирование СБИС потребовало от индустрии создания новых методов оценки механических характеристик. В частности, широкое распространение получили неструктивные методики, применение которых не разрушает образец ввиду отсутствия механического взаимодействия между измерительным зондом и исследуемой поверхностью.

Бриллюэновская спектроскопия

Метод БС с начала 90-х годов XX века стал использоваться для оценки механических свойств диэлектриков [19]. Метод основан на спектральном анализе спонтанного рассеяния Бриллюэна. В ходе измерений оцениваются спектральные изменения рассеянного света, вызванные падающим монохроматическим лазерным лучом, который фокусируется на поверхности пленки. Диаметр пятна в точке фокусировки определяет латеральное разрешение метода, которое находится в диапазоне от 35 до 50 мкм [20].

Так как механический контакт в процессе измерения отсутствует, считается, что метод независим

от влияния подложки на результат измерений. Это позволило исследователям применять его для оценки механики диэлектрических пленок с толщинами менее 500 нм [21]. На сегодняшний день известно о применении метода на пленках с толщиной 100 нм [22].

Обращает на себя внимание, что нет однозначной оценки достоверности получаемых методом БС результатов оценки модуля Юнга диэлектриков с низкой диэлектрической проницаемостью. Продемонстрированные в работе [23] измерения модуля Юнга пористых пленок метилсилсесквиоксана демонстрируют более низкие значения, чем при наноиндентировании. В свою очередь, Sean King и соавторы в [22] показывают результаты, которые хорошо коррелируют с НИ.

Спектроскопия поверхностных акустических волн

В методе спектроскопии поверхностных акустических волн широкополосные пакеты поверхностных акустических волн генерируются посредством поглощения энергии лазерного импульса на границе раздела «пленка – подложка». Когда энергия сфокусированного лазерного импульса с длительностью в наносекундном или пикосекундном диапазоне поглощается на поверхности образца, происходит его быстрое тепловое расширение и, как следствие, генерация поверхностных акустических волн [24].

Когда ПАВ распространяются вдоль направления (110) на плоскости кремния (100), степень их дисперсии мало зависит от коэффициента Пуассона пленки, а в основном зависит от модуля Юнга. Таким образом, теоретические дисперсионные кривые с различными модулями Юнга (E) могут быть рассчитаны в соответствии с теорией волнового движения.

Вследствие схожей природы измерений, латеральное разрешение метода незначительно лучше метода БС и составляет 10 мкм. Что касается корреляции результатов оценки модуля Юнга, то они тоже имеют интересные особенности. Так, для пористых диэлектрических пленок с $E < 3$ ГПа результаты оказываются несколько ниже результатов, полученных методом НИ [2]. Однако для упругих пленок (SiO_2 или Si_3N_4) измерения количественно согласуются с результатами наноиндентирования [7].

Пикосекундный лазерно-акустический метод

Пикосекундный лазерно-акустический (ПЛА) метод был впервые предложен в 1984 году С. Thomsen и соавторами в работе [8]. Измерения основаны на использовании сверхкоротких лазерных импульсов для

генерации когерентных акустических импульсов и обнаружения их с помощью ультракоротких зондирующих лазерных импульсов с задержкой по времени, когда они распространяются через прозрачную среду или достигают границ раздела пленка подложка. Диаметр сфокусированного пятна лазера на поверхности пленки составляет 5–7 мкм. Для определения упругости пленок в методе ПЛА используют эхо-импульсный метод или метод детектирования рассеяния Бриллюэна. Кроме того, чем короче длительность акустического импульса, тем точнее могут быть выполнены измерения модуля упругости [25].

Применение пикосекундного лазерно-акустического метода для оценки упругости low- k диэлектриков продемонстрировано в [26]. В работе показана возможность измерения механических свойств осажденных из газовой фазы пористых пленок a-SiOC:H. Также метод был использован для оценки пористых диэлектрических пленок в [27]. Анализ указанных выше работ позволяет сделать вывод, что метод ПЛА позволяет исследовать как пористые, так и плотные low- k пленки с толщиной менее 100 нм. Однако для реализации измерений необходимо определить точную толщину пленки и сформировать на исследуемой поверхности непрозрачный слой преобразователя.

Эллипсометрическая порозиметрия

Метод эллипсометрической порозиметрии (ЭП) – неразрушающий метод определения пористости и распределения пор по размерам для low- k пленок [9]. Метод ЭП представляет собой комбинацию неинтрузивного (распространение волн) и интрузивного (адсорбция пара) методов и позволяет измерять как полную пористость пленки по значению показателя преломления, так и открытую пористость по количеству адсорбированного растворителя. Расчет размера пор основан на уравнении Кельвина.

Важной особенностью ЭП является возможность одновременной оценки толщины пленки и показателя преломления. Изменение показателя преломления используется для определения количества конденсированной жидкости в порах с использованием приближения эффективной среды или уравнения Лоренца – Лоренца [9]. Незначительное и обратимое изменение толщины пленки из-за микроскопического капиллярного давления является упругой реакцией на капиллярные силы, которая зависит от модуля Юнга пористой пленки.

Пространственное разрешение метода ЭП определяется световым лучом эллипсометра, который даже после фокусировки превышает 100 мкм. Что касается допустимых толщин пленок, то на сегодняшний день известно о результатах, полученных на

пленках с толщиной 50 нм, если пористость выше 30% и $E < 3$ ГПа [28]. Важным недостатком является то, что ЭП нельзя использовать для плотных материалов.

Указанный метод хорошо согласуется с результатами ПАВ и БС измерений, несмотря на использование в них разных физических принципов для определения модуля Юнга. Однако, как и для других неразрушающих методов, результаты демонстрируют более низкие значения в сравнении с НИ.

Атомно-силовая микроскопия

В последнее время увеличился интерес к способам оценки механики, основанным на методе атомно-силовой микроскопии, основным преимуществом которых является их высокое латеральное разрешение, позволяющее оценивать механические свойства диэлектрика, интегрированного в систему металлизации.

АСМ – один из видов сканирующей зондовой микроскопии, основанный на Ван-дер-Ваальсовских взаимодействиях острия зонда с поверхностью образца [29]. Методы АСМ можно использовать для получения карт распределения таких величин, как рельеф образца, адгезия зонд – образец, модуль Юнга, деформация и так далее [30].

Для измерения механических характеристик образца в АСМ используется несколько режимов. В работе A.L. Weisenhorn и соавторов [31] показана возможность исследования механики образца посредством регистрации кривых «сила – смещение» и их интерпретации с точки зрения контактной механики. Регистрация силовых кривых возможна как в контактном [31], так и в полуконтактном [32] режимах сканирования. Эти измерения широко используются с момента начала развития АСМ, однако они страдают от ряда проблем, включая медленную скорость измерений и сильную зависимость от калибровок кантилевера.

Также широкое применение для наномеханических измерений нашли динамические режимы АСМ, такие как акустическая атомно-силовая микроскопия (AFAM) [33], ультразвуковая атомно-силовая микроскопия (UAFM) [34] и режим контактного резонанса (CR-AFM) [35].

В работах M. Корыцинска-Мюллер и соавторов продемонстрированы результаты измерения модуля Юнга ультратонких (28 нм) пленок SiO₂ [36] и пористых пленок (46–350 нм) [37] методом AFAM в сравнении с НИ и результатами измерений лазерно-акустическим методом. AFAM измерения демонстрировали хорошую согласованность с НИ с незначительным завышением результатов при уменьшении толщины пленки.

Предложенный Kazushi Yamanaka и O. Kolosov [38, 39] режим ультразвуковой атомно-силовой микроскопии применяется для оценки механических характеристик нервных клеток [40] и впервые синтезированных углеродных нанотрубок [41]. Кроме того, в режиме ультразвуковой атомно-силовой микроскопии можно определять наличие скрытых дефектов диэлектрика в системе межуровневой металлизации [42].

В работе G. Stan и соавторов продемонстрированы результаты измерений тонких диэлектрических пленок (~500 нм), осажденных из газовой фазы на Si (100) [43]. Результаты показали хорошую корреляцию с ПЛА-измерениями. Кроме того, авторы предложили неразрушающий способ 3D-томографии механических свойств low-*k* пленок толщиной 120 нм, синтезированных методом осаждения из газовой фазы [44]. Использование режима CR-AFM в совокупности с режимом AFM-IR продемонстрировали возможность выполнения химико-механического анализа наноструктур Cu/low-*k* [45].

На сегодняшний день малоизученным режимом АСМ в области измерения механических свойств остается предложенный в начале 2010-х гг. режим наномеханического картирования (PeakForce quantitative nanomechanical mapping, PFQNM). В этом режиме зонд с высокой частотой периодически сближается с поверхностью образца и взаимодействует с ней в течение короткого времени. В результате формируются так называемые силовые кривые (рис. 2), которые являются источником информации о механических характеристиках образца [46].

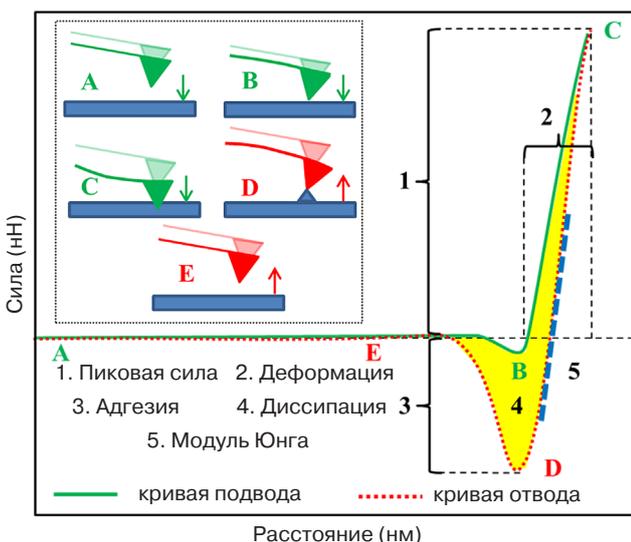


Рис. 2. Силовые кривые, полученные методом АСМ в режиме количественного наномеханического картирования

В работе [47] продемонстрированы результаты оценки пористых метил-модифицированных силикатов в сравнении с результатами НИ, СПАВ и ЭП.

Результаты показали хорошую корреляцию с методом НИ, но оказались несколько ниже значений, полученных методами ПАВ и ЭП. Также метод может быть использован для локализации дефектов межуровневой изоляции [48].

Особенностью метода является независимость результатов измерений от толщины исследуемой пленки, несмотря на наличие механического контакта с поверхностью. Это можно объяснить тем, что АСМ в режиме PFQNM способен осуществлять измерения при небольшой силе нагрузки (до <0.1 нН) и при глубине вдавливания на уровне 1 нм [49], что значительно отличает его от наноиндентирования. В работе [50] показаны достоверные результаты оценки модуля Юнга для образца с толщиной 10 нм. Кроме того, латеральное разрешение метода ограничено только радиусом закругления зонда (~8 нм).

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Анализ большинства предложенных на сегодняшний день методов оценки механических свойств диэлектрических пленок позволил выделить ряд важных характеристик, которые отличают их между собой. Это латеральное разрешение, разрешение по глубине, сложность пробоподготовки и наличие деструктивного воздействия на исследуемый образец.

С точки зрения латерального разрешения очевидным преимуществом обладает метод атомно-силовой микроскопии в различных режимах. Его латеральное разрешение, как уже обсуждалось выше, составляет порядка 8 нм. В настоящий момент это является крайне актуальным, так как при таком разрешении можно оценивать упругость диэлектрических пленок непосредственно в составе системы металлизации интегральных схем. Наиболее близкие результаты к АСМ демонстрирует метод НИ – 250 нм. Методы, основанные на распространении в пленках электромагнитных колебаний (СПАВ, ПЛА, БС), имеют разрешение в диапазоне 10–50 мкм. Худшие результаты демонстрирует метод ЭП – 100 мкм.

Разрешение по глубине также оказалось лучшим у метода АСМ в режиме наномеханического картирования – 10 нм. Также достаточно высокие результаты (28 нм) демонстрирует метод АСМ в режиме «акустическая атомно-силовая микроскопия». Несколько более низкие результаты демонстрирует метод ЭП, однако, результаты можно получить только для пористых пленок. Методы СПАВ, ПЛА и БС имеют самое низкое разрешение по глубине в диапазоне от 100 до 150 нм.

По сложности пробоподготовки самым простым остается метод НИ. Далее можно расположить

метод АСМ. Стоит отметить, что в методе АСМ все измерения проводятся в условиях окружающей среды и могут быть зависимы от свойств интерфейса «зонд/пленка». Методы СПАВ, ПЛА и БС требуют достаточно серьезной пробоподготовки. В частности, для них характерна необходимость формирования дополнительного слоя материала, используемого либо в качестве приемника, либо в качестве отражателя.

Как показал проведенный анализ, деструктивное воздействие на образец оказывает только метод НИ. Все остальные рассмотренные методы являются неразрушающими и позволяют использовать образец для дальнейших исследований.

С точки зрения оценки модуля Юнга все рассмотренные методы дают качественно согласованные результаты. Количественно же результаты сильно зависят от физической природы используемого метода. Так, метод НИ хорошо согласуется с результатами АСМ в режиме количественного наномеханического картирования. Оба метода основаны на вдавлении образца зондом. Однако результаты оказываются несколько выше, чем для методов СПАВ, ПЛА и БС, в основе которых лежит принцип распространения электромагнитных колебаний в структуре пленки. Метод ЭП также хорошо

согласуется с результатами СПАВ, ПЛА и БС измерений, несмотря на использование в них разных физических принципов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проведенном обзоре представлены передовые экспериментальные методы оценки механических свойств изолирующих материалов с низкой диэлектрической проницаемостью. Продемонстрированы особенности их применения, а также достоинства и недостатки, характерные для их применения в индустрии микро- и нанoeлектроники.

Представленный сравнительный анализ рассмотренных методов позволяет выделить среди них метод атомно-силовой микроскопии в различных режимах, в особенности в режиме количественного наномеханического картирования.

Метод АСМ демонстрирует лучшие показатели как по латеральному разрешению (8 нм), так и по глубине (10 нм). Кроме того, метод не требует сложной пробоподготовки и не оказывает деструктивного воздействия на исследуемый образец. Это делает его наиболее перспективным для дальнейших исследований механических свойств изолирующих материалов, особенно в составе системы металлизации интегральных схем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Havemann R.H., Hutchby J.A. High-performance interconnects: an integration overview. In: *Proc. IEEE*. 2001;89(5):586–601. <https://doi.org/10.1109/5.929646>
2. Maex K., Baklanov M.R., Shamiryani D., Iacopi F., Brongersma S.H., Yanovitskaya Z.S., Iacopi F. Low dielectric constant materials for microelectronics. *J. Appl. Phys.* 2003;93(11):8793–8891. <https://doi.org/10.1063/1.1567460>
3. Baklanov M.R., Vanstreels K., Wu C., Li Y., Croes K. Low dielectric constant materials for nanoelectronics. In: *Thin Films On Silicon: Electronic and Photonic Applications*. 2016;8:163–271. https://doi.org/10.1142/9789814740487_0005
4. Guyer E.P., Patz M., Dauskardt R.H. Fracture of nanoporous methyl silsesquioxane thin-film glasses. *J. Mater. Res.* 2006;21(4):882–894. <https://doi.org/10.1557/jmr.2006.0106>
5. Guyer E.P., Dauskardt R.H. Effect of solution pH on the accelerated cracking of nanoporous thin-film glasses. *J. Mater. Res.* 2005;20(3):680–687. <https://doi.org/10.1557/JMR.2005.0079>
6. Zizka J., King S., Every A.G., Sooryakumar R. Mechanical properties of low- and high-*k* dielectric thin films: a surface Brillouin light scattering study. *J. Appl. Phys.* 2016;119(14):144102. <https://doi.org/10.1063/1.4945672>
7. Gostein M., Maznev A.A., Mazurenko A., Tower J. Surface wave metrology for copper/low-*k* interconnects. In: *AIP Conf. Proc.* 2005;788(1):496–500. <https://doi.org/10.1063/1.2063009>
8. Thomsen C., Strait J., Vardeny Z., Maris H.J., Tauc J., Hauser J.J. Coherent phonon generation and detection by picosecond light pulses. *Phys. Rev. Lett.* 1984;53(10):989–992. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.53.989>
9. Mogilnikov K.P., Baklanov M.R. Characterisation of low-*k* dielectric films by ellipsometric porosimetry. In: *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 2000;612:D4.2.1–D4.2.12. <https://doi.org/10.1557/PROC-612-D4.2.1>
10. Oliver W.C., Pharr G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *J. Mater. Res.* 1992;7(6):1564–1583. <https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564>
11. Hurley D.C., Kopycinska-Müller M., Kos A.B., Geiss R.H. Nanoscale elastic-property measurements and mapping using atomic force acoustic microscopy methods. *Meas. Sci. Technol.* 2005;16(11):2167–2172. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/16/11/006>
12. Knap J., Ortiz M. Effect of indenter-radius size on Au(001) nanoindentation. *Phys. Rev. Lett.* 2003;90(22):226102. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.90.226102>
13. Egart M., Janković B., Srčić S. Application of instrumented nanoindentation in preformulation studies of pharmaceutical active ingredients and excipients. *Acta Pharmaceutica*. 2016;66(3):303–330. <https://doi.org/10.1515/acph-2016-0032>
14. Choi Y., Lee H., Kwon D. Analysis of sharp-tip-indentation load–depth curve for contact area determination taking into account pile-up and sink-in effects. *J. Mater. Res.* 2004;19(11):3307–3315. <https://doi.org/10.1557/JMR.2004.0419>

15. Vella J.B., Volinsky A.A., Adhietty I.S., Edwards N.V. Nanoindentation of silicate low-*k* dielectric thin films. In: *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 2001;716(1):1213. <https://doi.org/10.1557/PROC-716-B12.13>
16. Zehnder C., Kurkjian C.R., Bruns S., Peltzer J.N., Korte-Kerzel S., Möncke D. Influence of cooling rate on cracking and plastic deformation during impact and indentation of borosilicate glasses. *Front. Mater.* 2017;4:5. <https://doi.org/10.3389/fmats.2017.00005>
17. Shen L., Zeng K., Wang Y., Narayanan B., Kumar R. Determination of the hardness and elastic modulus of low-*k* thin films and their barrier layer for microelectronic applications. *Microelectron. Eng.* 2003;70(1):115–124. [https://doi.org/10.1016/S0167-9317\(03\)00413-1](https://doi.org/10.1016/S0167-9317(03)00413-1)
18. Okudur O.O., Vanstreels K., De Wolf I., Hangen U. Extraction of elastic modulus of porous ultra-thin low-*k* films by two-dimensional finite-element simulations of nanoindentation. *J. Appl. Phys.* 2016;119(2):025302. <https://doi.org/10.1063/1.4939284>
19. Jiang X., Goranchev B., Schmidt K., Grünberg P., Reichelt K. Mechanical properties of *a*-Si:H films studied by Brillouin scattering and nanoindenter. *J. Appl. Phys.* 1990;67(11):6772–6778. <https://doi.org/10.1063/1.345064>
20. Zhou W., Bailey S., Sooryakumar R., King S., Xu G., Mays E., Ege C., Bielefeld J. Elastic properties of porous low-*k* dielectric nano-films. *J. Appl. Phys.* 2011;110(4):043520. <https://doi.org/10.1063/1.3624583>
21. Bailey S., Mays E., Michalak D.J., Chebiam R., King S. Mechanical properties of high porosity low-*k* dielectric nano-films determined by Brillouin light scattering. *J. Phys. D. Appl. Phys.* 2013;46(4):045308. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/4/045308>
22. King S., Antonelli G.A., Stan G., Cook R.F., Sooryakumar R. Advances in metrology for the determination of young's modulus for low-*k* dielectric thin films. In: *Proc. SPIE 8466. Instrumentation, Metrol. Stand. Nanomanufacturing. Optics. Semicond.* 2012;8466:84660A. <https://doi.org/10.1117/12.930482>
23. Flannery C.M., Wittkowski T., Jung K., Hillebrands B., Baklanov M.R. Critical properties of nanoporous low dielectric constant films revealed by Brillouin light scattering and surface acoustic wave spectroscopy. *Appl. Phys. Lett.* 2002;80(24):4594–4596. <https://doi.org/10.1063/1.1478775>
24. Schneider D. Laser-induced surface acoustic waves for material testing. In: (Eds.). Ida N., Meyendorf N. *Handbook of Advanced Non-Destructive Evaluation.* Springer International Publishing; 2018. P. 1–63. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30050-4_38-1
25. Thomsen C., Grahn H.T., Maris H.J., Tauc J. Surface generation and detection of phonons by picosecond light pulses. *Phys. Rev. B Condens. Matter.* 1986;34(6):4129–4138. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.34.4129>
26. Chapelon L.L. Measuring the Young's modulus of ultralow-*k* materials with the non destructive picosecond ultrasonic method. *Microelectron. Eng.* 2006;83(11–12):2346–2350. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2006.10.033>
27. Mechri C., Ruello P., Gusev V., Breteau J.M., Mounier D., Henderson M., Gibaud A., Dourdain S. Evaluation of elastic properties of nanoporous silicon oxide thin films by picosecond laser ultrasonics. *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 2008;15391:211–213. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2008-00430-8>
28. Mogilnikov K.P., Baklanov M.R. Determination of Young's modulus of porous low-*k* films by ellipsometric porosimetry. *Electrochem. Solid-State Lett.* 2002;5(12):29–32. <https://doi.org/10.1149/1.1517771>
29. Binnig G., Quate C.F., Gerber C. Atomic force microscope. *Phys. Rev. Lett.* 1986;56(9):930–934. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.56.930>
30. Sokolov I., Dokukin M.E., Guz N.V. Method for quantitative measurements of the elastic modulus of biological cells in AFM indentation experiments. *Methods.* 2013;60(2):202–213. <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2013.03.037>
31. Weisenhorn A.L., Maivald P., Butt H., Hansma P.K. Measuring adhesion, attraction, and repulsion between surfaces in liquids with an atomic-force microscope. *Phys. Rev. B Condens. Matter.* 1992;45(19):226–232. <https://doi.org/10.1103/physrevb.45.11226>
32. Rosa-Zeiser A., Weilandt E., Hild S., Marti O. The simultaneous measurement of elastic, electrostatic and adhesive properties by scanning force microscopy: pulsed-force mode operation. *Meas. Sci. Technol.* 1997;8(11):1333–1338. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/8/11/020>
33. Rabe U., Janser K., Arnold W. Vibrations of free and surface-coupled atomic force microscope cantilevers: theory and experiment. *Rev. Sci. Instrum.* 1996;67(9):3281–3293. <https://doi.org/10.1063/1.1147409>
34. Yamanaka K., Maruyama Y., Tsuji T., Nakamoto K. Resonance frequency and Q factor mapping by ultrasonic atomic force microscopy. *Appl. Phys. Lett.* 2001;78(13):1939–1941. <https://doi.org/10.1063/1.1357540>
35. Stan G., Cook R.F. Mapping the elastic properties of granular Au films by contact resonance atomic force microscopy. *Nanotechnology.* 2008;19(23):235701. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/19/23/235701>
36. Kopycinska-Müller M., Striegler A., Hürrieh A., Köhler B., Meyendorf N., Klaus-Jürgen W. Elastic properties of nano-thin films by use of atomic force acoustic microscopy. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 2009;1185:II09. <https://doi.org/10.1557/PROC-1185-II09-04>
37. Kopycinska-Müller M., Clausner A., Yeap K., Köhler B. Mechanical characterization of porous nano-thin films by use of atomic force acoustic microscopy. *Ultramicroscopy.* 2016;162:82–90. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2015.12.001>
38. Yamanaka K., Ogiso H., Kolosov O. Ultrasonic force microscopy for nanometer resolution subsurface imaging. *Appl. Phys. Lett.* 1994;64(2):178–180. <https://doi.org/10.1063/1.111524>
39. Kolosov O., Yamanaka K. Nonlinear detection of ultrasonic vibrations in an atomic force microscope. *Jpn. J. Appl. Phys.* 1993;32(8A):L1095–L1098. <https://doi.org/10.1143/JJAP.32.L1095>
40. Huey B.D. AFM and acoustics: fast, quantitative nanomechanical mapping. *Annu. Rev. Mater. Res.* 2007;37(1):351–385. <https://doi.org/10.1146/annurev.matsci.37.052506.084331>
41. Muthaswami L., Zheng Y., Vajtai R., Shehkawat G., Ajayan P., Geer R.E. Variation of radial elasticity in multiwalled carbon nanotubes. *Nano Lett.* 2007;7(12):3891–3894. <https://doi.org/10.1021/nl072002o>

42. Sarioglu A.F., Atalar A., Degertekin F.L. Modeling the effect of subsurface interface defects on contact stiffness for ultrasonic atomic force microscopy. *Appl. Phys. Lett.* 2004;84(26):5368–5370. <https://doi.org/10.1063/1.1764941>
43. Stan G., King S.W., Cook R.F. Elastic modulus of low-*k* dielectric thin films measured by load-dependent contact-resonance atomic force microscopy. *J. Mater. Res.* 2009;24(9):2960–2964. <https://doi.org/10.1557/jmr.2009.0357>
44. Stan G., King S.W., Mays E., Yoo H.J. Nanoscale tomographic reconstruction of the subsurface mechanical properties of low-*k* high-aspect ratio patterns. *Nanotechnology.* 2016;27(48):485706. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/48/485706>
45. Lo M., Dazzi A., Marcott C.A., Dillon E., Hu Q., Kjoller K., Prater C.B., King S.W. Nanoscale chemical-mechanical characterization of nanoelectronic low-*k* dielectric/Cu interconnects. *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 2016;5(4):3018–3024. <https://doi.org/10.1149/2.0041604jss>
46. Clark N., Oikonomou A., Vijayaraghavan A. Ultrafast quantitative nanomechanical mapping of suspended graphene. *Physica Status Solidi (b)*. 2013;250(12):2672–2677. <https://doi.org/10.1002/pssb.201300137>
47. Ovchinnikov I.S., Vishnevskiy A.S., Seregin D.S., Rezmanov A.A., Schneider D., Sigov A.S., Vorotilov K.A., Baklanov M.R. Evaluation of mechanical properties of porous OSG films by PFQNM AFM and benchmarking with traditional instrumentation. *Langmuir.* 2020;36(32):9377–9387. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c01054>
48. Ovchinnikov I.S., Vorotilov K.A., Seregin D.S., Dalskaya Y.G. Detection of hidden defects in low-*k* dielectrics by atomic force microscopy. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019;1327(1):012011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1327/1/012011>
49. Young T.J., Monclus M.A., Burnett T.L., et al. The use of the PeakForce™ quantitative nanomechanical mapping AFM-based method for high-resolution Young's modulus measurement of polymers. *Meas. Sci. Technol.* 2011;22(12):125703. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/22/12/125703>
50. Zhou Y.W., Yang C.K., Sie S.Y., Chiu H.C., Tsay J.S. Variations of the elastic modulus perpendicular to the surface of rubrene bilayer films. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2019;21(9):4939–4946. <https://doi.org/10.1039/c8cp07062h>

Об авторе

Овчинников Иван Сергеевич, аспирант кафедры наноэлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: ivan-ovchinnikov@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-5174-3985>

About the author

Ivan S. Ovchinnikov, Postgraduate Student, Department of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: ivan-ovchinnikov@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-5174-3985>

УДК 537.632

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-49-57>

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Влияние размерных эффектов и распределения гранул по размерам на оптические и магнитооптические свойства нанокompозитов

А.Н. Юрасов ^{1, @},
М.М. Яшин ^{1, 2},
И.В. Гладышев ¹,
Д.В. Семенова ¹,
Е.А. Ганьшина ³,
Е.С. Каназакова ¹

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005 Россия

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: alexey_yurasov@mail.ru

Резюме. В работе экспериментально и теоретически исследуются спектральные зависимости экваториального эффекта Керра (ЭЭК). Получены результаты для неотожженных и отожженных образцов при соответствующем разбросе размера гранул. Выяснено, что термомагнитный отжиг приводит к росту величины ЭЭК в магнитных наноструктурах, при этом наиболее заметные изменения величины эффекта наблюдались в диапазоне средних и больших концентраций магнитной компоненты в видимой области спектра. Показана целесообразность использования приближения эффективной среды для расчета магнитооптических эффектов в гранулированных системах с учетом распределения по размерам гранул в рамках логнормального распределения. На основании данного подхода объяснены основные особенности оптических и магнитооптических свойств нанокompозитов на примере $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}$. Все расчеты выполнены в приближении Бруггеманна, которое эффективно описывает свойства наноструктур в области средних концентраций. Размерные эффекты ярко проявляются в нанокompозитах и оказывают существенное влияние на их оптические и магнитооптические свойства, особенно в ИК области спектра, что связано с внутризонными переходами. Учет распределения частиц по размерам позволяет существенно улучшить описание таких перспективных неоднородных наноструктур. Решенная задача очень важна и актуальна как с фундаментальной точки зрения – исследование магнитооптических, оптических и транспортных явлений в нанокompозитах, так и с точки зрения больших возможностей для применения в современной электронике и нанoeлектронике. Учет размерных эффектов и разброса по размерам частиц позволяет находить новые перспективные функциональные материалы, управлять их свойствами в широком спектральном диапазоне.

Ключевые слова: магнитные нанокompозиты, экваториальный эффект Керра, методы эффективной среды, размерный эффект, логнормальное распределение

• Поступила: 23.12.2020 • Доработана: 25.03.2021 • Принята к опубликованию: 01.04.2021

Для цитирования: Юрасов А.Н., Яшин М.М., Гладышев И.В., Семенова Д.В., Ганьшина Е.А., Каназакова Е.С. Влияние размерных эффектов и распределения гранул по размерам на оптические и магнитооптические свойства нанокompозитов. *Российский технологический журнал*. 2021;9(3):49–57. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-49-57>

Прозрачность финансовой деятельности: Никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Influence of size effects and granule distribution by size on optical and magneto-optical properties of nanocomposites

Alexey N. Yurasov ^{1,@},
Maxim M. Yashin ^{1,2},
Igor V. Gladyshev ¹,
Darya V. Semyonova ¹,
Elena A. Gan'shina ³,
Ekaterina S. Kanazakova ¹

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005 Russia

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

@ Corresponding author, e-mail: alexey_yurasov@mail.ru

Abstract. In this paper, the spectral dependences of the transverse Kerr effect (TKE) are studied experimentally and theoretically. The results are obtained for deposited and annealed samples with a corresponding variation in the size of the granules. It was found that thermomagnetic annealing leads to an increase in the TKE value in magnetic nanostructures, while the most noticeable changes in the effect value were observed in the range of medium and high concentrations of the magnetic component in the visible region of the spectrum. The expediency of using the effective medium approach for calculating magneto-optical effects in granular systems, taking into account the size distribution of granules within the lognormal distribution of granules, is shown. Based on this approach, the main features of the optical and magneto-optical properties of nanocomposites are explained by the example of $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})\text{X}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-X}$. All calculations are performed in the Bruggemann approximation, which effectively describes the properties of nanostructures in the region of average concentrations. Size effects are clearly manifested in nanocomposites and have a significant impact on the optical and magneto-optical properties of nanocomposites, especially in the IR region of the spectrum, which is associated with intraband transitions. Taking into account the particle size distribution makes it possible to significantly improve the description of such promising inhomogeneous nanostructures. The solved problem is very important and relevant both from the fundamental point of view – the study of magneto-optical, optical and transport phenomena in nanocomposites – and from the point of view of the great possibilities of their application in modern electronics and nanoelectronics. Taking into account the size effects and the particle size dispersion makes it possible to find new promising functional materials and control their properties in a wide spectral range.

Keywords: magnetic nanocomposites, transverse Kerr effect, effective medium approach, size effect, lognormal distribution

• Submitted: 23.12.2020 • Revised: 25.03.2021 • Accepted: 01.04.2021

For citation: Yurasov A.N., Yashin M.M., Gladyshev I.V., Semyonova D.V., Gan'shina E.A., Kanazakova E.S. Influence of size effects and granule distribution by size on optical and magneto-optical properties of nanocomposites. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(3):49–57 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-49-57>

Financial disclosure: No author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Композитные материалы, состоящие из наноразмерных магнитных частиц, помещенных в диэлектрическую матрицу, представляют значительный интерес как для фундаментальной физики, так и для широкого спектра применений от нанотехнологий до космоса и медицины. Большое внимание, уделяемое в последнее время нанокompозитам, обусловлено следующими обнаруженными в этих материалах эффектами: туннельное магнитосопротивление, гигантский аномальный эффект Холла (АЭХ), сильный оптический и магнитооптический отклик [1–3]. Нанокompозитные материалы также обладают ярко выраженными нелинейными электрическими, оптическими и магнитооптическими свойствами [3]. Данные свойства существенным образом зависят от структуры сплава и микроструктуры, особенно от содержания металлических частиц, их размеров, расположения и т.п. Актуальность предлагаемого исследования обусловлена важностью изучения магнитооптических эффектов, дающих возможность исследовать структуру совершенно различных магнитных материалов, и, в дальнейшем, позволяющих искать новые материалы с выбранными параметрами, что может иметь широкое применение в электронике и особенно при решении современных задач нанoeлектроники. Также важно отметить, что в настоящее время опубликовано достаточное количество работ [см., например, 1, 2–5 и ссылки в этих работах], посвященных размерным эффектам, но в них не учитывалось влияния распределения по размерам гранул в нанокompозитах на оптические и магнитооптические спектры. Решение этой задачи – одна из основных целей данной работы.

ОБРАЗЦЫ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Исследуемые образцы – пленки ферромагнитного сплава $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$ и оксида алюминия на кремниевых подложках – были получены методом ионно-лучевого напыления. Рост нанокompозита $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}$ осуществлялся в среде аргона. Электронно-микроскопические структурные исследования полученных пленок показали, что композит $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}$ в плоскости подложки

представляет собой металлические гранулы, хаотически распределенные в диэлектрической матрице [1].

В эксперименте измерялся экваториальный эффект Керра (ЭЭК, на графиках ТКЕ) для нанокompозитов с различными атомными концентрациями магнитной компоненты (рис. 1 и 2) (подробности даны в [2]) в зависимости от энергии E падающей электромагнитной волны.

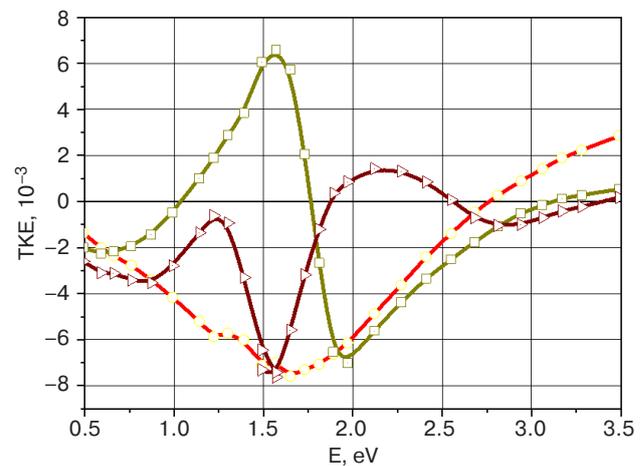


Рис. 1. Экспериментальные спектры ЭЭК $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}$ (неотожженный); атомные концентрации: 0.228 – круги, 0.462 – квадраты, 0.616 – треугольники

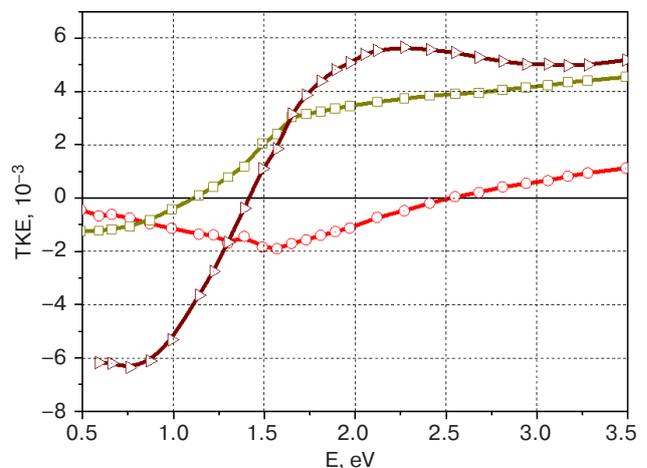


Рис. 2. Экспериментальные спектры ЭЭК $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}$ (отожженный); атомные концентрации: 0.234 – круги, 0.469 – квадраты, 0.621 – треугольники

Полученные экспериментальные спектры отличаются и от спектра металлического сплава $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$ и от систем $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{SiO}_2)_{1-x}$ и $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{1-x}$, исследованных ранее в работе [3], как по величине, так и по виду, особенно в ближней ИК области. Очевидно, что изменения внутренней микроструктуры сплава отражаются также и в спектральных зависимостях. На рис. 1 и 2 отличия спектров связаны с изменением магнитной структуры пленок после термомагнитной обработки [4]. Для отожженных образцов заметно усиление магнитооптического отклика для всего диапазона концентраций. Отметим, что для области с малыми концентрациями (0.228 и 0.234) влияние термомагнитного отжига не так существенно, как для области с большими концентрациями магнитной компоненты. Усиление эффекта, особенно в видимой области спектра, для малых концентраций отожженных образцов относительно неотожженных, в первую очередь, может быть вызвано ростом размера гранул.

РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

При описании спектральных зависимостей наноструктур хорошо работает теория эффективной среды. Разработке данных методов посвящено значительное количество работ (см, например, [5–10]). Отметим сразу, что во всех экспериментальных исследованиях приведена атомная концентрация X_a , а для расчетов удобно перейти к объемной концентрации X металлической (ферромагнитной) компоненты. Таблица 1 для перевода приведена ниже.

Таблица 1. Соответствие атомной и объемной концентрации нанокompозита $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}$

Неотожженные образцы		Отожженные образцы	
X_a	X	X_a	X
0.185	0.0624	0.177	0.0594
0.234	0.0823	0.228	0.0798
0.287	0.1056	0.28	0.1024
0.343	0.1328	0.336	0.1293
0.385	0.1552	0.378	0.1513
0.399	0.1630	0.392	0.1591
0.413	0.1711	0.406	0.1671
0.469	0.2058	0.462	0.2013
0.524	0.2442	0.504	0.2297
0.562	0.2735	0.556	0.2687
0.621	0.3247	0.616	0.3201

Наиболее интересен случай средних концентраций вблизи перколяционного перехода, поэтому можно описывать оптические и магнитооптические

свойства нанокompозитов в приближении Бруггеманна [1, 5]. Нанокompозит заменяется средой с эффективными свойствами.

Рассмотрим вклад размерных эффектов в спектры нанокompозитов. Учитывая [1], отметим, что размеры металлических гранул r связаны с временем свободного пробега электронов в грануле (τ_{part}) и в массивном образце (τ_{bulk}) (v_f – скорость Ферми). Оценим величину r :

$$r = \frac{v_f \tau_{\text{bulk}} \tau_{\text{part}}}{\tau_{\text{bulk}} - \tau_{\text{part}}} \quad (1)$$

Эффект будет заметным, если величина r имеет порядок, равный нескольким нанометрам. В этом случае можно рассматривать квазиклассический размерный эффект и для диагональных компонент тензора диэлектрической проницаемости (ТДП) металлической компоненты (оптические свойства) с учетом размерного эффекта запишем [10]:

$$\epsilon_{\text{mod}} = \epsilon + \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i/\tau_{\text{bulk}})} - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i/\tau_{\text{part}})} \quad (2)$$

где ϵ – диагональная компонента тензора ТДП металлической компоненты без учета размерного эффекта; ω – частота электромагнитного излучения; ω_p – плазменная частота, а недиагональная компонента ТДП металлической компоненты с учетом размерного эффекта (магнитооптические свойства) будет иметь вид:

$$\gamma_{\text{mod}} = \gamma + \frac{4\pi\sigma_{xy}^{\text{bulk}}(0)/\tau_{\text{bulk}}^2}{\omega(\omega + i/\tau_{\text{bulk}})^2} - \frac{4\pi\sigma_{xy}^{\text{gr}}(0)/\tau_{\text{part}}^2}{\omega(\omega + i/\tau_{\text{part}})^2} \quad (3)$$

где γ – недиагональная компонента тензора ТДП металлической компоненты металла без учета размерного эффекта; $\sigma_{xy}^{\text{bulk}} = 4\pi M_s R_{\text{bulk}} / \rho_{\text{bulk}}^{\text{gr}}$, $\sigma_{xy}^{\text{gr}} = 4\pi M_s R_{\text{gr}} / \rho_{\text{gr}}^2$ – проводимость массивного образца и гранулы соответственно; M_s – намагниченность насыщения; R_{gr} – коэффициент аномального эффекта Холла (АЭХ); R_{bulk} – коэффициент аномального эффекта Холла массивного образца металла; ρ_{gr} – удельное сопротивление гранулы, $\rho_{\text{gr}} = \rho_{\text{bulk}}(1 + l/r)$ и:

$$R_{\text{gr}} = R_{\text{bulk}} + 0.2R_s \frac{l}{r} \left(1 + \frac{l}{r}\right) \quad (4)$$

где l – длина свободного пробега электронов в металле; R_s – вклад рассеяния электронов в АЭХ.

Формулы приближения эффективной среды Бруггемана, из которых находятся диагональные и недиагональные компоненты тензора диэлектрической проницаемости эффективной среды $\epsilon = \epsilon^{\text{EMA}}$, $\gamma = \gamma^{\text{EMA}}$, имеют вид [1, 4]:

$$X \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon^{\text{EMA}})}{\varepsilon^{\text{EMA}} + (\varepsilon_1 - \varepsilon^{\text{EMA}})L} + (1-X) \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon^{\text{EMA}})}{\varepsilon^{\text{EMA}} + (\varepsilon_0 - \varepsilon^{\text{EMA}})L} = 0, \quad (6)$$

$$X \frac{(\gamma^{\text{EMA}} - \gamma)}{[\varepsilon^{\text{EMA}} + (\varepsilon_1 - \varepsilon^{\text{EMA}})L]^2} + (1-X) \frac{\gamma^{\text{EMA}}}{[\varepsilon^{\text{EMA}} + (\varepsilon_0 - \varepsilon^{\text{EMA}})L]^2} = 0. \quad (7)$$

В формулах (6), (7) L – форм-фактор частиц среды (мера эллиптичности) и с учетом размерного эффекта $\varepsilon_1 = \varepsilon_{\text{mod}}$; $\gamma = \gamma_{\text{mod}}$.

Важной задачей является учет распределения гранул по размерам, что не рассматривалось раньше. Очень часто (см., например, [12]) в нанокомпозитах распределение по размерам частиц является логнормальным:

$$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma r} e^{-\frac{(\ln r - \bar{r})^2}{2\sigma^2}}, \quad (8)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение логнормального распределения; $\bar{r} = \ln(\langle r \rangle) - (\sigma^2 / 2)$, где $\langle r \rangle$ – математическое ожидание, соответствующее оптимальному среднему размеру гранул.

Распределение частиц по размерам в наших расчетах аппроксимировалось логнормальным распределением с параметрами $\langle r \rangle = 1.9$ нм, $\sigma = 0.21$.

Важно отметить, что в формулах Бруггеманна (6), (7) можно учесть усреднение диагональных компонент ТДП металлической компоненты с функцией распределения $\int_0^\infty f(r) \varepsilon_{\text{mod}} dr = \varepsilon_1$ и можно увидеть, что необходимо учесть распределение по размерам только для 3-го слагаемого в формуле (2):

$$\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} f(r) \varepsilon_{\text{part}} dr = \frac{w_p^2}{w} \left[w \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{f(r) dr}{w^2 + \left(\frac{1}{\tau_{\text{bulk}}} + \frac{v_f}{r} \right)^2} - i \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{\left(\frac{1}{\tau_{\text{bulk}}} + \frac{v_f}{r} \right) f(r) dr}{w^2 + \left(\frac{1}{\tau_{\text{bulk}}} + \frac{v_f}{r} \right)^2} \right].$$

Аналогично учитываем усреднение недиагональных компонент ТДП металлической компоненты с функцией распределения $\gamma = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \gamma(r) f(r) dr$.

Подставим полученные результаты в формулу для нахождения ЭЭЖ на p -компоненте:

$$\delta_P = (A\gamma_1 + B\gamma_2) \frac{2 \sin 2\varphi}{A^2 + B^2}, \quad (8)$$

где $A = \varepsilon_2(2\varepsilon_1 \cos^2 \varphi - 1)$; $B = \cos^2 \varphi(\varepsilon_2^2 - \varepsilon_1^2 + 1) + \varepsilon_1 - 1$; φ – угол падения света (в нашем случае -70°); $\varepsilon^{\text{EMA}} = \varepsilon_1 - i\varepsilon_2$; $\gamma^{\text{EMA}} = \gamma_1 - i\gamma_2$.

Данный подход является универсальным для любых наноструктур и позволяет моделировать оптические и магнитооптические спектры в рамках теории эффективной среды.

В ходе моделирования проанализируем изменение величины ЭЭЖ с учетом влияния распределения частиц по размерам при варьируемых значениях форм-фактора частиц L и коэффициента АЭХ R_s/R_{bulk} . Для подробного изучения спектральных зависимостей был выбран неотожженный образец со значением объемной концентрации $X = 0.3247$ и отожженный образец со значением объемной концентрации $X = 0.3201$.

На рис. 3 представлены теоретические спектры исследуемого неотожженного образца, рассчитанные по формуле (8), при различных значениях фактора формы L частиц с учетом размерного эффекта. Заметим, что изменение параметра L не приводит к значительному изменению формы спектра, а также его абсолютного значения.

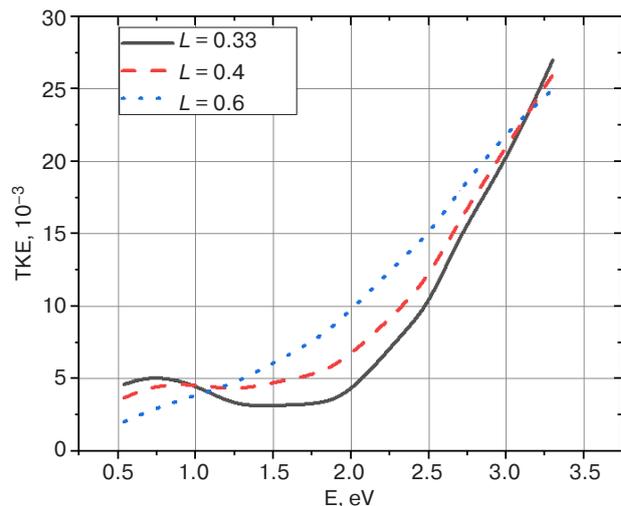


Рис. 3. Теоретические спектры ЭЭЖ для неотожженного нанокompозита $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}$ с $X = 0.3247$ при различных значениях форм-фактора L

На рис. 4 представлены теоретические спектры исследуемого отожженного образца, рассчитанные

по формуле (8), при различных значениях коэффициента АЭХ R_s/R_{bulk} с учетом размерного эффекта. При уменьшении значений коэффициента АЭХ заметен аномальный вид кривых, а при увеличении значений спектры по форме становятся стандартными для магнитооптического отклика нанокompозитов.

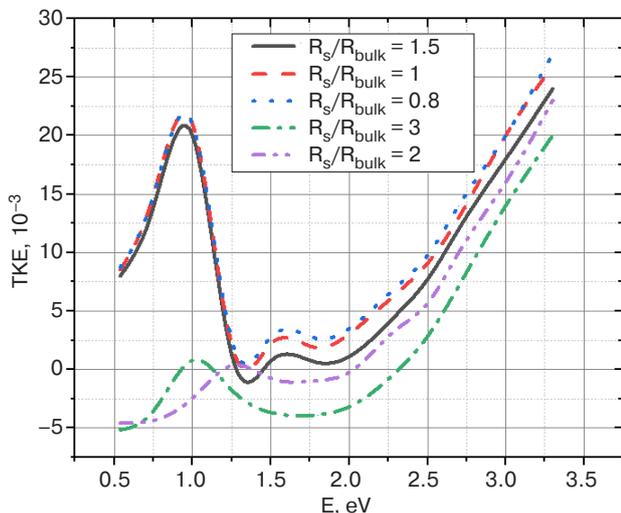


Рис. 4. Теоретические спектры ЭК для отожженного нанокompозита $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{1-x}$ с $X = 0.3201$ при различных значениях коэффициента АЭХ R_s/R_{bulk}

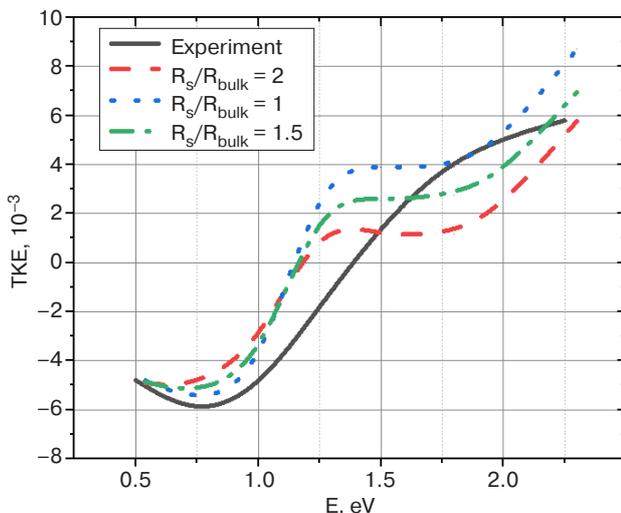


Рис. 5. Спектры ЭК для неотожженного нанокompозита $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{1-x}$ с $X = 0.3247$ (сплошная линия – экспериментальная зависимость; штриховая, пунктирная и штрих-пунктирная линии – теоретические спектры для различных значений коэффициента АЭХ R_s/R_{bulk})

Сравнивая расчетные спектры нанокompозитов с экспериментальными для неотожженного образца ($X = 0.3247$) на рисунке рис. 5 и отожженного образца ($X = 0.3201$) на рис. 6, можно видеть, что значение параметра размерного эффекта R_s/R_{bulk} лежит в диапазоне от 1.5 до 3 (в зависимости от микроструктуры нанокompозита), при этом частицы сферические ($L = 0.33$), что хорошо согласуется с экспериментом.

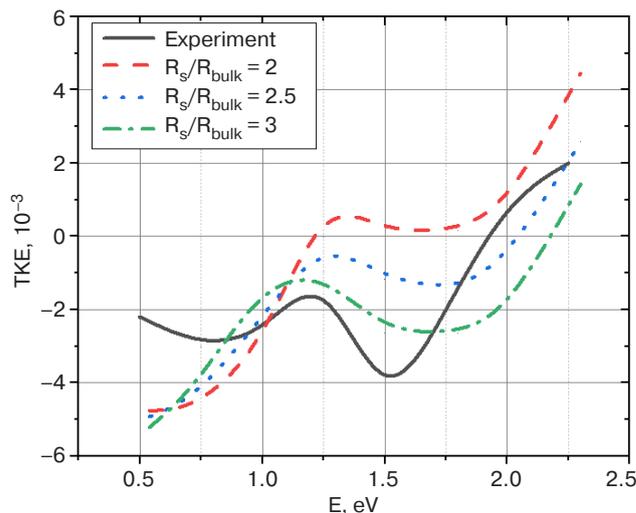


Рис. 6. Спектры ЭК для отожженного нанокompозита $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{1-x}$ с $X = 0.3201$ (сплошная линия – экспериментальная зависимость; штриховая, пунктирная и штрих-пунктирная линии – теоретические спектры для различных значений коэффициента АЭХ R_s/R_{bulk})

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье проведено теоретическое и экспериментальное исследование нанокompозитов. Основным результатом работы можно считать учет распределения по размерам гранул в рамках логнормального распределения как в оптических, так и в магнитооптических спектрах нанокompозитов, что позволило улучшить описание экспериментальных спектров на примере нанокompозита $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{1-x}$. В рамках теории эффективной среды с учетом распределения по размерам гранул подобраны оптимальные параметры, такие как форм-фактор $L = 0.33$ и соответствующий сферическим частицам размер гранул $r = 1.9$ нм, а также отношение коэффициента АЭХ $R_s/R_{bulk} = 3$, которые позволяют хорошо по порядку величины описать экспериментальные спектры. Важно отметить, что используемый подход можно применять для любых наноструктур.

В ходе моделирования при описании спектров ЭК мы учли усреднение компонент ТДП металлической компоненты с функцией распределения, что позволило достаточно хорошо описать экспериментальные данные. Решенная задача очень важна и актуальна как с фундаментальной – исследование магнитооптических, оптических и транспортных явлений в нанокompозитах, так и с точки зрения возможных применений в современной электронике и нанoeлектронике. Учет размерных эффектов и разброса по размерам частиц позволяет находить новые перспективные функциональные материалы, управлять их свойствами в широком спектральном диапазоне и использовать их в самых разных сферах человеческой деятельности [13–15].

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы «НИЧ-Гетероструктура».

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Niklasson G.A., Granqvist C.G. Optical properties and solar selectivity of coevaporated Co-Al₂O₃ composite films. *J. Appl. Phys.* 1984;55(9):3382–3410. <https://doi.org/10.1063/1.333386>
2. Гусев А.И. *Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии*. М.: Физматлит; 2009. 416 с. ISBN 978-5-9221-0582-8
3. Ганьшина Е.А., Вашук М.В., Виноградов А.Н. и др. Эволюция оптических и магнитооптических свойств нанокompозитов аморфный метал-диэлектрик. *ЖЭТФ*. 2004;125(5):1172–1182.
4. Юрасов А.Н., Семенова Д.В. Особенности экваториального эффекта Керра в отожженных и неотожженных нанокompозитах (CoFeZr)_x(Al₂O₃)_(1-x). В сб.: «*Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике*»: сб. докладов конференции. М.: РТУ МИРЭА; 2019. Т. 1. С. 51–58.
5. Юрасов А.Н., Яшин М.М. Теория эффективной среды как инструмент анализа оптических свойств нанокompозитов. *Российский технологический журнал*. 2018;6(2):56–66. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-2-56-66>
6. Ландау Л., Лифшиц Е. *Теоретическая физика*. Т. 8. *Электродинамика сплошных сред*. М.: Физматлит; 2017. 661 с. ISBN 978-5-9221-1702-9
7. Granovsky A., Kuzmichev M., Clerc J.P. The symmetrised Maxwell-Garnett approximation for magneto-optical spectra of ferromagnetic composites. *J. Magn. Soc. Japan*. 1999;23(1–2):382–386. <https://doi.org/10.3379/jmsjmag.23.382>
8. Яшин М.М., Мирзокулов Х.Б. Симметризованное приближение Максвелла – Гарнетта как эффективный метод исследования нанокompозитов. *Российский технологический журнал*. 2019;7(4):92–100. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-92-100>
9. Ханикаев А., Грановский А., Клерк Ж.П. Влияние распределения гранул по размерам и притяжения между гранулами на порог перколяции в гранулированных сплавах. *Физика твердого тела*. 2002;44(9):1537–1540.
10. Yashin M.M., Yurasov A.N., Ganshina E.A., et al. Simulation of the spectra of the transverse Kerr effect of magnetic nanocomposites CoFeZr–Al₂O₃. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*. 2019;5(86):63–72. <http://dx.doi.org/10.18698/1812-3368-2019-5-63-72>
11. Фадеев Е., Блинов М., Гаршин В., Тарасова О., Ганьшина Е., Прудникова М., Прудников В., Lahderanta E., Рыльков В., Грановский А. Магнитные свойства нанокompозитов (Co₄₀Fe₄₀B₂₀)_x(SiO₂)_{100-x} вблизи порога перколяции. *Изв. АН СССР. Серия физич.* 2019;83(7):917–920. <https://doi.org/10.1134/S0367676519070159>

REFERENCES

1. Niklasson G.A., Granqvist C.G. Optical properties and solar selectivity of coevaporated Co-Al₂O₃ composite films. *J. Appl. Phys.* 1984;55(9):3382–3410. <https://doi.org/10.1063/1.333386>
2. Gusev A.I. *Nanomaterialy, nanostrukturny, nanotekhnologii (Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies)*. Moscow: Fizmatlit; 2009. 416 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9221-0582-8
3. Gan'shina E.A., Vashuk M.V., Vinogradov A.N., et al. Evolution of optical and magneto-optical properties of amorphous metal-dielectric nanocomposites. *J. Exp. Theor. Phys.* 2004;98(5):1027–1036. <https://doi.org/10.1134/1.1767571> [Gan'shina E.A., Vashuk M.V., Vinogradov A.N. i dr. Evolyutsiya opticheskikh i magnitoopticheskikh svoystv nanokompозитov amorfny metal-dielektrik. *ZhETF = J. Exp. Theor. Phys.* 2004;125(5):1172–1182 (in Russ.).]
4. Yurasov A.N., Semenova D.V. Features of the equatorial Kerr effect in annealed and non-annealed nanocomposites (CoFeZr)_x(Al₂O₃)_(1-x). In: *Konferentsiya «Informatika i tekhnologii. Innovatsionnye tekhnologii v promyshlennosti i informatike» (Proc. of reports of the conference «Informatics and Technologies. Innovative technologies in industry and Informatics»)*. Moscow: RTU MIREA; 2019. V. 1, p. 51–58 (in Russ.).
5. Yurasov A.N., Yashin M.M. The effective medium theory as a tool for analyzing the optical properties of nanocomposites. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2018;6(2):56–66 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-2-56-66>
6. Landau L., Lifshits E. *Teoreticheskaya fizika*. T. 8. *Elektrodinamika sploshnykh sred (Theoretical Physics. V. 8. Electrodynamics of continuous media)*. Moscow: Fizmatlit; 2017. 661 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9221-1702-9
7. Granovsky A., Kuzmichev M., Clerc J.P. The symmetrised Maxwell-Garnett approximation for magneto-optical spectra of ferromagnetic composites. *J. Magn. Soc. Japan*. 1999;23(1–2):382–386. <https://doi.org/10.3379/jmsjmag.23.382>
8. Yashin M.M., Mirzokulov H.B. Symmetrized Maxwell-Garnett approximation as an effective method for studying nanocomposites. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2019;7(4):92–100 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-92-100>
9. Khanikaev A.B., Granovskii A.B., Clerc J.P. Influence of the size distribution granules and their attractive interaction on the percolation threshold in granulated alloys. *Phys. Solid State*. 2002;44(9):1611–1613. [Khanikaev A., Granovskii A., Klerk Zh.P. Vliyanie raspredeleniya granul po razmeram i prityazheniya mezhdu granulami na porog perkolyatsii v granulirovannykh splavakh. *Fizika tverdogo tela = Phys. Solid State*. 2002;44(9):1537–1540 (in Russ.).]

12. Домашевская Э.П., Ивков С.А., Ситников А.В., Стогней О.В., Козаков А.Т., Никольский А.В. Влияние относительного содержания металлической компоненты в диэлектрической матрице на образование и размеры нанокристаллов кобальта в пленочных композитах $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$. *Физика твердого тела*. 2019;61(2):211–219. <https://doi.org/10.21883/FTT.2019.02.47115.211>
13. Lima E., Tanaka T., Toyoda I. A novel low phase noise push-push oscillator employing dual-feedback sub-oscillators. *Progress In Electromagnetics Research M*. 2018;75:141–148. <http://dx.doi.org/10.2528/PIERM18080701>
14. Ткачева В.Р. Нанокompозиты – будущее машиностроения. *Техника. Технологии. Инженерия*. 2016;1:37–40.
15. Медведева Н.В., Ипатова О.М., Иванов Ю.Д., Дрожжин А.И., Арчаков А.И. Нанобиотехнология и наномедицина. *Биомедицинская химия*. 2006;52(6):529–546.
10. Yashin M.M., Yurasov A.N., Ganshina E.A., et al. Simulation of the spectra of the transverse Kerr effect of magnetic nanocomposites $\text{CoFeZr-Al}_2\text{O}_3$. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*. 2019;5(86):63–72. <http://dx.doi.org/10.18698/1812-3368-2019-5-63-72>
11. Fadeev E., Blinov M., Garshin V., Tarasova O., Ganshina E., Prudnikova M., Prudnikov V., Lahderanta E., Rylkov V., Granovskii A. Magnetic properties of $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ nanocomposites near the percolation threshold. *Bull. RAS: Physics*. 2019;83(7):835–837. <https://doi.org/10.3103/S1062873819070153>
[Fadeev E., Blinov M., Garshin V., Tarasova O., Ganshina E., Prudnikova M., Prudnikov V., Lahderanta E., Ryl'kov V., Granovskii A. Magnitnye svoistva nanokompозитov $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ v blizi poroga perkolyatsii. *Izv. AN SSSR. Seriya fizich. = Bull. RAS: Physics*. 2019;83(7):917–920 (in Russ.)]
12. Domashevskaya E. P., Ivkov S. A., Sitnikov A. V., Stognei O. V., Kozakov A. T., Nikolskii A. V. The Influence of relative content of a metal component in a dielectric matrix on the formation and dimensions of cobalt nanocrystals in $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ film composites. *Phys. Solid State*. 2019;61(2):71–79. <https://doi.org/10.1134/S1063783419020112>
[Domashevskaya E.P., Ivkov S.A., Sitnikov A.V., Stognei O.V., Kozakov A.T., Nikol'skii A.V. Vliyanie otноситel'nogo soderzhaniya metallicheskoj komponenty v dielektricheskoj matritse na obrazovanie i razmery nanokristallov kopal'ta v plenochnykh kompozitakh $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$. *Fizika tverdogo tela = Phys. Solid State*. 2019;61(2):211–219 (in Russ.)]
13. Lima E., Tanaka T., Toyoda I. A novel low phase noise push-push oscillator employing dual-feedback sub-oscillators. *Progress In Electromagnetics Research M*. 2018;75:141–148. <http://dx.doi.org/10.2528/PIERM18080701>
14. Tkacheva V.R. Nanocomposites – the future of machine building. *Tekhnika. Tekhnologii. Inzheneriya = Technique. Technologies. Engineering*. 2016;(1):37–40 (in Russ.)
15. Medvedeva N.V., Ipatova O.M., Ivanov Yu.D., Drozhzhin A.I., Archakov A.I. Nanobiotechnology and nanomedicine. *Biochem. Moscow Suppl. Ser. B: Biomed. Chem*. 2007;1:114–124. <https://doi.org/10.1134/S1990750807020023>
[Medvedeva N.V., Ipatova O.M., Ivanov Yu.D., Drozhzhin A.I., Archakov A.I. Nanobiotekhnologiya i nanomeditsina. *Biomeditsinskaya khimiya = Biochem. Moscow Suppl. Ser. B: Biomed. Chem*. 2006;52(6):529–546 (in Russ.)]

Об авторах

Юрасов Алексей Николаевич, д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры наноэлектроники, заместитель директора Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: alexey_yurasov@mail.ru. ResearcherID: M-3113-2016, Scopus Author ID: 6602974416.

Яшин Максим Михайлович, старший преподаватель кафедры наноэлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78); ассистент кафедры «Физика» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (105005, Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5). E-mail: ihkamax@mail.ru. ResearcherID: G-6809-2017, Scopus Author ID: 57191628251, 57210607470, <https://orcid.org/0000-0001-8022-9355>

Гладышев Игорь Васильевич, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры наноэлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: i_gladyshev@mirea.ru. ResearcherID: N-1535-2016, Scopus Author ID: 6701612553, <https://orcid.org/0000-0002-7627-4978>

Семенова Дарья Владимировна, магистр кафедры наноэлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: semenovadar.ya@mail.ru. Scopus Author ID: 57212546857.

Ганьшина Елена Александровна, д.ф.-м.н., профессор кафедры магнетизма физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, ГСП-1). E-mail: eagan@mail.ru. ResearcherID: Y-9188-2018, Scopus Author ID: 55664489100, <https://orcid.org/0000-0002-6709-158X>

Каназаква Екатерина Сергеевна, бакалавр кафедры наноэлектроники, Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454 Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kanazakova@mail.ru.

About the authors

Alexey N. Yurasov, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Department of Nanoelectronics, Deputy Director of the Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: alexey_yurasov@mail.ru. ResearcherID: M-3113-2016, Scopus Author ID: 6602974416.

Maxim M. Yashin, Senior teacher, Department of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia); Assistant Lecturer, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University (5, str. 1, 2-ya Baumanskaya ul., Moscow, 105005 Russia). E-mail: ihkamax@mail.ru. ResearcherID: G-6809-2017, Scopus Author ID: 57191628251, 57210607470, <https://orcid.org/0000-0001-8022-9355>

Igor V. Gladyshev, Cand. Sci. (Phys.–Math.), Associate Professor, Department of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: i_gladyshev@mirea.ru. ResearcherID: N-1535-2016, Scopus Author ID: 6701612553, <https://orcid.org/0000-0002-7627-4978>

Darya V. Semyonova, Student, Department of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: semenovadar.ya@mail.ru. Scopus Author ID: 57212546857.

Elena A. Gan'shina, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Department of Magnetism, Faculty of Physics Lomonosov Moscow State University (GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991 Russia). E-mail: eagan@mail.ru. ResearcherID: Y-9188-2018, Scopus Author ID: 55664489100, <https://orcid.org/0000-0002-6709-158X>

Ekaterina S. Kanazakova, Student, Department of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kanazakova@mail.ru.

УДК 004.94

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-58-65>

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Методика точечной визуализации напряженности электрического поля в пространстве и времени

З.М. Курбанисмаилов,
А.Т. Тарланов[@],
Э.М. Акимов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: lev.brave@gmail.com

Резюме. Тестирование электронных устройств является неотъемлемой частью технологического процесса любого производителя такой техники. Под электронным устройством в данном случае понимается энергоемкая единица такая, как мобильный телефон, центр обработки данных или космический аппарат. Одним из ключевых этапов тестирования является выявление влияния электрических полей на различные электронные компоненты устройства. Данный этап зачастую требует изготовления макета некоторой части незаконченного устройства с целью фиксации помех специальным оборудованием. Это требует временных, финансовых и человеко-ресурсных расходов. С целью уменьшения данных издержек в настоящее время становится популярным использование средств математического моделирования для задач проверки помехоустойчивости и электромагнитной совместимости. В работе предложено использовать легко встраиваемый в приложения алгоритм визуализации электрических полей в трехмерном пространстве и времени, как компонент системы математического моделирования. В работе рассмотрены три способа визуализации напряженности электрического поля: начиная от простого задания точек в пространстве, на основе которых будет строиться электрическое поле вокруг источника излучения электрического поля, заканчивая применением алгоритмов, позволяющих расставить точки равноудаленно, исходя из заданного их количества в пространстве для формирования электрического поля. Проанализирована производительность и визуальная составляющая этих способов. Предложенная в работе методика будет полезна сообществу разработчиков, как встраиваемое решение по точечной визуализации электрического поля в любой проект на любом алгоритмическом языке с возможностью анимации во времени.

Ключевые слова: электрическое поле, напряженность, визуализация, моделирование, компьютерная графика, анимация

• Поступила: 25.05.2020 • Доработана: 25.08.2020 • Принята к опубликованию: 09.03.2021

Для цитирования: Курбанисмаилов З.М., Тарланов А.Т., Акимов Э.М. Методика точечной визуализации напряженности электрического поля в пространстве и времени. *Российский технологический журнал*. 2021;9(3):58–65. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-58-65>

Прозрачность финансовой деятельности: Никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

The technique of point visualization of the electric field in space and time

Zaur M. Kurbanismailov,
Arslan T. Tarlanov[@],
Emil M. Akimov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: lev.brave@gmail.com

Abstract. Testing of electronic devices is an integral part of the technological process of any manufacturer of such equipment. In this case, an electronic device is understood as an energy-intensive unit such as a mobile phone, data center or spacecraft. One of the key stages of testing is to identify the effect of electric fields on various electronic components of the device. This stage often requires making a mock-up of some part of an unfinished device in order to fix interference with special equipment. This requires time, financial and human resource costs. In order to reduce these costs in the modern world, the use of mathematical modeling tools for testing noise immunity and electromagnetic compatibility is becoming popular. In this paper, it is proposed to use an algorithm for visualizing electric fields in three-dimensional space and time. The algorithm is easily embedded into applications as a component of a mathematical modeling system. The work considered three ways of visualizing the electric field strength: starting from a simple setting of points in space, on the basis of which the electric field will be built, around the source of electric field radiation, to the use of algorithms that make it possible to arrange points equidistantly based on a given number of points in space for the formation of an electric field. The performance and visual implications of these methods were analyzed. The proposed methodology will be useful to the developer community as an embedded solution for point visualization of the electric field in any project in any algorithmic language with the ability to animate in time.

Keywords: electric field, intensity, visualization, modeling, computer graphics, animation

• Submitted: 25.05.2020 • Revised: 25.08.2020 • Accepted: 09.03.2021

For citation: Kurbanismailov Z.M., Tarlanov A.T., Akimov E.M. The technique of point visualization of the electric field in space and time. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(3):58–65 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-58-65>

Financial disclosure: No author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня темпы производства электронных устройств весьма велики. Это объясняется большим спросом на товары разных электронных категорий и огромным количеством заводов-производителей. Люди нуждаются в бытовых и иных электронных устройствах, потому что их использование предоставляет больше свободного времени, возможность коммуникаций, однако мало кто задумывается о том, какие этапы проходит электронное устройство до того, как появится на прилавках магазинов.

В разных странах применяются разные подходы к производству, однако в любом из них используется многоэтапное тестирование устройства,

позволяющее выявить недочеты, связанные с реализованными техническими или софтверными решениями. Как правило, эти этапы требуют изготовления некоторого необходимого для тестирования количества деталей, что влечет за собой дополнительные финансовые и временные затраты.

Электроника – это комплекс сложных технологий и устройств, требующих внимательного отношения к их проектированию [1]. От качества компоновки электронных элементов в устройстве зависит то, насколько быстро компании приступят к производству. Игнорирование этого этапа может обойтись проекту в несколько раз дороже.

Методика, описанная в данной работе, позволяет сократить финансовые, человеко-ресурсные и временные

заграты компаний, минуя некоторые этапы тестирования за счет компьютерного моделирования электрических полей в пространстве и во времени [2]. Обладая простой реализацией, хорошей производительностью и точностью представления информации, данная методика может быть привлекательной для компаний, ориентированных на производство электронных устройств.

СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЗИЦИЙ РАСЧЕТНЫХ ТОЧЕК

Для точечной визуализации напряженности электрического поля в пространстве и во времени необходимо сначала определить позицию точек расчета. Точками расчета (желтые точки на рис. 1) мы будем называть точки в пространстве, для которых рассчитаны значения напряженности электрического поля, излучаемого электронным устройством [3]. Существует несколько способов определения позиций точек.

Первый способ – задать точки вручную [4, 5]. Данный способ является не всегда удобным, так как требует больших человеко-ресурсных и временных затрат.



Рис. 1. Способ задания точек вручную

Сложность инстанциации точек расчета [6] в данном случае можно вычислить по формуле:

$$O = C \cdot P, \quad (1)$$

где C – количество заданных вручную позиций точек; P – количество операций, необходимое для создания точки.

Второй способ (рис. 2) – высчитать точки, равноудаленные по направлению нормалей плоскостей трехмерной модели электронного устройства [7]. Это реализуется с помощью специального алгоритма, учитывающего позицию и нормали вершин и плоскостей трехмерной модели, однако данный способ, как правило, требует намного больше вычислительной производительности, и к тому же алгоритм не способен одинаково хорошо обрабатывать модели с множеством мелких деталей и крупногабаритные модели, потому что в некоторых случаях между точками остаются большие объемы неучтенного пространства.

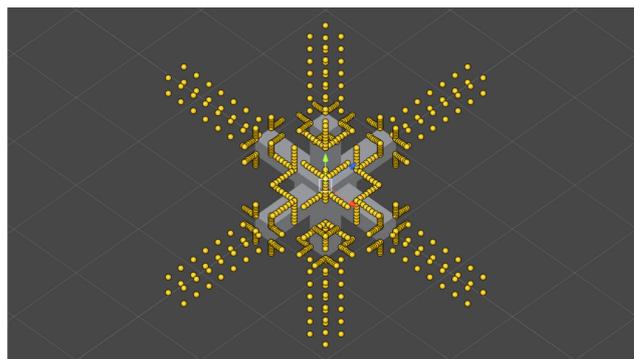


Рис. 2. Способ задания точек на основе формы объекта

В данном случае формула расчета сложности создания точек расчета будет иметь следующий вид:

$$O = C \cdot P + CN \cdot (P + NP), \quad (2)$$

где C – количество точек, «вшитых» в трехмерную модель; P – количество операций, необходимое для создания точки; CN – количество точек, создаваемых вдоль направления нормали точки трехмерной модели электронного устройства; NP – количество операций, необходимое для определения позиции точки, расположенной вдоль нормали.

Третий способ – использовать алгоритм для задания равноудаленных друг от друга позиций расчетных точек [8]. Этот способ одинаково хорошо работает для трехмерных моделей любой сложности и формы, а также обладает возможностью легко и интуитивно контролировать разрешение напряженности электрического поля.

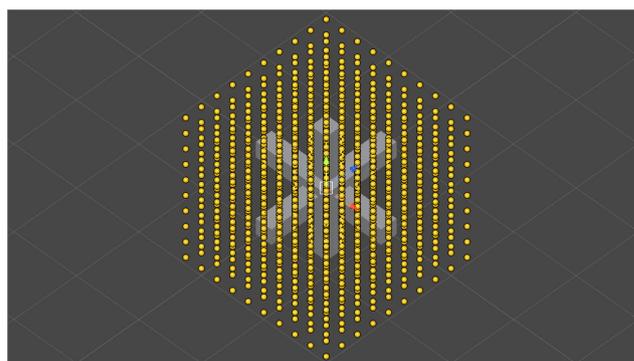


Рис. 3. Способ равноудаленного задания точек с необходимым разрешением

Формула сложности в этом случае имеет вид:

$$O = Ceil(R \cdot Max(Lx, Ly, Lz))^3, \quad (3)$$

где $Ceil$ – функция округления вверх; R – разрешение электрического поля (количество точек на метр); Max – функция нахождения максимума; Lx, Ly и

Lz – длины сторон (в метрах), описывающие куб, в который вписана трехмерная модель.

Третий способ, хотя и требует большего числа операций, обладает преимуществами перед первыми двумя, так как не требует времени на ручную установку точек и автоматически равномерно покрывает все необходимое пространство расчетными точками независимо от детализации модели.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Использование алгоритма для задания равноудаленного расположения точек расчета является удобным началом для определения способа визуализации напряженности электрического поля в этих точках. Всякую расчетную точку можно представить как сферу с радиусом, вычисляемым по формуле:

$$Rs = \frac{1}{R}, \quad (4)$$

где R – разрешение электрического поля (количество точек на метр).

Такой размер сферы гарантирует ее пересечение с соседней. Это необходимо для того, чтобы в будущем организовать плавный переход от одного значения напряженности электрического поля к соседнему. Значение напряженности поля сопоставляется с яркостью сферы: чем ярче сфера, тем большее значение было рассчитано в ее центре [9].



Рис. 4. Поле (сфера) со средним значением

На рис. 4 сфера закрашена в серый цвет, это является причиной того, почему визуально эта сфера

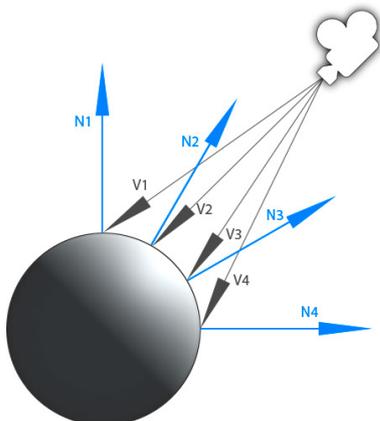


Рис. 5. Векторы взгляда и нормалей

ощущается как круг. Для того чтобы поле выглядело объемным, необходимо применить точечную проекцию инвертированного вектора взгляда камеры на вектор нормали текущего экранного пикселя сферы в глобальном пространстве [10, 11].

На рис. 5 векторы взгляда промаркированы от $V1$ до $V4$, векторы нормали от $N1$ до $N4$. Видно, что чем меньше угол между соответствующими векторами, тем больше освещена поверхность, а на краях, наоборот, наблюдается меньший угол и соответственно меньшая освещенность. Формула освещенности, описывающая данное поведение, выглядит так:

$$D = |\mathbf{V}| \cdot |\mathbf{N}| \cdot \cos(\theta), \quad (5)$$

где \mathbf{V} – нормализованный вектор взгляда; \mathbf{N} – нормализованный вектор нормали; θ – угол между векторами.

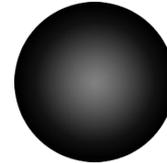


Рис. 6. Результат обработки векторов \mathbf{V} и \mathbf{N}

В результате (рис. 6) на краях сферы по формуле (5) вычисляется нулевая освещенность (абсолютно черный цвет), потому что векторы расположены перпендикулярно друг другу. Чтобы края не были абсолютно черными, дополним предыдущую формулу следующей:

$$DR = L2 + D \cdot (1 - L2), \quad (6)$$

где D – результат проекции векторов (5); $L2$ – будущее минимальное значение.

Формула (6), по сути, линейно масштабирует текущее значение согласно заданному новому минимальному, что в результате сделает края более освещенными, если в качестве $L2$ задать значение в диапазоне $0 \leq L2 \leq 1$ [12].

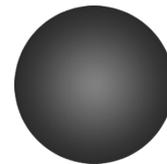


Рис. 7. Результат масштабирования проекции векторов

При таком отображении визуализировать переход между напряженностями расчетных точек невозможно, так как переход будет очень строгим

и мгновенным, а также сферы, расположенные к экрану ближе, будут заслонять те, что расположены дальше. Для организации линейного перехода от одной расчетной точки к другой необходимо линейно увеличивать прозрачность на краях сферы. Для этого хорошо подходит значение, которое получается в результате применения формулы (6). Если говорить проще, яркость поля определяет его непрозрачность. Чем выше яркость, тем меньше прозрачность. Однако необходимо превратить результат этой формулы в 4-компонентный вектор, представляющий цвет сферы в RGB цветовом режиме [13]:

$$\mathbf{RM} = [DR, DR, DR, DR], \quad (7)$$

где DR – итоговый монохромный цвет пикселя сферы из (6).

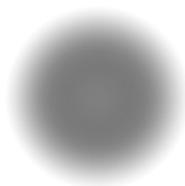


Рис. 8. Использование альфа-канала для линейного угасания поля

Компоненты вектора \mathbf{RM} представляют R, G, B и A (альфа) каналы, соответственно. Дополнительный канал A необходим для того, чтобы организовать угасание напряженности поля: чем меньше его значение, тем больше прозрачность. Таким образом на краях достигается полная прозрачность.

Этот подход позволяет избавиться от ненужных помех на трехмерной карте электрического поля всех точек. Однако при большом количестве расчетных точек поля будут накладываться друг на друга, что создаст проблемы в плане понимания исследователем, в каком именно месте происходит превышение значения напряженности электрического поля.

Как видно из рис. 9, наложение полей приводит к тому, что визуально невозможно понять, в какой точке имеется превышение значения напряженности, так как почти полностью прозрачные поля наложились друг на друга, и изображение выглядит как одно большое поле. Помимо этого, напряженность поля необходимо отображать в ходе времени. Ход времени можно представить как упорядоченный по возрастанию массив чисел с плавающей точкой, представляющих конкретные значения времени (шаг), для которых надо выполнить расчет напряженности электрического поля.

Чтобы решить обе описанные выше проблемы, необходимо сопоставить минимальному и максимальному значениям напряженности электрического поля на всем отрезке времени соответствующие им цвета. Тогда поле можно отображать не как черно-белую сферу, а как цветную. Цветовая разница позволяет без труда обнаружить место превышения напряженности электрического поля.

Принято полям сопоставлять цвета из стандартной цветовой карты температур: голубой – минимальное значение напряженности поля, желтый – среднее, красный – максимальное.



Рис. 10. Цветовая температура (минимальный, средний, максимальный)

Смежные значения интерполируются (покомпонентно) между голубым и красным цветами через желтый по формуле [14]:

$$NC = \frac{CF}{MF} \cdot MC, \quad (8)$$

где CF – значение напряженности электрического поля в текущей точке; MF – максимальное значение

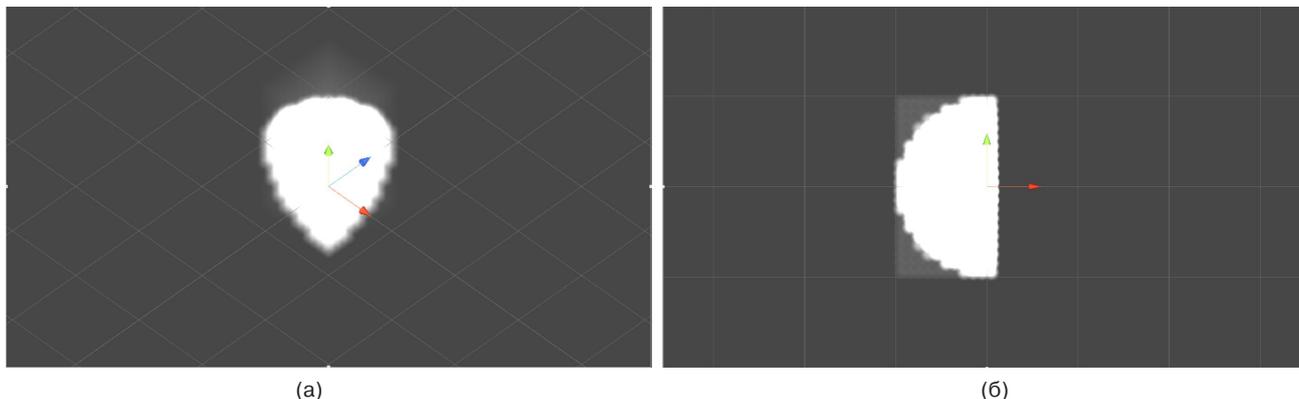


Рис. 9. Наложение полей: перспектива (а) и вид сбоку (б)

напряженности электрического поля среди всех точек на всем отрезке времени; MC – цвет максимальной напряженности электрического поля на всем отрезке времени.



Рис. 11. Интерполяция цветов

Интерполированные цвета умножаются на вычисленное по формуле (6) значение напряженности поля в заданной точке:

$$Result = DR \cdot Color, \quad (9)$$

где DR – монохромный цвет сферы; $Color$ – четырехкомпонентный вектор, представляющий цвет сферы (RGB) и ее прозрачность (A).

В результате после расчета всех точек электрического поля получим картину, показанную на рис. 12.

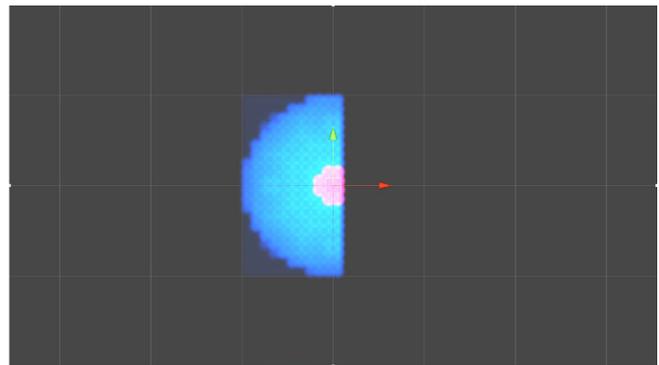
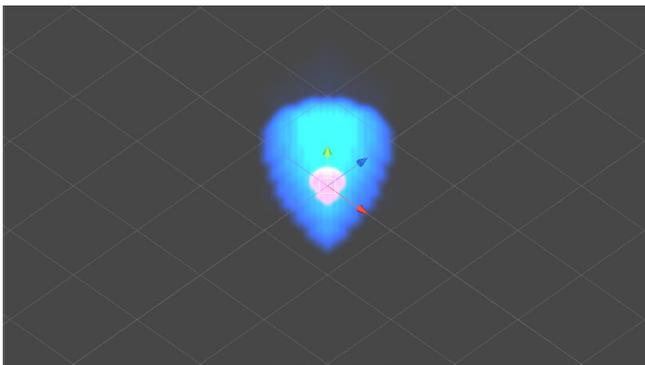


Рис. 12. Наложение полей с разграничением по цвету

Видно, что в центре сферы есть участок красного цвета – это расчетные точки с превышением напряженности, им соответствует максимальное значение среди всех рассчитанных точек во времени [15]. В большинстве случаев распознаваемость превышений на визуальном уровне не будет вызывать проблем, например, как на рис. 13, в котором для расчета напряженности электрического поля использовались формулы из [16].

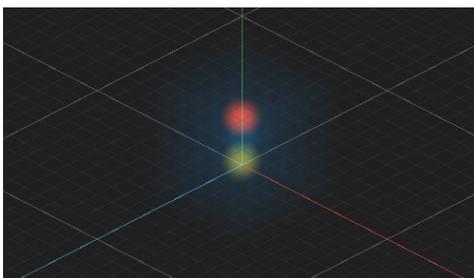


Рис. 13. Визуализация электрического поля на конкретной модели

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

На рынке программного обеспечения существует множество программ, позволяющих работать с параметрами электрических полей, однако они обладают сложным интерфейсом, часто требуют навыков программирования, не все из них способны визуализировать электрическое поле в трехмерном пространстве вместе с моделью электронного устройства и во времени. При этом часть из них требует покупки лицензии.

Предложенная методика будет полезной сообществу разработчиков как встраиваемое решение по точечной визуализации электрического поля в любой проект на любом алгоритмическом языке с возможностью анимации во времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были рассмотрены три способа генерации расчетных точек для вычисления параметров электрических полей. Следуя балансу между скоростью работы и качеством представления

рассчитываемого поля, был выбран способ равноудаленной генерации точек, так как он обладает неплохой производительностью и одновременно с этим – равномерным распределением точек расчета независимо от сложности и формы трехмерной модели, а также легкостью контроля качества представления электрического поля.

Предложено решение визуализации расчетных точек в виде сферических полей с цветом, соответствующим стандартной цветовой маркировке температуры (от синего до красного). При этом цвет центра соответствует цвету рассчитанного значения напряженности, а цвет края сфер угасает в соответствии со значением альфа-канала, что позволило реализовать линейное смешивание (переливание цветов) расположенных друг за другом полей.

На примере нескольких моделей и расчетов было выявлено, что наблюдателю установить точки условного превышения значения напряженности электрических полей во времени не составляет труда.

Методика обладает высокой производительностью и способна работать на компьютерах слабой мощности, а также легко встраивается в решения на языках программирования разного уровня.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Покотило С.А., Панкратов В.И. *Электротехника и электроника*. Ростов-на Дону: Феникс; 2018. 283 с. ISBN 978-5-22229-376-8
2. Беневоленский С.Б., Марченко А.Л. *Основы электротехники*. М.: ФИЗМАТЛИТ; 2011. 565 с. ISBN 978-5-94052-117-4
3. Тарланов А.Т., Курбанисмаилов З.М. Учет магнитного поля системы электроснабжения энергоемкого технического объекта. *Российский технологический журнал*. 2020;8(6):130–142. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-130-142>
4. Хокинг Д. *Unity в действии*. СПб.: Питер; 2019. 352 с. ISBN 978-5-44610-816-9
5. Бонд Д.Г. *Unity и C#. Геймдев от идеи до реализации*. М.: Питер; 2019. 925 с. ISBN 978-5-44610-715-5
6. Roughgarden T. *Algorithms Illuminated. Part 1. The Basics*. Soundlikeyourself Publisher, LLC; 2017. 220 p. ISBN 978-0-99928-291-5
7. Торн А. *Искусство создания сценариев в Unity*: пер. с англ. М.: ДМК Пресс; 2019, 360 с. ISBN 978-5-97060-381-9
8. Вазирани У., Дасгупта С., Пападимитриу Х. *Алгоритмы*. М.: МЦНМО; 2019. 320 с. ISBN 978-5-44392-893-7
9. Мартин Р. *Чистая архитектура. Искусство разработки программного обеспечения*. СПб.: Питер; 2018. 352 с. ISBN 978-5-4461-0772-8
10. Планк М. *Введение в теоретическую физику. Ч. 3. Теория электричества и магнетизма*. М.-Л.: ГТТИ; 1933. 184 с.
11. Вольф Д. *Язык шейдеров*. М.: ДМК Пресс; 2015. 368 с. ISBN 978-5-97060-255-3
12. Eimandar P. *DirectX 11.1 Game Programming*. Packt Publisher; 2013. 146 p. ISBN 978-978-1-84969-480-3
13. Ламмерс К. *Шейдеры и эффекты в Unity*. М.: ДМК Пресс; 2016. 274 с. ISBN 978-5-97060-213-3
14. Боресков А. *Программирование компьютерной графики*. М.: ДМК Пресс; 2019. 370 с. ISBN 978-5-97060-779-4
15. Mobeen M.M. *OpenGL Development Cookbook*. Packt Publisher; 2013. 326 p. ISBN 978-1-84969-504-6
16. Лоторейчук Е.А. *Расчет электрических и магнитных цепей и полей*. М.: Инфра-М; 2009. 272 с. ISBN 5-8199-0170-3

REFERENCES

1. Pokotilo S.A., Pankratov V.I. *Elektrotehnika i elektronika (Electrical and Electronic)*. Rostov-on-Don: Feniks; 2018. 283 p. (in Russ.). ISBN 978-5-22229-376-8
2. Benevolenskii S.B., Marchenko A.L. *Osnovy elektrotehniki (Fundamentals of Electrical Engineering)*. Moscow: FIZMATLIT; 2011. 565 p. (in Russ.). ISBN 978-5-94052-117-4
3. Tarlanov A.T., Kurbanismailov Z.M. Accounting of the magnetic field of the power supply system of a power-capacitive technical object. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(6):130–142 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-130-142>
4. Hocking J. *Unity v deistvii (Unity in Action)*. Saint Petersburg: Piter; 2019. 352 p. (in Russ.). ISBN 978-5-44610-816-9
5. Bond D.G. *Unity i C#. Geimdev ot idei do realizatsii (Unity and C #. Game development from idea to implementation)*. Moscow: Piter; 2019. 925 p. (in Russ.). ISBN 978-5-44610-715-5
6. Roughgarden T. *Algorithms Illuminated. Part 1. The Basics*. Soundlikeyourself Publisher, LLC; 2017. 220 p. ISBN 978-0-99928-291-5
7. Torn A. *Iskusstvo sozdaniya scenariiev v Unity (The art of scripting in Unity)*. Moscow: DMK Press; 2019. 360 p. (in Russ.). ISBN 978-5-97060-381-9
8. Vazirani U., Dasgupta S., Papadimitriu H. *Algoritmy (Algorithms)*. Moscow: MCNMO; 2019. 320 p. (in Russ.). ISBN 978-5-44392-893-7
9. Martin R. *Chistaya arkhitektura. Iskusstvo razrabotki programnogo obespecheniya (Pure architecture. The art of software development)*. Saint Petersburg: Piter; 2018. 352 p. (in Russ.). ISBN 978-5-4461-0772-8
10. Plank M. *Vvedenie v teoreticheskuyu fiziku. Ch. 3. Teoriya elektrichestva i magnetizma (Introduction to theoretical physics. V. 3. Theory of electricity and magnetism)*. Moscow-Leningrad: GTTI; 1933. 184 p. (in Russ.).
11. Vol'f D. *Yazyk sheiderov (The language of shaders)*. Moscow: DMK Press; 2015. 368 p. (in Russ.). ISBN 978-5-97060-255-3
12. Eimandar P. *DirectX 11.1 Game Programming*. Packt Publisher; 2013. 146 p. ISBN 978-1-84969-480-3
13. Lammers K. *Sheidery i efekty v Unity (Shaders and Effects in Unity)*. Moscow: DMK Press; 2016. 274 p. (in Russ.). ISBN 978-5-97060-213-3
14. Boreskov A. *Programmirovaniye komp'yuternoii grafiki (Computer Graphics Programming)*. Moscow: DMK Press; 2019. 370 p. (in Russ.). ISBN 978-5-97060-779-4
15. Mobeen M.M. *OpenGL Development Cookbook*. Packt Publisher; 2013. 326 p. ISBN 978-1-84969-504-6
16. Lotoreichuk E.A. *Raschet elektricheskikh i magnitnykh tsepei i polei (Calculation of electrical and magnetic circuits and fields)*. Moscow: Infra-M; 2009. 272 p. (in Russ.). ISBN 5-8199-0170-3

Об авторах

Курбанисмаилов Заур Магомедович, преподаватель кафедры КБ-4 «Интеллектуальные системы информационной безопасности» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kurbanismaiлов.92@gmail.com. Scopus Author ID: 57222128790, <https://orcid.org/0000-0002-5388-049X>

Тарланов Арслан Тарланович, преподаватель кафедры КБ-4 «Интеллектуальные системы информационной безопасности» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: lev.brave@gmail.com. Scopus Author ID: 57222129018, <https://orcid.org/0000-0002-7508-9682>

Акимов Эмиль Муратович, студент кафедры КБ-4 «Интеллектуальные системы информационной безопасности» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: akimov.emil.muratovich@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-3129-8191>

About the authors

Zaur M. Kurbanismaiлов, Lecturer, Department of Intelligent Information Security Systems, Institute for Integrated Security and Special Instrument Engineering, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kurbanismaiлов.92@gmail.com. Scopus Author ID: 57222128790, <https://orcid.org/0000-0002-5388-049X>

Arslan T. Tarlanov, Lecturer, Department of Intelligent Information Security Systems, Institute for Integrated Security and Special Instrument Engineering, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: lev.brave@gmail.com. Scopus Author ID: 57222129018, <https://orcid.org/0000-0002-7508-9682>

Emil M. Akimov, Student, Department of Intelligent Information Security Systems, Institute for Integrated Security and Special Instrument Engineering, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: akimov.emil.muratovich@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-3129-8191>

Математическое моделирование
Mathematical modeling

УДК 004.94

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-66-77>

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

**О выборе метода распознавания
астрономических объектов на основе анализа
исходных данных, полученных
по программе Sloan Digital Sky Survey DR14**

**В.А. Голов,
Д.А. Петрусеви^ч [@]**

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: petrusevich@mirea.ru, petrdenis@mail.ru

Резюме. В работе проведен анализ набора данных Sloan Digital Sky Survey DR14, в котором в несколько этапов измерений собраны статистические данные о различных астрономических объектах. На поверхности Земли расположено много телескопов, собирающих данные об объектах в небе. На околоземной орбите и в космосе (обычно в точках Лагранжа систем Земля – Луна, Солнце – Земля) расположены или запланированы к размещению телескопы, следящие за небом в разных диапазонах. Значительный объем данных приводит к необходимости статистической обработки этого потока информации, а также к построению автоматических классификаторов по типу объекта. В работе представлены результаты предварительной обработки данных и работы различных видов классификаторов в задаче определения типа астрономического объекта из набора данных Sloan Digital Sky Survey DR14 (звезда, квазар или галактика) на основе нескольких распространенных метрик. Рассмотрены алгоритмы дерева принятых решений, логистическая регрессия, наивный «байесовский» классификатор и ансамбли классификаторов. Показано, что классификация подобных наборов данных может быть проведена без привлечения сложных систем машинного обучения (таких, как нейронные сети). Сделаны выводы об особенностях применения алгоритмов машинного обучения к этой задаче. В некоторых случаях работа классификаторов может быть интерпретирована с точки зрения физики. Точность построенных в работе классификаторов (согласно метрикам, учитывающим несбалансированность классов) достигает 90% и может считаться удовлетворительной и для того, чтобы считать задачу решенной, и для того, чтобы использовать структуру классификаторов для объяснения результатов классификации с точки зрения физики.

Ключевые слова: Sloan Digital Sky Survey DR14, анализ данных, машинное обучение, дерево принятия решений, логистическая регрессия

• Поступила: 13.04.2020 • Доработана: 29.08.2020 • Принята к опубликованию: 09.03.2021

Для цитирования: Голов В.А., Петрусеви^ч Д.А. О выборе метода распознавания астрономических объектов на основе анализа исходных данных, полученных по программе Sloan Digital Sky Survey DR14. *Российский технологический журнал*. 2021;9(3):66–77. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-66-77>

Прозрачность финансовой деятельности: Никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Data analysis methods in astronomic objects classification (Sloan Digital Sky Survey DR14)

Vladislav A. Golov,
Denis A. Petrusевич @

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia
@ Corresponding author, e-mail: petrusевич@mirea.ru, petrdenis@mail.ru

Abstract. In the paper Sloan Digital Sky Survey DR14 dataset was investigated. It contains statistical information about many astronomical objects. The information was obtained within the framework of the Sloan Digital Sky Survey project. There are telescopes at the Earth surface, at the Earth orbit and in the Lagrange points of some systems (Earth–Moon, Sun–Earth). The telescopes gain information in different frequency ranges. The large quantity of statistical information leads to the demand for analytical algorithms and systems capable of making classification. Such information is marked up well enough to build machine learning classification systems. The paper presents the results of a number of classifiers. The handled data contains measures of three types of astronomical objects of the Sloan Digital Sky Survey DR14 dataset (star, quasar, galaxy). The CART decision tree, logistic regression, naïve Bayes classifiers and ensembles of classifiers (random forest, gradient boosting) were implemented. Conclusions about special features of each machine learning classifier trained to solve this task are made at the end of the paper. In some cases, classifiers' structure can be explained physically. The accuracy of the classifiers built in this research is more than 90% (metrics F1, precision and recall are implemented, because the classes are unbalanced). Taking these values into account classification task is supposed to be successfully solved. At the same time, the structure of classifiers and importance of features can be used as a physical explanation of the solution.

Keywords: Sloan Digital Sky Survey DR14, data analysis, machine learning, decision tree, logistic regression

• Submitted: 13.04.2020 • Revised: 29.08.2020 • Accepted: 09.03.2021

For citation: Golov V.A., Petrusевич D.A. Data analysis methods in astronomic objects classification (Sloan Digital Sky Survey DR14). *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(3):66–77 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-66-77>

Financial disclosure: No author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ данных и машинное обучение – это новые области знаний, которые оказали влияние на решение задач во многих сферах знаний. Долгое время исследование астрономических объектов на основе фиксаций изменения блеска объектов и их перемещения на последовательных снимках, а также на основе анализа спектра, проводилось вручную. Но сейчас объем накопленных данных и скорость их получения такова, что самостоятельная обработка этого потока информации занимает слишком много времени и усилий. Более того, от исследователя это и не требуется. Вопрос поиска объектов, обладающих заданными свойствами, перешел в область обработки большого набора статистических данных.

На основе накопленных данных решается широкий круг задач, например:

- уточнение динамики объектов (система планета – спутник; гравитационная структура галактик; описание динамики объектов вокруг сверхмассивной черной дыры Стрелец А*, центра галактики Млечный Путь) [1, 2];
- классификация звезд (поиск пульсаров и отделение шума от сигнала пульсара) [3–6];
- поиск экзопланет (чаще всего основываясь на кратковременном периодическом изменении блеска звезды);
- в последнее время существенное внимание уделяется вопросам анализа гравитационных волн и сведению результатов наблюдений за гравитационным полем и электромагнитных волн [7].

С точки зрения информационных технологий, в основном, в области обработки астрономических данных встречаются две разновидности задач. Накопленный статистический материал без использования графической информации исследуется методами математической статистики и анализа данных [4, 8–12]. Наборы данных, основанные на множестве снимков неба или определенного объекта, анализируются методами компьютерной графики, спектрального анализа и машинного зрения [5, 6, 13–15].

Представленное исследование посвящено анализу на примере набора данных Sloan Digital Sky Survey DR14 [16]. В рамках работы показано, что представленный набор данных может быть обработан без использования классификаторов, требующих сложного процесса обучения и настройки (таких, как нейронные сети).

В работах [4, 5] для решения задачи классификации строятся нейронные сети глубокого обучения (deep convolutional neural networks). Их структура и методы обучения сложны, требуют опыта и искусства настройки. Авторы [4] отмечают преобладание количества зафиксированных звезд и галактик над числом квазаров (как в наборе данных, так и в целом). По этой причине требуется либо использовать специальные метрики качества классификации (как сделано в представленном исследовании), либо дополнять класс квазаров искусственными примерами, сгенерированными с помощью специально обученных нейронных сетей. В исследовании [5] авторы анализируют частотные характеристики сигнала с помощью нейронных сетей. Сигнал пульсара характеризуется узким диапазоном вокруг частоты, соответствующей максимуму отношения сигнал/шум. Использование сетей глубокого обучения направлено на распознавание типа сигнала на основе частотных характеристик.

В исследовании [6] построена двухуровневая комбинация различных классификаторов. На первом этапе конструируются комбинации «простых» классификаторов (метод опорных векторов) и классификаторов на основе сверточных нейронных сетей (convolutional neural networks, CNN). На втором этапе классификатор, получающий их ответы, обучается так, чтобы максимизировать метрику качества F_1 . Используемая схема похожа на идею построения «сильных» классификаторов на основе множества «слабых» (беггинг) [17, 18].

В работе [8] построено решающее дерево для анализа одной из предыдущих версий исследуемого в представленной статье набора данных Sloan Digital Sky Survey DR7 [19]. Авторы не проводят сравнение различных алгоритмов классификации, а используют один из самых простых – решающее дерево [17, 18]. При этом проведено сравнение различных

алгоритмов построения решающего дерева на основе метрик качества классификации, анализируются настраиваемые на этапе обучения классификатора параметры (такие, как высота дерева), вводятся новые параметры, например, комбинация исходных параметров набора данных. Представленная работа посвящена сравнению различных алгоритмов классификации в приложении к астрономическим объектам [16], в том числе исследуется классификатор на основе решающего дерева.

В исследованиях [10, 11] проанализирован каталог астрономических объектов, опубликованный американским агентством NASA [20]. Проведена многоклассовая классификация на основе информации о различных источниках излучения в виде частотных характеристик. В рамках этих исследований для классификации использовано решающее дерево (так же, как в работе [8]), также построены классификаторы на основе логистической регрессии, на основе бустинга произведено усиление классификаторов, использующих логистическую регрессию [17, 18].

Идея усиления простых классификаторов (обладающих точностью выше 50%) заключается в настройке их комбинации таким образом, чтобы повысить точность классификации (рассчитываемой на основе обработки обучающей выборки объектов). Концепции беггинга и бустинга – наиболее известные алгоритмы построения таких комбинаций [17, 18]. В работе [12] для классификации астрономических объектов используется классификатор на основе «случайного леса»: с помощью беггинга комбинируется работа множества решающих деревьев.

На основе представленного обзора можно сделать следующие выводы:

- в большинстве проанализированных работ сравниваются два алгоритма построения классификаторов или за основу берется классификатор определенного вида;
- классификаторы на основе выбранных алгоритмов настраиваются вручную либо используются концепции усиления простых классификаторов на основе беггинга или бустинга с целью повышения качества классификации;
- в обзоре не выявлено исследований, в которых сравнивается более двух классификаторов, построенных на основе разных алгоритмов.

Актуальность исследования состоит в том что, построение классификаторов астрономических объектов на основе нейронных сетей (в том числе, глубокого обучения) является излишне сложным путем решения задачи классификации, т.к. требует процедуры обучения и настройки конфигурации и параметров сети (которая зачастую является искусством исследователей). Простые классификаторы могут дать точность, сопоставимую с результатами,

полученными с помощью систем на основе нейронных сетей. Кроме того, в статье приведено сравнение точностей классификаторов, построенных авторами, а также с классификаторами, построенными в исследованиях, вошедших в литературный обзор.

Цель работы – сравнение классификаторов, построенных на основе различных алгоритмов, не затрагивающих обучение нейронных сетей.

1. НАБОР ДАННЫХ И МЕТРИКИ КАЧЕСТВА КЛАССИФИКАЦИИ

Информация в наборе данных Sloan Digital Sky Survey DR14 [16] представляет собой 10 000 наблюдений космоса. Каждое наблюдение описывается 17 столбцами признаков и 1 столбцом класса, который идентифицирует его как представителя одного из классов: звезду (4152 объектов), галактику (4998 объектов) или квазар (850 объектов). Так как большая часть столбцов является описанием номера объекта или координатами, описывающими положение объекта в пространстве, в рамках данной работы интерес представляют 6 признаков столбцов и один столбец класса.

Объекты описываются набором из 6 признаков:

1. Фотометрическая система u, g, r, i, z – широкополосная пятицветная фотометрическая система. Подразумевается значение звездной величины в каждом фильтре.
2. Красное смещение $redshift$ – сдвиг излучения в сторону красной части спектра (длинных волн).

Корреляция между признаками представлена в таблице 1. Диагональные элементы, которые отвечают за корреляцию параметров с собой, равны 1 и не указаны. Все результаты в таблице 1 и далее в выражениях в тексте работы приведены с точностью до 0.01, за исключением метрик качества классификаторов (приведены до 3-го знака после запятой).

Таблица 1. Корреляция между основными признаками в наборе данных Sloan Digital Sky Survey DR14

Признак	u	g	r	i	z	$redshift$
u		0.85	0.69	0.6	0.55	0.16
g	0.85		0.96	0.91	0.88	0.41
r	0.69	0.96		0.98	0.97	0.44
i	0.6	0.91	0.98		0.98	0.43
z	0.55	0.88	0.97	0.98		0.42
$redshift$	0.16	0.41	0.44	0.43	0.42	

Статистические характеристики признаков набора данных представлены в таблице 2. Природа параметра $redshift$ отличается от остальных признаков, диапазон его значений отличается существенно.

Признаки u, g, r, i, z явно имеют схожую природу и близкие значения минимумов, максимумов, стандартного отклонения и среднего значения.

Таблица 2. Статистические характеристики признаков в наборе данных Sloan Digital Sky Survey DR14

Признак	Количество ненулевых записей	Среднее значение	Стандартное отклонение	Минимум	Максимум
u	10000	18.62	0.83	12.99	19.60
g	10000	17.37	0.95	12.80	19.92
r	10000	16.84	1.07	12.43	24.80
i	10000	16.58	1.14	11.95	28.18
z	10000	16.42	1.20	11.61	22.83
$redshift$	10000	0.14	0.39	≤ 0.01	5.36

В связи с тем, что значения признака $redshift$ выделены и отличаются по диапазону значений, проведено нормирование признаков методом масштабирования:

$$x' = \frac{x - \mu}{\sigma}, \quad (1)$$

где x – значение признака до преобразования; x' – значение параметра после преобразования; μ – его среднее значение; σ – среднеквадратическое отклонение.

Среднее значение всех параметров после нормирования приобрело значение 0, стандартное отклонение равно 1. Значения минимумов и максимумов приведены в таблице 3.

Таблица 3. Статистические характеристики признаков в наборе данных Sloan Digital Sky Survey DR14 после нормирования

Признак	Минимум	Максимум
u	-6.80	1.18
g	-4.84	2.69
r	-4.13	7.46
i	-4.06	10.16
z	-4.00	5.33
$redshift$	-0.38	13.40

Таким образом, все признаки приобрели значения из одинакового диапазона, что делает возможным их совместное использование в классификаторах.

В задаче бинарной классификации (принадлежность двум классам: $\{1, -1\}$) возможны как

правильные ответы $a(x)$ классификатора, так и ошибки, типы которых представлены в таблице 4.

Таблица 4. Типы правильных ответов и ошибок классификатора в задаче бинарной классификации (в строках ответы классификатора $a(x)$, в столбцах – верные метки y классов)

$a(x)y$	$y = 1$	$y = -1$
$a(x) = 1$	True positive (TP)	False positive (FP)
$a(x) = -1$	False negative (FN)	True negative (TN)

Оценка точности как соотношения между правильными ответами классификатора и общим числом протестированных примеров (accuracy) зависит от соотношения объектов разных классов и не может быть использована, если классы не сбалансированы по числу примеров [17, 18]:

$$accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}. \quad (2)$$

Для оценки качества классификатора введены понятия точности (precision) и полноты (recall) [17, 18], не зависящие от соотношения количества объектов в каждом классе:

$$precision = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (3)$$

$$recall = \frac{TP}{TP + FN}. \quad (4)$$

На основе этих оценок вводится мера F :

$$F_{\beta} = (1 + \beta^2) \frac{precision \times recall}{\beta^2 precision + recall}. \quad (5)$$

При $\beta = 1$ в формуле (5) получаем среднее гармоническое с коэффициентом 2.

Также используется площадь под кривой AUC-PR на графике точность – полнота (precision – recall) [21].

2. ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В экспериментальной части исследования на представленном наборе данных было протестировано несколько алгоритмов классификации. Их результаты сравниваются в пункте 2.6.

2.1. Дерево решений

Одним из самых простых классификаторов в области анализа данных является дерево (принятия) решений [17, 18, 22]. Зачастую за его простотой скрывается и положительная

характеристика – возможность проследить, какие параметры (или их комбинации) оказались важны при построении классификатора, а сама классификация фактически превращается в ответы на набор вопросов (каждый из которых можно представить в узле бинарного дерева). В связи с тем, что дерево может иметь очень большую высоту для сложных задач, в целях борьбы с переобучением (overfitting), а также, чтобы понять смысл построенного классификатора, деревья решений усекают по высоте (pruning) [17].

Границы диапазонов параметров, соответствующие каждому из трех классов, полученные с помощью усеченного дерева решений, представлены в таблице 5.

Таблица 5. Границы признаков для определения класса (звезда, квазар или галактика)

Тип объекта	Ограничения на значения признаков
Галактика	$redshift \in [-0.36, 0.23],$ $g \leq 1.65$
Квазар	$redshift > 0.23,$ $i \leq -0.06$
Звезда	$redshift < -0.36$

Коэффициент Джини [17] для классов: 1) 0.03 – для галактик; 2) 0.06 – для квазаров; 3) 0.01 – для звезд.

После обучения классификатора его качество было проверено на тестовой выборке. Точность классификации представлена в таблице 6. На главной диагонали расположена доля правильных ответов классификатора. В ячейке с номером строки i , номером столбца j стоит доля ответов классификатора в такие моменты, когда правильный класс имеет индекс j , а классификатор дал ответ в виде класса i .

Таблица 6. Матрица ошибок (mean confusion matrix) классификатора, построенного на основе дерева решений

Правильная метка класса	Галактика	0.992	0.006	0.002
	Квазар	0.076	0.924	0
	Звезда	0	0	1
		Галактика	Квазар	Звезда
		Предсказанная метка класса		

В таблице 7 приведены результаты работы классификатора, согласно различным метрикам, с точностью до 0.001 [21, 22].

Таблица 7. Метрики качества классификатора на основе дерева решений

Классы и метрики	Precision (точность)	Recall (полнота)	F_1	AUC_PR
Галактика	0.986	0.993	0.990	0.983
Квазар	0.973	0.921	0.946	0.903
Звезда	0.998	1.0	0.999	0.998
Среднее	0.986	0.971	0.978	0.961

Последняя строка содержит оценку среднего значения метрики качества по всем классам.

По результатам работы классификатора видно, что решающее дерево распознает верно все галактики и звезды, но порядка 8% квазаров классифицирует как галактики.

2.2. Логистическая регрессия

Суть этого классификатора заключается в построении гиперплоскостей в пространстве признаков, разделяющих области каждого класса. В задачу оптимизации, решаемую при обучении классификатора, обычно включают регуляризацию весов (коэффициентов гиперплоскостей). Фактически, это метод борьбы с переобучением (overfitting). Результаты классификатора, основывающегося на логистической регрессии [17, 18], представлены в таблицах 8, 9.

Таблица 8. Матрица ошибок (mean confusion matrix) классификатора, построенного на основе логистической регрессии

Правильная метка класса	Галактика	0.990	0.003	0.007
	Квазар	0.051	0.949	0
	Звезда	0	0	1
		Галактика	Квазар	Звезда
		Предсказанная метка класса		

В таблице 9 приведены результаты работы классификатора, согласно различным метрикам, с точностью до 0.001.

Таблица 9. Метрики качества классификатора на основе логистической регрессии

Классы и метрики	Precision (точность)	Recall (полнота)	F_1	AUC_PR
Галактика	0.991	0.987	0.989	0.984
Квазар	0.985	0.949	0.967	0.940
Звезда	0.988	1.0	0.994	0.988
Среднее	0.988	0.979	0.983	0.971

По результатам работы классификатора видно, что с помощью логистической регрессии удается правильно распознать все галактики и звезды, но порядка 5% квазаров было отнесено к классу галактик.

2.3. «Наивный» Байесовский классификатор

В работе этого классификатора делается предположение о том, что между признаками нет взаимозависимости. Хотя такое условие выполняется крайне редко, этот метод остается хорошим инструментом для исследования данных. Используя теорему Байеса для вероятности сопоставления объекта с параметрами $X = (x_1, \dots, x_n)$ и метки класса y_i , получим:

$$P(y_i | x_1, \dots, x_n) = \frac{P(y_i)P(x_1, \dots, x_n | y_i)}{P(x_1, \dots, x_n)}. \quad (6)$$

Здесь $P(x_1, \dots, x_n | y_i)$ – вероятность встретить объект $X = (x_1, \dots, x_n)$ среди объектов класса y_i , оцениваемая при обучении [17, 18].

На этапе классификации необходимо выбрать класс с максимальной оценкой вероятности $\arg \max(P(y_i | x_1, \dots, x_n))$. Следует отметить, что знаменатель при классификации не меняется, поэтому достаточно оценить только числитель дроби (6). В связи с тем, что существует несколько меток классов y_i , получаем:

$$P(x_1, \dots, x_n | y) = \prod_{i=1}^{|Y|} P(x_1, \dots, x_n | y_i). \quad (7)$$

Здесь $|Y|$ – мощность множества меток при классификации. Зачастую оцениваемое выражение логарифмируют и получают сумму (8). Требуется отобрать класс, для которого значение этого выражения максимально.

$$Y = \arg \max \left(\log(P(y_i)) + \sum_{i=1}^{|Y|} \log(P(x_1, \dots, x_n | y_i)) \right). \quad (8)$$

Результаты классификатора, основывающегося на логистической регрессии [18], представлены в таблицах 10, 11.

Таблица 10. Матрица ошибок (mean confusion matrix) «наивного» Байесовского классификатора

Правильная метка класса	Галактика	0.982	0.014	0.004
	Квазар	0.059	0.941	0
	Звезда	0.002	0.007	0.991
		Галактика	Квазар	Звезда
		Предсказанная метка класса		

В таблице 11 приведены результаты работы классификатора, согласно различным метрикам, с точностью до 0.001.

Таблица 11. Метрики качества «наивного» Байесовского классификатора

Классы и метрики	Precision (точность)	Recall (полнота)	F_1	AUC_PR
Галактика	0.988	0.983	0.985	0.979
Квazar	0.898	0.941	0.919	0.850
Звезда	0.996	0.992	0.994	0.991
Среднее	0.960	0.972	0.966	0.940

Классификатор работает для звезд и галактик с высоким качеством (оценка 93% чуть ниже, чем у логистической регрессии), но при этом большинство ошибок снова допущено при классификации квазаров.

2.4. Добавление новых параметров в набор данных

Точность классификаторов, построенных в пунктах 3.1–3.3, высока, но ошибки возникают в большинстве случаев при разделении галактик и квазаров. Более того, классификаторы на основе решающего дерева и логистической регрессии выделяют все звезды в наборе данных. По этой причине произведен переход к решению задачи бинарной классификации: в наборе данных оставлены только примеры галактик и квазаров, которые надо разделить. При обработке данных применен метод главных компонент.

На рис. 1–3 представлены зависимости трех главных компонент (описывают 99% разброса данных) друг от друга (квазары отмечены черным, галактики – серым).

Как видно из рис. 1–3, примеры галактик и квазаров смешаны в пространстве признаков, поэтому были добавлены дополнительные параметры:

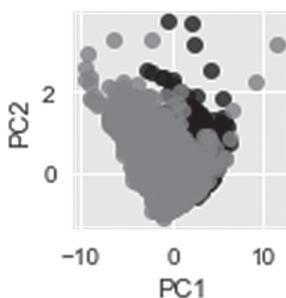


Рис. 1. Зависимость первой и второй главных компонент в наборе данных

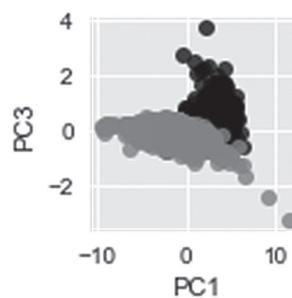


Рис. 2. Зависимость первой и третьей главных компонент в наборе данных

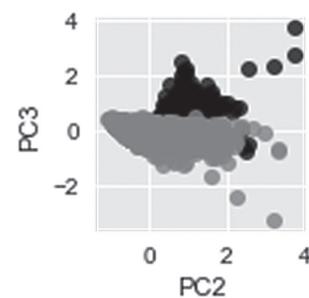


Рис. 3. Зависимость второй и третьей главных компонент в наборе данных

квадраты всех признаков ($u, g, r, i, z, redshift$), все возможные попарные произведения исходных признаков, а также их логарифмы. Функции применялись к исходным значениям параметров, затем проводилась нормализация согласно (1). Значения некоторых параметров перед нормализацией были близки к 0 ($redshift$), поэтому предварительно к ним добавлялось значение 1.

К расширенному набору данных было применено несколько классификаторов.

Решающее дерево с наилучшей мерой $F_1 = 0.9608$ имеет высоту 7. Качество классификации представлено в таблице 12.

Таблица 12. Матрица ошибок решающего дерева (CART) на расширенном наборе данных

Правильная метка класса	Галактика	0.99	0.008
	Квazar	0.082	0.94
		Галактика	Квazar
		Предсказанная метка класса	

Случайный лес (англ. термин *random forest*) включает ансамбль классификаторов на основе решающих деревьев с усреднением результата классификации [17, 18]. Наилучший результат показал классификатор с ограничением по высоте деревьев – 9 (таблица 13).

Таблица 13. Матрица ошибок случайного леса на расширенном наборе данных

Правильная метка класса	Галактика	0.99	0.008
	Квazar	0.079	0.94
		Галактика	Квazar
		Предсказанная метка класса	

Значение меры F_1 случайного леса равно 0.9742. Его результаты чуть лучше, чем у решающего дерева, но существенного улучшения нет.

Классификатор на основе логистической регрессии позволил получить лучшую точность классификации. Его результаты представлены в таблице 14. Значение меры F_1 достигло 0.982.

Таблица 14. Матрица ошибок классификатора на основе логистической регрессии на расширенном наборе данных

Правильная метка класса	Галактика	1	0.002
	Квазар	0.048	0.95
		Галактика	Квазар
		Предсказанная метка класса	

Классификатор на основе градиентного бустинга [17, 18, 22] обычно имеет более высокое качество, отличаясь при этом и сложностью, затратным обучением с вычислительной точки зрения. Основная идея бустинга – использование на некотором этапе обучения классификатора объектов, неправильно классифицированных на предыдущих шагах. Значение меры F_1 при использовании градиентного бустинга на этих данных равно 0.9687. Существенного улучшения достичь не удалось. Результаты представлены в таблице 15.

Таблица 15. Матрица ошибок классификатора на основе градиентного бустинга на расширенном наборе данных

Правильная метка класса	Галактика	0.99	0.006
	Квазар	0.064	0.93
		Галактика	Квазар
		Предсказанная метка класса	

2.5. Применение метода главных компонент

Применение метода главных компонент показало, что для описания 96% разброса в данных необходимо 5 компонент. Парные графики их зависимостей друг от друга приведены на рис. 4–13 (квазары отмечены черным, галактики – серым).

Как видно, галактики и квазары снова оказались смешаны, поэтому построить классификатор с точностью 100% по такому набору данных не удастся. Следует отметить, что, согласно физике вопроса, квазары имеют высокий коэффициент эксцесса – куртозис (kurtosis). Именно этот момент и отделяет их излучение от света, испущенного другими объектами. В наборе данных [23] как раз приведены подобные значения для квазаров, поэтому можно констатировать, что в исследуемом наборе данных просто нет необходимых для классификации значений, а есть косвенные характеристики.

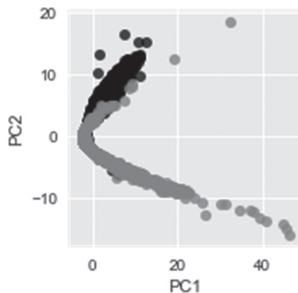


Рис. 4. Зависимость первой и второй главных компонент в расширенном наборе данных

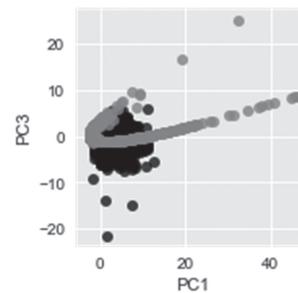


Рис. 5. Зависимость первой и третьей главных компонент в расширенном наборе данных

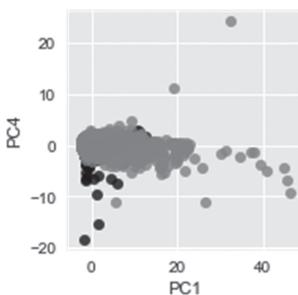


Рис. 6. Зависимость первой и четвертой главных компонент в расширенном наборе данных

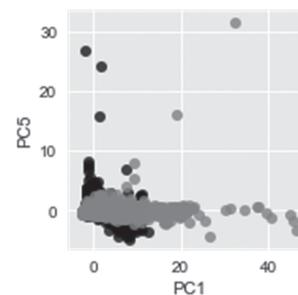


Рис. 7. Зависимость первой и пятой главных компонент в расширенном наборе данных

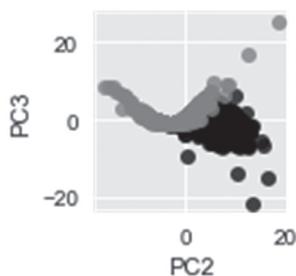


Рис. 8. Зависимость второй и третьей главных компонент в расширенном наборе данных

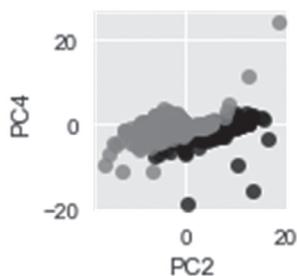


Рис. 9. Зависимость второй и четвертой главных компонент в расширенном наборе данных

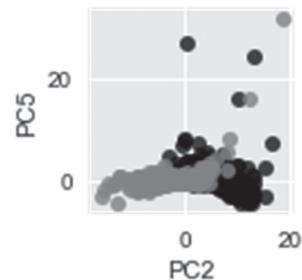


Рис. 10. Зависимость второй и пятой главных компонент в расширенном наборе данных

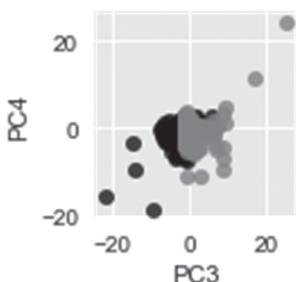


Рис. 11. Зависимость третьей и четвертой главных компонент в расширенном наборе данных

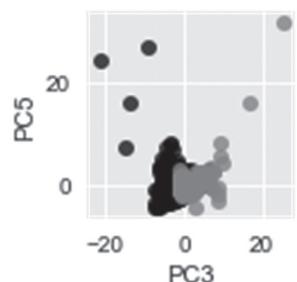


Рис. 12. Зависимость третьей и пятой главных компонент в расширенном наборе данных

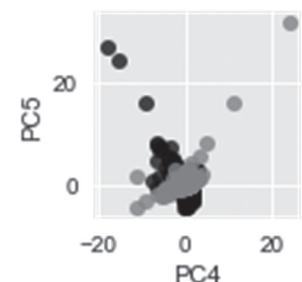


Рис. 13. Зависимость четвертой и пятой главных компонент в расширенном наборе данных

2.6. Сравнение точности классификаторов

Характеристики качества классификаторов, построенных в исследованиях [4, 5, 8, 11, 12, 14, 15], приведены в таблице 16.

В данной работе на исходном наборе данных максимальные значения характеристик качества

классификации были получены с использованием логистической регрессии ($F_1 = 0.983$, см. таблицу 9) и дерева решений ($F_1 = 0.978$, см. таблицу 7). На расширенном наборе данных лучшие результаты были получены при работе с классификаторами на основе случайного леса ($F_1 = 0.974$, см. таблицу 13) и логистической регрессии ($F_1 = 0.982$, см. таблицу 14), что не уступает результатам, приведенным в таблице 16.

Таблица 16. Точность построенных классификаторов в исследованиях, упоминающихся в литературном обзоре

Наименование литературного источника	Анализируемый в работе набор данных	Оценка качества классификатора
Wang Y.-C., Li M.-T., Pan Z.-C., Zheng J.-H. Pulsar candidate classification with deep convolutional neural networks [4]	Информация о трех пульсарах и искусственно сгенерированные примеры	$accuracy > 0.9$
Wang L., Jin J., Jiang Y., Shen Y. A Method for weak pulsar signal detection combining the bispectrum and a deep convolutional neural network [5]	Классификация пульсаров на основе набора данных Predicting a pulsar star [23]	$F_1 = 0.96$
Vasconcellos E.C., de Carvalho R.R., Gal R.R., LaBarbera F.L., Capelato H.V., Frago Campos Velho H., Trevisan M., Ruiz R.S.R. Decision tree classifiers for star/galaxy separation [8]	Классификация квазаров на основе набора данных Digital Sky Survey DR7 [19]	Полнота (recall) в трех разных диапазонах звездных величин: >99%, 68 – 85%, 42 – 74%

Окончание табл. 16

Наименование литературного источника	Анализируемый в работе набор данных	Оценка качества классификатора
Saz Parkinson P.M., Xu H., Yu P.L.H., Salvetti D., Marelli M., Falcone A.D. Classification and ranking of Fermi-Lat gamma-ray sources from the 3FGL catalog using machine learning techniques [11]	Многоклассовая классификация источников (пульсары, квазары, сверхновые и туманности, двойные системы и другие объекты из каталога Fermi-LAT 3FGL Catalog) [20]	$accuracy = 0.96$
Farrell S.A., Murphy T., Lo K.K. Autoclassification of the variable 3xmm sources using the random forest machine learning algorithm [12]	Многоклассовая классификация источников (двойные системы, пульсары и другие объекты из каталога 3XMM) [24]	$accuracy = 0.96$
Richards G.T., <i>et al.</i> Efficient photometric selection of quasars from the Sloan digital sky survey: 100,000 $z < 3$ quasars from data release one [14]	Классификация квазаров на основе набора данных Digital Sky Survey DR1 [25]	$accuracy = 0.95$
Richards G.T., <i>et al.</i> Bayesian high-redshift quasar classification from optical and mid-ir photometry [15]	Классификация квазаров на основе набора данных Digital Sky Survey DR3 [26] и графической информации набора данных AllWise [27]	$accuracy = 0.93$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленном исследовании проведена обработка набора данных Sloan Digital Sky Survey DR14 (kaggle.com) по классификации астрономических объектов на квазары, галактики и звезды. Построено несколько простых классификаторов, основанных на решающих деревьях, логистической регрессии, а также «наивный» байесовский классификатор. На следующем этапе были применены ансамбли классификаторов: случайный лес, градиентный бустинг. В ходе литературного обзора выявлено множество работ, в которых аналогичные задачи решаются на основе нейронных сетей различных конфигураций и сложности [4, 5, 13]. Результаты, полученные в этом исследовании, показывают, что для решения подобной задачи достаточно использовать наиболее простые алгоритмы машинного обучения. Точность построенных в исследовании классификаторов сравнивалась с характеристиками классификаторов, построенных в работах [4, 5, 8, 11, 12, 14, 15]. Максимальная точность достигнута при настройке классификатора на основе логистической регрессии – $F_1 = 98\%$, что не уступает результатам, полученным в исследованных работах.

Задача классификации была решена с помощью нескольких простых моделей. Основной проблемой стало разделение галактик и квазаров. Большинство алгоритмов распознано практически все звезды в тренировочных наборах верно. Решающее дерево и логистическая регрессия показали результат в 100%

при определении звезд. Средние значения метрик классификации превосходят 94%. По этой причине было решено не строить классификатор на основе случайного леса.

Далее галактики и квазары были выделены в отдельный набор данных, и решалась задача бинарной классификации. Наилучший результат показала логистическая регрессия – $F_1 = 98\%$. При обработке данных стало ясно, что построить классификатор с точностью 100% в этой задаче не получится. С одной стороны, применение метода главных компонент показало (рис. 1–3), что объекты перемешаны в пространстве признаков. Введение вторых степеней параметров, их попарных произведений, логарифмов, применение метода главных компонент (с ядром и без) не изменило эту ситуацию (рис. 4–13). С точки зрения физики, свет квазаров можно выделить на основе анализа частотных характеристик (высокий эксцесс, куртозис). Исследуемый набор данных [16] (в отличие от [21]) не содержит этих величин. При добавлении в набор данных соответствующей информации построение классификаторов с точностью 100% представляется возможным.

С методической точки зрения представленная работа может служить учебным пособием при построении простых классификаторов и часто применяемых на практике ансамблей классификаторов.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Finch A., Said J.L. Galactic rotation dynamics in $f(T)$ gravity. *Eur. Phys. J. C.* 2018;78:560. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-018-6028-1>
2. Садовникова Е.В., Шатина А.В. Эволюция вращательного движения спутника с гибкими вязкоупругими стержнями на эллиптической орбите. *Российский технологический журнал.* 2018;6(4):89–104. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-4-89-104> [Sadovnikova E.V., Shatina A.V. Evolution of the rotational motion of a satellite with flexible viscoelastic rods on the elliptic orbit. *Rossiiskii Tekhnologicheskii Zhurnal = Russian Technological Journal.* 2018;6(4):89–104 (in Russ.).]
3. Lee K.J., Stovall K., Jenet F.A., *et al.* PEACE: pulsar evaluation algorithm for candidate extraction – a software package for post-analysis processing of pulsar survey candidates. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2013;433(1):688–694. <https://doi.org/10.1093/mnras/stt758>
4. Wang Y.-C., Li M.-T., Pan Z.-C., Zheng J.-H. Pulsar candidate classification with deep convolutional neural networks. *Res. Astron. Astrophys.* 2019;19(9):133. <https://doi.org/10.1088/1674-4527/19/9/133>
5. Wang L., Jin J., Jiang Y., Shen Y. A Method for weak pulsar signal detection combining the bispectrum and a deep convolutional neural network. *Astrophys. J.* 2019;873(1):17. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab0308>
6. Zhu W.W., Berndsten A., Madsen E.C., *et al.* Searching for pulsars using image pattern recognition. *Astrophys. J.* 2014;781(2):117. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/781/2/117>
7. Abbott B.P., Abbot R., Abbott T.D., *et al.* Gravitational waves and gamma-rays from a binary neutron star merger: GW170817 and GRB 170817A. *Astrophys. J. Lett.* 2017;848(2):L13. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa920c>
8. Vasconcellos E.C., de Carvalho R.R., Gal R.R., LaBarbera F.L., Capelato H.V., Frago Campos Velho H., Trevisan M., Ruiz R.S.R. Decision tree classifiers for star/galaxy separation. *Astrophys. J.* 2011;141(6):189. <https://doi.org/10.1088/0004-6256/141/6/189>
9. Ball N.M., Brunner R.J., Myers A.D. Robust machine learning applied to astronomical data sets. I. Star-galaxy classification of the Sloan digital sky survey DR3 using decision trees. *Astrophys. J.* 2006;650(1):497–509. <https://doi.org/10.1086/507440>
10. Ackermann M., Ajello M., Allafort A., *et al.* A statistical approach to recognizing source classes for unassociated sources in the first Fermi-LAT catalog. *Astrophys. J.* 2012;753(1):83. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/753/1/83>
11. Saz Parkinson P.M., Xu H., Yu P.L. H., Salvetti D., Marelli M., Falcone A.D. Classification and ranking of Fermi-LAT gamma-ray sources from the 3FGL catalog using machine learning techniques. *Astrophys. J.* 2016;820(1):8. <https://doi.org/10.3847/0004-637X/820/1/8>
12. Farrell S.A., Murphy T., Lo K.K. Autoclassification of the variable 3XMM sources using the random forest machine learning algorithm. *Astrophys. J.* 2015;813(1):28. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/813/1/28>
13. Weaver W.B. Spectral classification of unresolved binary stars with artificial neural networks. *Astrophys. J.* 2000;541(1):298–305. <https://doi.org/10.1086/309425>
14. Richards G.T., Nichol R.C., Gray A., *et al.* Efficient photometric selection of quasars from the Sloan digital sky survey: 100,000 $z < 3$ quasars from data release one. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2004;155(2):257–269. <https://doi.org/10.1086/425356>
15. Richards G.T., Myers A.D., Peters C.M., *et al.* Bayesian high-redshift quasar classification from optical and mid-ir photometry. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2015;219(2):39. <https://doi.org/10.1088/0067-0049/219/2/39>
16. Sloan Digital Sky Survey DR14. Classification of stars, galaxies and quasars. Available from URL: <https://www.kaggle.com/lucidlenn/sloan-digital-sky-survey>
17. James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R. *An introduction to statistical learning with applications in R.* New York: Springer-Verlag; 2015. 426 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7138-7>
18. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The elements of statistical learning.* 2nd ed. New York: Springer-Verlag; 2009. 763 p. ISBN 978-0-387-84857-0
19. Sloan digital sky survey data release 7. Available from URL: <http://classic.sdss.org/dr7>
20. Fermi-LAT 3FGL Catalog. Available from URL: https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/4yr_catalog/3FGL-table/#aitoff
21. Davis J., Goadrich M. The relationship between precision-recall and ROC curves. In: *Proceedings of the 23rd International Conference on Machine Learning.* Pittsburgh, PA, USA; 2006, p. 233–240. <https://doi.org/10.1145/1143844.1143874>
22. Breiman L., Friedman J.H., Olshen R.A., Stone C.J. *Classification and regression trees.* Monterey, CA, USA: Wadsworth & Brooks/Cole Advanced Books & Software; 1984. 358 p. ISBN: 0534980548
23. Predicting a pulsar star. Available from URL: <https://www.kaggle.com/pavanraj159/predicting-a-pulsar-star>
24. VizieR online data catalog: XMM-Newton Serendipitous Source Catalogue 3XMM-DR8 (XMM-SSC, 2018). Available from URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019yCat.9055...0R/abstract>
25. Sloan digital sky survey data release 1. Available from URL: <http://classic.sdss.org/dr1/>
26. Sloan digital sky survey data release 3. Available from URL: <http://classic.sdss.org/dr3/>
27. The wide-field infrared survey explorer at IPAC. The AllWise Data Release. Available from URL: <http://wise2.ipac.caltech.edu/docs/release/allwise/>

Об авторах

Голов Владислав Александрович, студент группы КМБ-01-16 кафедры высшей математики Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: golov.v.a@yandex.ru.

Петрусевич Денис Андреевич, к.ф.-м.н., доцент кафедры высшей математики Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: petrusevich@mirea.ru, petrdenis@mail.ru. ResearcherID: AAA-6661-2020, Scopus Author ID: 55900513600, <https://orcid.org/0000-0001-5325-6198>

About the authors

Vladislav A. Golov, Student, Higher Mathematics Department, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: golov.v.a@yandex.ru.

Denis A. Petrusevich, Cand. Sci. (Phys.–Math.), Associate Professor, Higher Mathematics Department, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: petrusevich@mirea.ru, petrdenis@mail.ru. ResearcherID: AAA-6661-2020, Scopus Author ID: 55900513600, <https://orcid.org/0000-0001-5325-6198>

Математическое моделирование
Mathematical modeling

УДК 629.78

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-78-87>

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Синтез программных угловых движений космического аппарата дистанционного зондирования Земли с высоким пространственным разрешением

С.Ю. Горчаков[®]

АО «Корпорация «ВНИИЭМ», Москва, 107078 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: SYGorchakov@yandex.ru

Резюме. Рассматривается космический аппарат дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) со съемочной оптико-электронной аппаратурой высокого или сверхвысокого разрешений. В процессе съемки регистрируемое изображение постоянно перемещается по матрице фотоприемника с непостоянной и/или избыточной скоростью, неподходящей для данного фотоприемника. Цель статьи состоит в синтезе способа управления ориентацией и стабилизацией КА ДЗЗ, который позволит обеспечить строго заданную скорость движения изображения на фотоприемнике. Предлагается отыскать такой закон движения (функциональные зависимости угловых скоростей КА ДЗЗ от времени), который позволит при его применении в контуре управления компенсировать неподходящие для данного фотоприемника скорости движения изображения. Используемый метод состоит в дифференцировании по времени фундаментального уравнения космической фотограмметрии в направляющих косинусах, а также в дифференцировании матрицы направляющих косинусов, обеспечивающей переход между направляющими косинусами в пространстве изображений и пространстве предметов. Полученный в статье результат – выведенное уравнение космической фотограмметрии в кинематическом виде, а также функциональные зависимости угловых скоростей от времени. В представленной статье составлена математическая модель сканирования изображений ландшафтов Земли с помощью КА ДЗЗ. Полученные функциональные зависимости могут быть применимы при разработке бортовых алгоритмов управления ориентацией и стабилизацией КА ДЗЗ. При реализации в бортовой вычислительной машине управления ориентацией и стабилизацией по полученным функциональным зависимостям может быть обеспечена строго заданная скорость движения изображения в фокальной плоскости бортовой съемочной аппаратуры, а, следовательно, повышено качество сканированного изображения путем улучшения функции передачи модуляции кинематического «смаза» изображения.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, космический аппарат, изображения ландшафтов Земли, математическая модель, компенсация кинематического смаза изображения, угловая скорость

• Поступила: 20.11.2020 • Доработана: 10.12.2020 • Принята к опубликованию: 25.02.2021

Для цитирования: Горчаков С.Ю. Синтез программных угловых движений космического аппарата дистанционного зондирования Земли с высоким пространственным разрешением. *Российский технологический журнал*. 2021;9(3):78–87. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-78-87>

Прозрачность финансовой деятельности: Автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Synthesis of program angular motions of the Earth remote sensing spacecraft with high spatial resolution

Sergey Yu. Gorchakov[@]

VNIEM Corporation, Moscow, 107078 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: SYGorchakov@yandex.ru

Abstract. The article considers a spacecraft for remote sensing of the Earth with high-resolution or ultra-high-resolution optical-electronic equipment. During the shooting process, the recorded image constantly moves through the photodetector matrix at a non-constant and/or excessive velocity, which is not suitable for this photodetector. The purpose of the article is to synthesize a method for the control of the orientation and stabilization of the remote sensing spacecraft, which will provide a strictly specified velocity of the image motion on the photodetector. It is proposed to find such a law of motion (functional dependences of the angular rate of the remote sensing spacecraft on time), which will allow, when applied in the control loop, to compensate for the image motion velocities that are unsuitable for this photodetector. The method used consists in time differentiation of the fundamental equation of space photogrammetry in the guiding cosines, as well as in differentiation of the matrix of guiding cosines. This provides a transition between the guiding cosines in the space of images and the space of objects. The result obtained in the article is the derived equation of space photogrammetry in kinematic form, as well as the functional dependences of angular rate on time. In the present article, a mathematical model of scanning images of the Earth's landscapes with the help of remote sensing spacecraft is compiled. The obtained functional dependences can be applied in the development of on-board algorithms for controlling the orientation and stabilization of the remote sensing spacecraft. When implementing orientation and stabilization control in the on-board computer based on the obtained functional dependencies, a strictly specified speed of image movement in the focal plane of the on-board shooting equipment can be provided, and, consequently, the quality of the scanned image is improved by improving the function of transmitting the modulation of the kinematic "smudge" (blurring) of the image.

Keywords: remote sensing of the Earth, spacecraft, images of Earth landscapes, mathematical model, compensation of kinematic image blurring, angular velocity

• Submitted: 20.11.2020 • Revised: 10.12.2020 • Accepted: 25.02.2021

For citation: Gorchakov S.Yu. Synthesis of program angular motions of the Earth remote sensing spacecraft with high spatial resolution. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(3):78–87 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-78-87>

Financial disclosure: The author has no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The author declares no conflicts of interest.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ИСК – Инерциальная система координат
ВСК – Визирная система координат
ИЛЗ – Изображения ландшафтов Земли
КА – Космический аппарат
СДИ – Скорость движения изображения
ФП – Фокальная плоскость
ФПЗС – Фотоприемник с зарядовой связью
БОЭА – Бортовая оптико-электронная аппаратура
ВЗН – Временная задержка накопления
ИД – Исходные данные
ПЗ-90.11 – Параметры Земли 1990 г.
ОЗЭ – Общеземной эллипсоид
БКУ – Бортовой комплекс управления

СУОС – Система управления ориентацией и стабилизацией

ВВЕДЕНИЕ

Получение изображений ландшафтов Земли высокого и сверхвысокого пространственного разрешения с помощью бортовой съемочной оптико-электронной аппаратуры (БОЭА), установленной на космических аппаратах дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ), с заданными геометрическими, спектральными и радиометрическими характеристиками требует вычислений и реализации параметров ориентации и стабилизации КА ДЗЗ с применением специальных алгоритмов [1–5].

Для регистрации изображений ландшафтов Земли, пространственное разрешение которых находится в диапазоне 0.25–1 м, необходимо задавать с помощью исполнительных органов КА ДЗЗ такие программные угловые движения осей фокальной поверхности БОЭА на протяжении сканирования маршрута съемки, чтобы величина допустимого сдвига изображения за время накопления заряда на фотоприемнике с зарядовой связью не превышала 1/3 пиксела [6]. Регистрация изображений ландшафтов Земли без заданных программных угловых движений может приводить к значительному кинематическому «смазу» изображения, ухудшению его геометрических и радиометрических свойств. При этом регистрация изображений ландшафтов Земли с малой для данного фотоприемника скоростью движения изображения может породить местно «пересвеченное» изображение, блуминг, снизить соотношение сигнал/шум, контрастность, детальность. Реализация излишне высокой скорости движения изображения породит «смаз», а отношение сигнал/шум может оказаться недостаточным, что породит структурные искажения изображения и потери в разрешении [6].

Далее в статье приводится вывод таких функциональных зависимостей для обеспечения программных угловых движений осей фокальной поверхности БОЭА КА ДЗЗ.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим задачу, в которой визирная система координат (ВСК) фокальной поверхности (ФП) БОЭА (рис. 1) во время регистрации изображений ландшафтов Земли (ИЛЗ) в целях компенсации поперечного «смаза» (поперек строк фотоприемника с зарядовой связью (ФПЗС)) и обеспечения строго заданного движения зарядовых пакетов вдоль строк ФПЗС должна совершать вращательное движение относительно инерциальной системы координат (ИСК) с угловой скоростью $\vec{W}(t)$, которая рассматривается в ВСК.

Необходимо определить функциональную зависимость угловой скорости $\vec{W}(t)$ от времени на протяжении сканирования маршрута съемки (МС).

Будем считать, что КА – точка,двигающаяся по Кеплеровой орбите вокруг Земли; модель Земли – общеземной эллипсоид (ОЗЭ) с параметрами ПЗ-90.11.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ. СИСТЕМЫ КООРДИНАТ

Введем следующие системы отсчета (СО) и системы координат (СК) для верного и наиболее точного преобразования используемых в настоящей статье векторов.

Таблица 1. Описание используемых СО и СК

Обозначение	Название	Краткое описание
ИСК	Инерциальная система координат	Начало ИСК совпадает с центром ОЗЭ, ось Z направлена в северный полюс мира, ось X расположена в плоскости экватора и направлена в точку весеннего равноденствия γ , ось Y дополняет систему до правой. Полюс мира и точка весеннего равноденствия не сохраняют неизменными свое положение в пространстве с течением времени, поэтому для фиксирования инерциальной системы координат принимают стандартную эпоху J2000.0 [7, 8]
ГСК	Гринвичская система координат	Прямоугольная система координат XYZ , имеющая начало в центре масс Земли. Вращается вместе с Землей. Ось Z направлена к Международному условному началу. Ось X лежит в плоскости среднего гринвичского меридиана и определяет положение нуля-пункта принятой системы счета долгот. Ось Y дополняет систему XYZ до правой [7, 8]
ПЗ-90.11	Общеземная система отсчета. Параметры Земли	По уровню точности, ориентации осей координат и положению их начала ПЗ-90.11 соответствует ITRS и ITRF [9]. Описание перехода между ITRS и ПЗ-90.11 дано в [9]
ТСК	Транспортирующая система координат	Начало СК располагается в центре масс КА. Является подвижной орбитальной системой координат (ОСК). Реализуется следующим образом: - ось r (радиаль) направлена в положительном направлении радиус-вектора центра масс КА, - ось n (трансверсаль) лежит в плоскости орбиты, образует с осью r прямой угол и направлена в сторону вектора орбитальной скорости центра масс КА, - ось b (бинормаль) дополняет ТСК до правой ортогональной. Погрешности знания осей ТСК определяются погрешностями определения компонент вектора состояния КА

Окончание табл. 1

Обозначение	Название	Краткое описание
ССК	Связанная система координат КА	Начало СК располагается в центре масс КА. Реализуется следующим образом [10]: - ось X направлена от хвостовой к носовой части КА, - ось Y находится направлена к верхней части КА, - ось Z дополняет СК до правой. Оси ССК жестко связаны с конструкцией КА
ВСК	Визирная система координат ФП БОЭА	Подвижная СК. Начало СК располагается в центре ФП. Оси ВСК жестко связаны с конструкцией ФП и материализуются следующим образом: - ось X направлена вдоль ФП, - ось Y направлена поперек ФП, - ось Z направлена по нормали к ФП

Изобразим основные векторы и орты СК, используемые в поставленной задаче. На рис. 1 показано направление основных векторов скорости и ортов ВСК ФП во время сканирования МС.

Для дальнейшего изложения способа решения поставленной задачи и алгоритма зададим исходные данные, представленные в таблице 2.

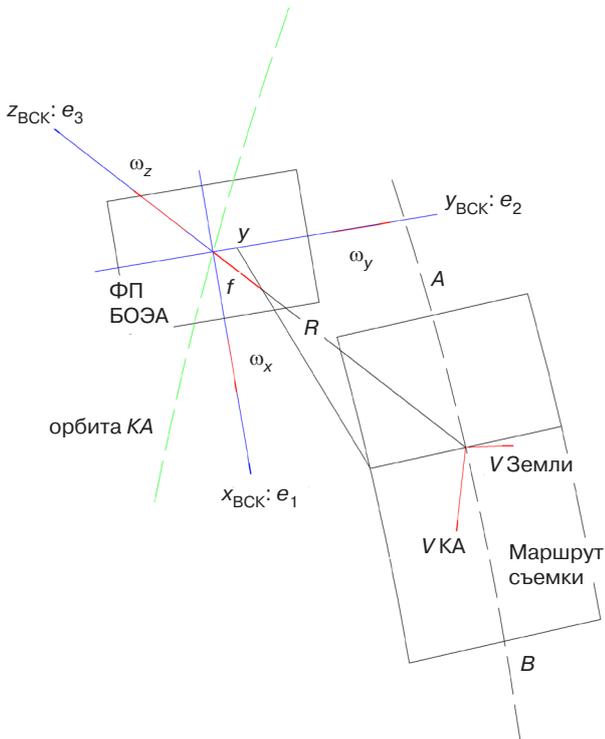


Рис. 1. Направление основных векторов скорости и ортов ВСК во время сканирования МС

Таблица 2. Исходные данные

№, п/п	Название	Обозначение	Размерность
1	Скорость вращения ОЗЭ (ПЗ-90.11)	$w_E = 7292115.0 \cdot 10^{-11}$	рад/с
2	Большая полуось ОЗЭ (ПЗ-90.11)	$a = 6378136$	м
3	Сжатие ОЗЭ (ПЗ-90.11)	$\alpha = 1 / 298.25784$	–
4	Полуразмеры ФП БОЭА	x, y	м
5	Фокусное расстояние БОЭА	f	м
6	Вектор направления на некоторый пиксел j ФПЗС	$\vec{r}_{ВСК} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix}$	м
7	Радиус-вектор КА в ИСК	$\vec{R}_{КА} = \begin{bmatrix} X_{КА} \\ Y_{КА} \\ Z_{КА} \end{bmatrix}$	м
8	Вектор скорости КА в ИСК	$\frac{d}{dt} \vec{R}_{КА} = \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} X_{КА} \\ \frac{d}{dt} Y_{КА} \\ \frac{d}{dt} Z_{КА} \end{bmatrix}$	м/с
9	Координаты пересечения ВО БОЭА и поверхности ПЗ-90.11	$\vec{R}_j = \begin{bmatrix} X_j \\ Y_j \\ Z_j \end{bmatrix}$	м
10	Кососимметричная матрица угловой скорости вокруг ортов ВСК	$\mathbf{W}_x = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix}$	рад/с

ФУНДАМЕНТАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ФОТОГРАММЕТРИИ

В [11] приведено основное уравнение космической фотограмметрии, определяющее связь между векторами в пространстве изображений (в ВСК) и пространстве предметов (в ИСК), которое записывается в следующем виде:

$$\vec{r}_{ВСК} = \frac{|\vec{r}_{ВСК}|}{|\Delta \vec{R}_{ИСК}|} \cdot \mathbf{A} \cdot \Delta \vec{R}_{ИСК}, \quad (1)$$

где $\vec{r}_{ВСК} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix}$ – вектор, соединяющий точку, лежащую на длине фокусного расстояния f , и точку на ФП (j -й пиксел ФПЗС); f – фокусное расстояние БОЭА; x ,

щую на длине фокусного расстояния f , и точку на ФП (j -й пиксел ФПЗС); f – фокусное расстояние БОЭА; x ,

y – координаты j -го пиксела ФПЗС; $\Delta\vec{R}_{ИСК} = \vec{R}_j - \vec{R}_{КА}$ – вектор в ИСК, направленный от центра масс КА до точки пересечения с поверхностью ОЗЭ ПЗ-90.11;

$$\mathbf{A} = [\vec{e}_1 \quad \vec{e}_2 \quad \vec{e}_3] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \text{ – матрица на-}$$

правляющих косинусов, определяющая взаимный переход между ИСК и ВСК.

Уравнение (1) записано в статическом виде (векторы неизменны – одномоментная регистрация изображения). В действительности, указанные в (1) векторы и матрица являются функциями от времени, так как регистрация ИЛЗ происходит на протяженном МС. Вектор $\vec{r}_{ВСК}$ меняется в процессе регистрации ИЛЗ (точка снимаемого изображения перемещается по ФП за время экспонирования ФПЗС). Вектор $\Delta\vec{R}_{ИСК}$, направленный от центра масс КА до точки пересечения с поверхностью Земли, также меняется. Меняется и матрица \mathbf{A} , так как КА ДЗЗ совершает угловое движение в ИСК (относительно центра масс КА ДЗЗ) (ВСК совершает угловое движение относительно ИСК).

Для дальнейших рассуждений перепишем уравнение (1) через направляющие косинусы:

$$\vec{l}_{ВСК} = \mathbf{A} \cdot \vec{L}_{ИСК}, \quad (2)$$

где $\vec{l}_{ВСК} = \frac{\vec{r}_{ВСК}}{|\vec{r}_{ВСК}|}$ – направляющие косинусы для

вектора $\vec{r}_{ВСК}$; $\vec{L}_{ИСК} = \frac{\Delta\vec{R}_{ИСК}}{|\Delta\vec{R}_{ИСК}|}$ – направляющие

косинусы для вектора $\Delta\vec{R}_{ИСК}$.

Так как вектор $\vec{r}_{ВСК}$ меняется во времени (изображение перемещается по ФПЗС), то и сами направляющие косинусы $\vec{l}_{ВСК}$ являются переменными в процессе съемки. Для направляющих косинусов $\vec{L}_{ИСК}$ рассуждения аналогичны: так как вектор $\Delta\vec{R}_{ИСК}$ меняется во времени (КА ДЗЗ движется по орбите, снимаемая поверхность Земли также перемещается вследствие вращения Земли), то и сами $\vec{L}_{ИСК}$ также являются переменными.

В отличие от [12], где решается задача определения поля векторов скоростей движения изображения (СДИ) по уже известным законам движения КА ДЗЗ по орбите, вращения Земли и, главное, углового движения КА ДЗЗ относительно собственного центра масс, т.е. уже известной угловой скорости вращения ВСК относительно ИСК, в настоящей статье ставится задача обеспечения за счет вращения КА ДЗЗ требуемой (заданной) СДИ, т.е. задача определения угловых скоростей ВСК относительно ИСК. Требования к поддержанию заданной СДИ исходят из особенностей функционирования ФПЗС с

временной задержкой накопления (ВЗН), а именно для таких ФПЗС существует определенно заданный набор шагов накопления. По этой причине требуется обеспечивать, например, за счет вращения КА ДЗЗ такие величины модулей и направления векторов СДИ по полю фотоприемника БОЭА.

Из уравнения (2) путем дифференцирования выведем основное уравнение космической фотограмметрии в кинематическом виде:

$$\frac{d}{dt} \vec{l}_{ВСК} = \frac{d}{dt} \mathbf{A} \cdot \vec{L}_{ИСК} + \mathbf{A} \cdot \frac{d}{dt} \vec{L}_{ИСК}, \quad (3)$$

где $\frac{d}{dt} \vec{l}_{ВСК}$ – производная единичного вектора $\vec{l}_{ВСК}$;

$\frac{d}{dt} \mathbf{A}$ – производная матрицы направляющих косинусов; $\frac{d}{dt} \vec{L}_{ИСК}$ – производная единичного вектора, определяющая направление скорости перемещения регистрируемой точки на поверхности ОЗЭ в ИСК.

Определим производные направляющих косинусов $\frac{d}{dt} \vec{l}_{ВСК}$ через требуемую (заданную) СДИ на j -м пикселе $\frac{d}{dt} \vec{r}_{ВСК}$. Т.к. $\vec{r}_{ВСК} = \vec{l}_{ВСК} \cdot |\vec{r}_{ВСК}|$, то:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \vec{r}_{ВСК} &= \frac{d}{dt} \vec{l}_{ВСК} \cdot |\vec{r}_{ВСК}| + \vec{l}_{ВСК} \cdot \frac{d}{dt} |\vec{r}_{ВСК}| \rightarrow \\ \frac{d}{dt} \vec{l}_{ВСК} &= \frac{\frac{d}{dt} \vec{r}_{ВСК} - \vec{l}_{ВСК} \cdot \frac{d}{dt} |\vec{r}_{ВСК}|}{|\vec{r}_{ВСК}|}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\frac{d}{dt} \vec{r}_{ВСК}$ – требуемая СДИ на j -м пикселе;

$\frac{d}{dt} |\vec{r}_{ВСК}|$ – производная модуля вектора $\vec{r}_{ВСК}$.

Определим производные направляющих косинусов $\frac{d}{dt} \vec{L}_{ИСК}$ через скорость перемещения регистрируемой точки на поверхности ОЗЭ в ИСК $\frac{d}{dt} \Delta\vec{R}_{ИСК}$.

Т.к. $\Delta\vec{R}_{ИСК} = \vec{L}_{ИСК} \cdot |\Delta\vec{R}_{ИСК}|$, то:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Delta\vec{R}_{ИСК} &= \frac{d}{dt} \vec{L}_{ИСК} \cdot |\Delta\vec{R}_{ИСК}| + \vec{L}_{ИСК} \cdot \frac{d}{dt} |\Delta\vec{R}_{ИСК}| \rightarrow \\ \frac{d}{dt} \vec{L}_{ИСК} &= \frac{\frac{d}{dt} \Delta\vec{R}_{ИСК} - \vec{L}_{ИСК} \cdot \frac{d}{dt} |\Delta\vec{R}_{ИСК}|}{|\Delta\vec{R}_{ИСК}|}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\frac{d}{dt} |\Delta\vec{R}_{ИСК}|$ – производная модуля вектора $\Delta\vec{R}_{ИСК}$.

Из уравнения (3) видно, что производная направляющих косинусов $\frac{d}{dt} \vec{l}_{ВСК}$ обусловлена вращением

самой ВСК относительно ИСК (первое слагаемое) и изменением производной направляющих косинусов $\frac{d}{dt} \bar{L}_{ИСК}$ в ИСК (второе слагаемое).

Входящая в уравнение (3) производная от матрицы направляющих косинусов может быть определена как [13, 14]:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{A} = -\mathbf{W}_x \cdot \mathbf{A}. \quad (6)$$

Тогда уравнение (3) будет иметь следующий вид:

$$\frac{d}{dt} \bar{l}_{ВСК} = -\mathbf{W}_x \cdot \mathbf{A} \cdot \bar{L}_{ИСК} + \mathbf{A} \cdot \frac{d}{dt} \bar{L}_{ИСК}. \quad (7)$$

Путем подстановки в полученное уравнение зависимости (6) получим:

$$\frac{d}{dt} \bar{l}_{ВСК} = -\mathbf{W}_x \cdot \bar{l}_{ВСК} + \mathbf{A} \cdot \frac{d}{dt} \bar{L}_{ИСК}. \quad (8)$$

Перепишем уравнение (8) в следующем виде:

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} l_{ВСК}^x \\ l_{ВСК}^y \\ l_{ВСК}^z \end{bmatrix} = \\ & = \begin{bmatrix} 0 & \omega_z & -\omega_y \\ -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} l_{ВСК}^x \\ l_{ВСК}^y \\ l_{ВСК}^z \end{bmatrix} + \\ & + \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{ИСК}^x \\ L_{ИСК}^y \\ L_{ИСК}^z \end{bmatrix}. \quad (9) \end{aligned}$$

Уравнение (9) назовем основным уравнением космической фотограмметрии в кинематическом виде. Для определения угловых скоростей ω_x , ω_y , ω_z далее рассмотрим частные случаи решения этого уравнения.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ ФП БОЭА ОТНОСИТЕЛЬНО ВСК

А) *Случай центра ФП*

Для центра ФП БОЭА имеем:

$$\bar{l}_{ВСК} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_{ВСК}^z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Тогда уравнение (9) можно записать в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} l_{ВСК}^x = -\omega_y \cdot l_{ВСК}^z + a_{11} \cdot \frac{d}{dt} L_{ИСК}^x + \\ \quad + a_{12} \cdot \frac{d}{dt} L_{ИСК}^y + a_{13} \cdot \frac{d}{dt} L_{ИСК}^z, \\ \frac{d}{dt} l_{ВСК}^y = \omega_x \cdot l_{ВСК}^z + a_{21} \cdot \frac{d}{dt} L_{ИСК}^x + \\ \quad + a_{22} \cdot \frac{d}{dt} L_{ИСК}^y + a_{23} \cdot \frac{d}{dt} L_{ИСК}^z, \\ \frac{d}{dt} l_{ВСК}^z = a_{31} \cdot \frac{d}{dt} L_{ИСК}^x + a_{32} \cdot \frac{d}{dt} L_{ИСК}^y + \\ \quad + a_{33} \cdot \frac{d}{dt} L_{ИСК}^z, \end{cases} \quad (11)$$

где ω_x – проекция угловой скорости вращения на ось x ВСК; ω_y – проекция угловой скорости вращения на ось y ВСК; a_{ij} – компоненты матрицы направляющих косинусов \mathbf{A} .

Отсюда найдем проекцию угловой скорости вращения на оси \bar{e}_1 и \bar{e}_2 :

$$\begin{cases} \omega_y = \frac{-\frac{d}{dt} l_{ВСК}^x + M_1}{l_{ВСК}^z}, \\ \omega_x = \frac{\frac{d}{dt} l_{ВСК}^y - M_2}{l_{ВСК}^z}, \end{cases} \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} M_1 &= a_{11} \cdot \frac{d}{dt} L_{ИСК}^x + \\ &+ a_{12} \cdot \frac{d}{dt} L_{ИСК}^y + a_{13} \cdot \frac{d}{dt} L_{ИСК}^z, \\ M_2 &= a_{21} \cdot \frac{d}{dt} L_{ИСК}^x + \\ &+ a_{22} \cdot \frac{d}{dt} L_{ИСК}^y + a_{23} \cdot \frac{d}{dt} L_{ИСК}^z. \end{aligned}$$

После преобразований с использованием (10) получим:

$$\begin{cases} \omega_y = \frac{d}{dt} l_{ВСК}^x - M_1, \\ \omega_x = \frac{d}{dt} l_{ВСК}^y + M_2. \end{cases} \quad (13)$$

Б) *Случай правого края ФП*

Направляющие косинусы пиксела правого края, лежащего на оси y ВСК, можно записать в виде:

$$\bar{l}_{ВСК} = \begin{bmatrix} 0 \\ l_{ВСК}^y \\ l_{ВСК}^z \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Тогда уравнение (9) можно записать следующим образом:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} l_{\text{ВСК}}^x \\ l_{\text{ВСК}}^y \\ l_{\text{ВСК}}^z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_z & -\omega_y \\ -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ l_{\text{ВСК}}^y \\ l_{\text{ВСК}}^z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{\text{ИСК}}^{xR} \\ L_{\text{ИСК}}^{yR} \\ L_{\text{ИСК}}^{zR} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

После преобразований получим:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d}{dt} l_{\text{ВСК}}^x &= \omega_z \cdot l_{\text{ВСК}}^y - \omega_y \cdot l_{\text{ВСК}}^z + \\ &+ a_{11} \cdot \frac{d}{dt} L_{\text{ИСК}}^{xR} + a_{12} \cdot \frac{d}{dt} L_{\text{ИСК}}^{yR} + a_{13} \cdot \frac{d}{dt} L_{\text{ИСК}}^{zR}, \\ \frac{d}{dt} l_{\text{ВСК}}^y &= \omega_x \cdot l_{\text{ВСК}}^z + a_{21} \cdot \frac{d}{dt} L_{\text{ИСК}}^{xR} + \\ &+ a_{22} \cdot \frac{d}{dt} L_{\text{ИСК}}^{yR} + a_{23} \cdot \frac{d}{dt} L_{\text{ИСК}}^{zR}, \\ \frac{d}{dt} l_{\text{ВСК}}^z &= \omega_x \cdot l_{\text{ВСК}}^y + a_{31} \cdot \frac{d}{dt} L_{\text{ИСК}}^{xR} + \\ &+ a_{32} \cdot \frac{d}{dt} L_{\text{ИСК}}^{yR} + a_{33} \cdot \frac{d}{dt} L_{\text{ИСК}}^{zR}, \end{aligned} \right. \quad (16)$$

где ω_z – проекция угловой скорости вращения на ось z ВСК, а ω_y , ω_x найдем из системы уравнений для центра ФП.

Из полученного уравнения найдем угловую скорость вращения ω_z для определения закона движения КА ДЗЗ вокруг оси z ВСК при сканировании МС:

$$\omega_z = \frac{\frac{d}{dt} l_{\text{ВСК}}^x + \omega_y \cdot l_{\text{ВСК}}^z - M_1^R}{l_{\text{ВСК}}^y}, \quad (17)$$

где

$$M_1^R = a_{11} \cdot \frac{d}{dt} L_{\text{ИСК}}^{xR} + a_{12} \cdot \frac{d}{dt} L_{\text{ИСК}}^{yR} + a_{13} \cdot \frac{d}{dt} L_{\text{ИСК}}^{zR};$$

$L_{\text{ИСК}}^{iR}$ – направляющие косинусы вектора $\vec{\Delta R}_{\text{ИСК}}$ с правого края ФП.

При подстановке в (17) зависимости для определения угловой скорости ω_y из уравнения (13) получим:

$$\omega_z = \frac{\frac{d}{dt} l_{\text{ВСК}}^x + \left(\frac{d}{dt} l_{\text{ВСК}}^x - M_1 \right) \cdot l_{\text{ВСК}}^z - M_1^R}{l_{\text{ВСК}}^y}. \quad (18)$$

Таким образом, выведены функциональные зависимости угловых скоростей ω_x , ω_y , ω_z от времени для обеспечения строго заданной СДИ по полю ФПУ БОЭА.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРЕДЛОЖЕННОГО АЛГОРИТМА

Предложенные функциональные зависимости угловой скорости вращения ФП от времени $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ относительно ортов ВСК были запрограммированы в среде MATLAB. Также были запрограммированы: модель орбиты КА по Кеплеру, модель параметры Земли ПЗ-90.11, модель перехода между ИСК, ГСК и ПЗ-90.11, модель перехода между ИСК, ТСК и ВСК. Рассмотрен КА со средней высотой орбиты 400 км. Задана постоянная скорость движения изображения вдоль строк ФПЗС, равная 35.000 мм/с на всем протяжении сканирования МС. Съемка проводится в надир (углы крена, тангажа и рыскания околонулевые). На КА установлена БОЭА с фокусным расстоянием равным 1500.000 мм, при этом ширина ФПУ БОЭА равна 55.000 мм, а длина ФПУ БОЭА равна 200 мм. Проведено моделирование процесса регистрации изображения с КА ДЗЗ со следующими исходными данными (таблица 3).

Таблица 3. Исходные данные для проведения моделирования

Наименование параметра	Размерность	Численное значение
Высота орбиты КА ДЗЗ на момент съемки, H	км	400.000
Скорость перемещения снимаемой точки в ИСК	м/с	7500 – вдоль движения КА ДЗЗ 450 – поперек движения КА ДЗЗ
Фокусное расстояние БОЭА, f	м	1.500
Длина ФПУ	м	0.200
Требуемая СДИ в центре ФП	мм/с	35.000
Требуемая СДИ в правом крае ФП	мм/с	35.000

Скрипт расчета угловых скоростей в среде MATLAB

```
clear; clc; close all
%% задание ИД
IMV_Center = [35*1e-3;0;0];
IMV_Right = [35*1e-3;0;0];
RdotC = [7500;450;0];
RdotR = [7500;450;0];
RC = [0;400*1e3;0];
```

```

RR = [0; 400*1e3; 0];
f = 1.5; % фокусное расстояние
y = 0.2; % длина ФП БОЭА

% вычисление матрицы направляющих косинусов,
% определяющих переход между ИСК и ВСК
e3 = RC/norm(RC);
e2 = cross(RC, RdotC)/norm(cross(RC, RdotC));
e1 = cross(e2, e3);
IF2VF = [e1 e2 e3];

%% случай центра ФП БОЭА
rC = [0; 0; -f];

% вычисление производной направляющих косинусов
% вектора в ВСК для центра ФП БОЭА
absrC = norm(rC);
lC = rC/absrC;
absIMV_Center = norm(IMV_Center);
ldotC = (IMV_Center - lC*absIMV_Center)/absrC;

% вычисление производной направляющих косинусов
% вектора в ИСК для центра ФП БОЭА
absRC = norm(RC);
LC = RC/absRC;
absRdotC = norm(RdotC);
LdotC = (RdotC - LC*absRdotC)/absRC;

% вычисление угловых скоростей
MC = IF2VF * LdotC;
wy = (-ldotC(1) + MC(1))/lC(3);
wx = (ldotC(2) - MC(2))/lC(3);

%% Правый край ФП
rR = [0; -y; -f];

% вычисление производной направляющих косинусов
% вектора в ВСК для правого края ФП БОЭА
absrR = norm(rR);
lR = rR/absrR;
absIMV_Right = norm(IMV_Right);
ldotR = (IMV_Right - lR*absIMV_Right)/absrR;

% вычисление производной направляющих косинусов
% вектора в ИСК для правого края ФП БОЭА
absRR = norm(RR);
LR = RR/absRR;
absRdotR = norm(RdotR);
LdotR = (RdotR - LR*absRdotR)/absRR;

% вычисление угловых скоростей
MR = IF2VF * LdotR;
wz = (ldotR(1) + wy*lR(3) - MR(1))/lR(2);

```

Остальные алгоритмы и программы, включающие алгоритм определения геодезических координат места съемки, алгоритм вычисления орбитального движения КА ДЗЗ, алгоритм вычисления углового движения КА ДЗЗ во время съемки (в том числе вращения ВСК относительно ИСК во времени), алгоритм вычисления дальности до места съемки, в настоящей статье не рассматриваются.

В результате моделирования процесса орбитальной съемки были вычислены необходимые угловые скорости сканирования на время съемки продолжительностью 120 с относительно ортов ВСК, графики которых приведены на рис. 2.

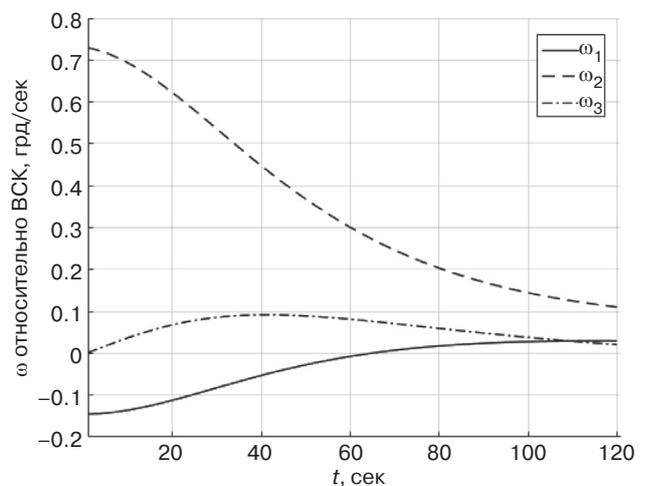


Рис. 2. Угловые скорости относительно ортов ВСК в зависимости от времени сканирования МС

На рис. 2 показаны угловые скорости КА ДЗЗ, требуемые для обеспечения строго заданной СДИ по полю ФП БОЭА. Величина полученных угловых скоростей такова, что может быть отработана исполнительными органами КА ДЗЗ, что говорит о возможности применения на практике предложенного алгоритма при разработке и создании КА ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешений.

ВЫВОДЫ

В статье выведены функциональные зависимости угловой скорости от времени относительно ортов ВСК, необходимые для обеспечения сохранности заданной СДИ по фотоприемнику БОЭА, а, следовательно, и компенсации кинематического «смаза» изображения. Предложенные функциональные зависимости позволяют обеспечивать получение ИЛЗ наилучшего качества с заданными геометрическими, радиометрическими и спектральными характеристиками. По этим зависимостям составлена математическая модель получения ИЛЗ при помощи КА ДЗЗ.

Полученные функциональные зависимости угловой скорости от времени, предназначенные для обеспечения сохранности СДИ по полю ФПУ БОЭА, имеют преимущества перед общей моделью сканирования, изложенной в [15, 16] тем, что зависимости определены в нормированных компонентах векторов (направляющих косинусах). Это позволяет увеличить скорость вычислений в бортовом комплексе управления КА ДЗЗ, особенно при поиске зависимостей, обеспечивающих строго заданную СДИ в

конкретной точке ФПУ БОЭА, а также в тех случаях, где необходим расчет зависимостей для множества точек ФПУ БОЭА.

Для реализации в бортовом комплексе управления КА ДЗЗ предложенного алгоритма необходимо на каждом такте управления угловым движением КА ДЗЗ рассчитывать и впоследствии реализовывать при помощи исполнительных органов системы ориентации и стабилизации найденные угловые скорости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бородин М.С. Технология трехосного сканирования в оптико-электронной космической съемке. *Космонавтика и ракетостроение*. 2008;2(51):75–83.
2. Галкина А.С. Синтез программ управления угловым движением космического аппарата для съемки криволинейных маршрутов: дисс. канд. техн. наук. Самара; 2011. 143 с.
3. Бутырин С.А., Сомова Т.Е. Оптимизация режимов сканирующей оптико-электронной съемки и 3D-анимация движения спутника землеобзора. В сб.: *XVI Всероссийский семинар по управлению движением и навигации летательных аппаратов*: сб. трудов. Самара: СГАУ им. С.П. Королева; 2013. С. 30–33.
4. Сомов Е.И., Бутырин С.А. Алгоритмы наведения и гиросилового управления ориентацией спутников землеобзора при сканирующей оптико-электронной съемке. *Механика, управление и информатика*. 2012;3(9):61–70.
5. Сомов Е.И. Аналитический синтез законов гиросилового наведения космических аппаратов информационного назначения. В сб.: *XIV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам*: сб. материалов. СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; 2007. С. 90–92.
6. Геча В.Я., Жилнев М.Ю., Горчаков С.Ю., Новоселов С.А. Формулы расчета кинематических параметров орбитальной съемки планеты бортовой оптико-электронной аппаратурой космического аппарата. *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ*. 2019;173(6):23–32. URL: <http://jurnal.vniiem.ru/text/173/23-32.pdf>
7. *Методические указания. Спутники Земли искусственные. Основные системы координат для баллистического обеспечения полетов и методика расчета звездного времени*. РД 50-25645.325-89. М.: Изд-во стандартов; 1990. 23 с.
8. Petit G., Luzum B. (Eds.). *IERS Conventions (2010)*. IERS Technical Note; 36. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie; 2010. 179 p. ISBN 3-89888-989-6
9. *Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.11). Справочный документ*. М.: 27 ЦНИИ Министерства обороны России; 2014. 52 с.
10. *Динамика летательных аппаратов в атмосфере. Термины, определения и обозначения*. ГОСТ 20058-80. М.: Изд-во стандартов; 1981. 54 с.

REFERENCES

1. Borodin M.S. Technology of three-axis scanning by optoelectronic space imaging systems. *Kosmonavtika i raketostroenie = Cosmonautics and Rocket*. 2008;2(51):75–83 (in Russ.).
2. Galkina A.S. Synthesis of programs for controlling the angular motion of a spacecraft for shooting curvilinear routes: Cand. Sci. Thesis. Samara; 2011. 143 p. (in Russ.).
3. Butyrin S.A., Somova T.E. Optimization of scanning optoelectronic survey modes and 3D-animation of the motion of the remote sensing satellite. In: *XVI Vserossiiskii seminar po upravleniyu dvizheniem i navigatsii letatel'nykh apparatov*: sb. trudov (*Proceedings of the XVI All-Russian Seminar on Traffic Control and Navigation of Aircraft*). Samara: SGAU; 2013, p. 30–33. (in Russ.).
4. Somov E.I., Butyrin S.A. Algorithms for guidance and gyromoment attitude control of the land-survey satellites at a scanning optoelectronic observation. *Mekhanika, upravlenie i informatika*. 2012;3(9):61–70 (in Russ.).
5. Somov E.I. Analytical synthesis of the laws of gyro-force guidance of information space vehicles. In: *XIV Sankt-Peterburgskaya mezhdunarodnaya konferentsiya po integrirovannym navigatsionnym sistemam*: sb. materialov (*Collection of materials of the XIV St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*). Saint Petersburg: Kontsern "TsNII Elektropribor"; 2007, p. 90–92. (in Russ.).
6. Gecha V.Ya., Zhilnev M.Yu., Gorchakov S.Yu., Novoselov S.A. Formulas for calculating the kinematic parameters of the planet's orbital survey by the spacecraft's on-board optic imager when taking into account the required the velocity of the image motion on its photodetector. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIEM = Electromechanical Matters. VNIEM Studies*. 2019;173(6):23–32 (in Russ.). Available from URL: <http://jurnal.vniiem.ru/text/173/23-32.pdf>
7. *Metodicheskie ukazaniya. Sputniki Zemli iskusstvennye. Osnovnye sistemy koordinat dlya ballisticheskogo obespecheniya poletov i metodika rascheta zvezdnogo vremeni*. RD 50-25645.325-89. Moscow: Izdatel'stvo standartov; 1990. 23 p. (in Russ.).
8. Petit G., Luzum B. (Eds.). *IERS Conventions (2010)*. IERS Technical Note; 36. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie; 2010. 179 p. ISBN 3-89888-989-6

11. Урмаев М. *Космическая фотограмметрия*. М.: Недра; 1989. 278 с. ISBN 5-247-01273-9
12. Геча В.Я., Жиленин М.Ю., Федоров В.Б., Хрычев Д.А., Худак Ю.И., Шатина А.В. Поле скоростей движения точек изображения при орбитальной съемке поверхности планеты. *Российский технологический журнал*. 2020;8(1):97–109. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-97-109>
13. Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. *Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела*. М.: Наука; 1992. 280 с.
14. Markley F.L., Crassidis J.L. *Fundamentals of Spacecraft Attitude Determination and Control*. New York: Springer-Verlag; 2014. 486 p.
15. Батраков А.С. Общая модель для расчета и анализа скорости сдвига оптического изображения при съемке земной поверхности. *Исслед. Земли из космоса*. 1989;4:99–106.
16. Бутырин С.А. Кинематический синтез программного углового движения космического аппарата при оптико-электронной съемке Земли. *Известия Самарского научного центра РАН*. 2007;9(3):664–670. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kinematicheskij-sintez-programmnogo-uglovogo-dvizheniya-kosmicheskogo-apparata-pri-optiko-elektronnoy-semke-zemli/viewer>
9. *Parametry Zemli 1990 goda (PZ-90.11). Spravochnyi document (Earth Parameters 1990 (PZ-90.11). Reference document)*. Moscow: 27 TsNII Ministerstva oborony Rossii; 2014. 52 p. (in Russ.).
10. *Aircraft dynamics in atmosphere. Terms, definitions and symbols*. GOST 20058-80. Moscow: Izdatel'stvo standartov; 1981. 54 p. (in Russ.).
11. Uрмаев М. *Kosmicheskaya fotogrammetriya (Space photogrammetry)*. Moscow: Nedra; 1989. 278 p. (in Russ.). ISBN 5-247-01273-9
12. Gecha V.Y., Zhilenev M.Yu., Fedorov V.B., Khrychev D.A., Khudak Yu.I., Shatina A.V. Velocity field of image points in satellite imagery of planet's surface. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(1):97–109 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-97-109>
13. Branets V.N., Shmyglevskii I.P. *Primenenie kvaternionov v zadachakh orientatsii tverdogo tela (Application of quaternions in solid body orientation problems)*. Moscow: Nauka; 1992. 280 p. (in Russ.).
14. Markley F.L., Crassidis J.L. *Fundamentals of Spacecraft Attitude Determination and Control*. New York: Springer-Verlag; 2014. 486 p.
15. Batrakov A.S. General model for calculating and analyzing the shift rate of an optical image when shooting the Earth's surface. *Issledovanie Zemli iz kosmosa = Izvestiya of the Academy of Sciences of the USSR. Atmospheric and Oceanic Physics*. 1989;4:99–106 (in Russ.).
16. Butyrin S.A. Kinematic synthesis of the spacecraft programmed attitude motion at the earth optic-electronic survey. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2007;9(3):664–670 (in Russ.). Available from URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kinematicheskij-sintez-programmnogo-uglovogo-dvizheniya-kosmicheskogo-apparata-pri-optiko-elektronnoy-semke-zemli/viewer>

Об авторе

Горчаков Сергей Юрьевич, инженер, АО «Корпорация «ВНИИЭМ» (107078, Россия, Москва, Хоромный тупик, д. 4, стр. 1). E-mail: SYGorchakov@yandex.ru. <http://orcid.org/0000-0003-2266-5284>

About the author

Sergey Yu. Gorchakov, Engineer, VNIIEM Corporation (4–1, Khoromnyi tupik, Moscow, 107078 Russia). E-mail: SYGorchakov@yandex.ru. <http://orcid.org/0000-0003-2266-5284>

Математическое моделирование
Mathematical modeling

УДК 519.224.22

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-88-97>

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Достаточная статистика для параметра распределения Парето

И.С. Пулькин [®],
А.В. Татаринцев [®]

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[®] Авторы для переписки, e-mail: pulkin@mirea.ru, tatarintsev@mirea.ru

Резюме. Актуальной является задача оценки параметров распределения Парето, в первую очередь, показателя этого распределения, по заданной выборке. В настоящей статье устанавливается, что для этой оценки достаточно знать значение произведения элементов выборки. Доказано, что это произведение является достаточной статистикой для показателя распределения Парето. На основании метода максимального правдоподобия вычислена оценка показателя степени распределения. Доказано, что эта оценка – смещенная, и обоснована формула, устраняющая смещение. Для произведения элементов выборки, рассматриваемого как случайная величина, найдены функция распределения, плотность вероятности, вычислены математическое ожидание, старшие моменты и дифференциальная энтропия. Построены соответствующие графики. Кроме того, отмечается, что достаточной статистикой является любая функция от этого произведения, в частности, среднее геометрическое. Для среднего геометрического, также рассматриваемого как случайная величина, найдены функция распределения, плотность вероятностей, также вычислены математическое ожидание, старшие моменты и дифференциальная энтропия и построены соответствующие графики. Кроме того, обосновано то, что среднее геометрическое выборки является более удобной достаточной статистикой с практической точки зрения, чем произведение элементов выборки. Также, на основании теоремы Рао – Блекуэлла – Колмогорова построены эффективные оценки параметра распределения Парето. В заключение в качестве примера развита здесь техника применена к показательному распределению. Для него показано, что в качестве достаточной статистики для оценки неизвестного параметра этого распределения могут быть использованы как сумма, так и среднее арифметическое выборки.

Ключевые слова: распределение Парето, достаточная статистика, эффективная оценка, функция распределения, моменты

• Поступила: 20.01.2021 • Доработана: 27.01.2021 • Принята к опубликованию: 05.04.2021

Для цитирования: Пулькин И.С., Татаринцев А.В. Достаточная статистика для параметра распределения Парето. *Российский технологический журнал*. 2021;9(3):88–97. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-88-97>

Прозрачность финансовой деятельности: Никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Sufficient statistics for the Pareto distribution parameter

Igor S. Pulkin @,
Andrey V. Tatarintsev @

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia
@ Corresponding authors, e-mail: pulkin@mirea.ru, tatarintsev@mirea.ru

Abstract. The task of estimating the parameters of the Pareto distribution, first of all, of an indicator of this distribution for a given sample, is relevant. This article establishes that for this estimate, it is sufficient to know the product of the sample elements. It is proved that this product is a sufficient statistic for the Pareto distribution parameter. On the basis of the maximum likelihood method the distribution degree indicator is estimated. It is proved that this estimate is biased, and a formula eliminating the bias is justified. For the product of the sample elements considered as a random variable the distribution function and probability density are found; mathematical expectation, higher moments, and differential entropy are calculated. The corresponding graphs are built. In addition, it is noted that any function of this product is a sufficient statistic, in particular, the geometric mean. For the geometric mean also considered as a random variable, the distribution function, probability density, and the mathematical expectation are found; the higher moments, and the differential entropy are also calculated, and the corresponding graphs are plotted. In addition, it is proved that the geometric mean of the sample is a more convenient sufficient statistic from a practical point of view than the product of the sample elements. Also, on the basis of the Rao–Blackwell–Kolmogorov theorem, effective estimates of the Pareto distribution parameter are constructed. In conclusion, as an example, the technique developed here is applied to the exponential distribution. In this case, both the sum and the arithmetic mean of the sample can be used as sufficient statistics.

Keywords: Pareto distribution, sufficient statistics, effective estimation, distribution function, moments

• Submitted: 20.01.2021 • Revised: 27.01.2021 • Accepted: 05.04.2021

For citation: Pulkin I.S., Tatarintsev A.V. Sufficient statistics for the Pareto distribution parameter *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(3):88–97 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-88-97>

Financial disclosure: No author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Данная работа является продолжением исследований по оценке параметра распределения Парето, проведенных авторами в работах [1–3]. Рассмотрим классическое распределение Парето с функцией распределения

$$F(x) = 1 - \left(\frac{\theta}{x}\right)^\alpha, \quad x \geq \theta$$

и плотностью вероятности

$$\rho(x) = \frac{\alpha\theta^\alpha}{x^{\alpha+1}}, \quad x \geq \theta.$$

Математическое ожидание и дисперсия случайной величины, распределенной с такой плотностью вероятности, зависят от параметров распределения следующим образом:

$$M\left(\frac{x}{\theta}\right) = \frac{\alpha}{\alpha-1}; \quad M\left(\frac{x}{\theta}\right)^2 = \frac{\alpha}{\alpha-2};$$
$$D\left(\frac{x}{\theta}\right) = \frac{\alpha}{(\alpha-1)^2(\alpha-2)}.$$

Исследования, связанные с изучением свойств распределения Парето и его обобщений, вызывают пристальный интерес во всем мире [4–8]. Это

связано, в частности, с применимостью этого распределения к анализу интенсивностей природных и техногенных катастроф [9–11]. В большинстве случаев практического применения ставится задача оценить для некоторого распределения значение его параметров по случайной выборке величины, распределенной с заданной плотностью вероятности. Пусть $\{x_1, \dots, x_n\}$ – выборка, подчиняющаяся распределению Парето с параметрами α, θ и объемом выборки n . Как отмечалось в [1], для практических нужд обычно можно считать известным параметр θ и оценивать только параметр α .

Совместная плотность вероятности для распределения выборки имеет вид:

$$G(x_1, \dots, x_n | \alpha) = \rho(x_1) \cdot \dots \cdot \rho(x_n) = \frac{\alpha^n \cdot \theta^{\alpha n}}{(x_1 \cdot \dots \cdot x_n)^{\alpha+1}}.$$

Как известно [1], несмещенная оценка $\hat{\alpha}$ для степенного параметра α распределения Парето определяется выражением:

$$\hat{\alpha} = \frac{n-1}{\ln(x_1 \cdot \dots \cdot x_n) - n \ln \theta} = \frac{n-1}{\ln X - n \ln \theta},$$

$$M(\hat{\alpha}) = \alpha, \quad D(\hat{\alpha}) = \frac{\alpha^2}{n-2}, \quad n > 2$$

и является функцией от $X = x_1 \cdot \dots \cdot x_n$. Таким образом, для оценки параметра $\hat{\alpha}$ достаточно знать не независимые значения $x_i, i = 1, \dots, n$, а только их произведение. Совместная плотность вероятности также зависит от произведения элементов выборки:

$$G(x_1, \dots, x_n | \alpha) = G(x_1 \cdot \dots \cdot x_n | \alpha).$$

Функцию $G(x_1, \dots, x_n | \alpha)$ принято называть функционалом правдоподобия. Обычно при этом оговаривается, что она рассматривается как функция от неизвестных параметров α, θ при заданной выборке.

В силу известной теоремы о факторизации [12] статистика $X = x_1 \cdot \dots \cdot x_n$ является достаточной статистикой для определения неизвестного параметра α . Действительно, функционал правдоподобия $G(x_1, \dots, x_n | \alpha)$ представим в виде

$$G(x_1, \dots, x_n | \alpha) = g(X) \cdot h(x),$$

где

$$g(x_1, \dots, x_n | \alpha) = \alpha^n \cdot \theta^{\alpha n} \cdot X^{-(n+1)}$$

и $h = 1$ не зависит от α .

ДОСТАТОЧНАЯ СТАТИСТИКА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРА ПАРЕТО

Введем в рассмотрение статистику Y

$$Y = \frac{x_1 \cdot \dots \cdot x_n}{\theta^n}.$$

Эта статистика, так же, как и сама оценка $\hat{\alpha}$, является достаточной статистикой для оценки параметра распределения Парето, то есть содержит всю необходимую информацию для оценки значения α , имеющуюся в выборке $\{x_1, \dots, x_n\}$. Это позволяет построить оптимальную оценку, то есть оценку неизвестного параметра α , имеющую минимальную дисперсию. Именно, теорема Рао – Блекуэлла – Колмогорова [12, 13] утверждает следующее. Пусть T – несмещенная оценка параметра распределения. Тогда условное математическое ожидание $T_1 = M(T | Y = y)$ для достаточной статистики Y также является несмещенной оценкой степенного параметра распределения Парето. При этом для дисперсий этих оценок справедливо неравенство

$$D_\alpha T_1 \leq D_\alpha T.$$

Такая связь оцениваемого параметра и достаточной статистики позволяет предложить другой способ для вычисления оцениваемого параметра α .

Рассмотрим случайную величину Y , равную, как было сказано ранее, произведению всех элементов выборки $\{x_1, \dots, x_n\}$, нормированных на пороговое значение распределения. Для нее можно найти функцию распределения. Она равна

$$\begin{aligned} F_n(y) &= P(Y < y) = \\ &= \int_{\Delta_n(y)} G(x_1, \dots, x_n | \alpha) dx_1 \dots dx_n = \\ &= \alpha^n \cdot \theta^{\alpha n} \int_{\Delta_n(y)} \frac{dx_1 \dots dx_n}{(x_1 \cdot \dots \cdot x_n)^{\alpha+1}}, \end{aligned}$$

где интегрирование ведется по объему $\Delta_n(y)$: $\{x_i > \theta; (x_1 \cdot \dots \cdot x_n) / \theta^n < y\}$ в n -мерном пространстве. Для устранения большого количества параметров сделаем замену переменных $x_i = \theta \cdot \exp(\xi_i / \alpha)$, $i = 1, 2, \dots, n$, после которой интеграл примет вид:

$$F_n(y) = \int_{\Delta_n(\xi)} e^{-(\xi_1 + \dots + \xi_n)} d\xi_1 \dots d\xi_n.$$

Область интегрирования $\Delta_n(\xi)$ будет следующей: $\{\xi_i > 0, \xi_1 + \dots + \xi_n < b\}$. Единственный параметр в интеграле $b = \alpha \cdot \ln y$ содержит комбинацию исходных параметров задачи. Похожий интеграл встречался уже в работе [1]. Вычисление его

связано со свойствами соответствующей рекурсии. Действительно, расставив пределы интегрирования по симплексу $\Delta_n(\xi)$, получим:

$$F_n(y) \equiv I_n(b) = \int_0^b e^{-\xi_1} d\xi_1 \int_0^{b-\xi_1} e^{-\xi_2} d\xi_2 \dots \int_0^{b-\xi_1-\dots-\xi_{n-1}} e^{-\xi_n} d\xi_n.$$

Для интеграла $I_n(b)$ имеем рекурсивное равенство:

$$I_n(b) = \int_0^b e^{-\xi} \cdot I_{n-1}(b-\xi) d\xi = e^{-b} \int_0^b e^{\chi} \cdot I_{n-1}(\chi) d\chi,$$

где второе представление получено после замены переменной интегрирования $\chi = b - \xi$. Вычисляя первые значения последовательности интегралов:

$$I_1 = 1 - e^{-b}; \quad I_2 = 1 - (1+b)e^{-b}; \\ I_3 = 1 - \left(1 + b + \frac{b^2}{2}\right)e^{-b}; \dots,$$

приходим к гипотезе, которую доказываем по индукции:

$$F_n(x) = 1 - e^{-b} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{b^k}{k!}; \quad b = \alpha \ln y, \quad y \geq 1.$$

Очевидно, что сумма в этом выражении является частичной суммой ряда для показательной функции. Плотность вероятности случайной величины Y может быть получена дифференцированием функции распределения по аргументу y :

$$\rho_n(y) = \frac{dF}{db} \cdot \frac{db}{dy} \Rightarrow \rho_n(y) = \frac{\alpha^n}{\Gamma(n)} \cdot \frac{(\ln y)^{n-1}}{y^{\alpha+1}}$$

для $y \geq 1$ и $\rho_n(y) = 0$ для $y < 1$.

В соответствии с теоремой Рао – Блекуэлла – Колмогорова, несмещенная оценка для параметра распределения Парето получается как условное математическое ожидание по полученному распределению от величины

$$X = \frac{n-1}{\ln Y} \Rightarrow M(X|Y=y) = \int_1^{+\infty} \frac{n-1}{\ln y} \cdot \rho_n(y) dy.$$

Нетрудно вычислить, что $M(X|Y=y) = \alpha$ и $D(X|Y=y) = \alpha^2 / (n-2)$. Таким образом, оценка параметра и ее дисперсия для достаточной статистики в точности повторяют соответствующий результат для оценки максимального правдоподобия, полученной в работах [1, 2].

СВОЙСТВА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОСТАТОЧНОЙ СТАТИСТИКИ

В данном пункте рассмотрим свойства распределения случайной величины $Y = (x_1 \cdot \dots \cdot x_n) / \theta^n$, заданной плотностью вероятности:

$$\rho_n(y) = \frac{\alpha^n}{\Gamma(n)} \cdot \frac{(\ln y)^{n-1}}{y^{\alpha+1}}, \quad y \geq 1.$$

Легко проверить, что полученное распределение удовлетворяет (как и должно быть) условию нормировки:

$$\int_1^{+\infty} \rho_n(y) dy = 1.$$

Плотность вероятности имеет максимум в точке $y_n^{(0)}$, являющейся нулем производной функции $\rho_n(y)$. Точка максимума, называемая модой распределения, задается выражением:

$$y_n^{(0)} = \exp\left(\frac{n-1}{\alpha+1}\right).$$

Далее приведен график распределения случайной величины Y .

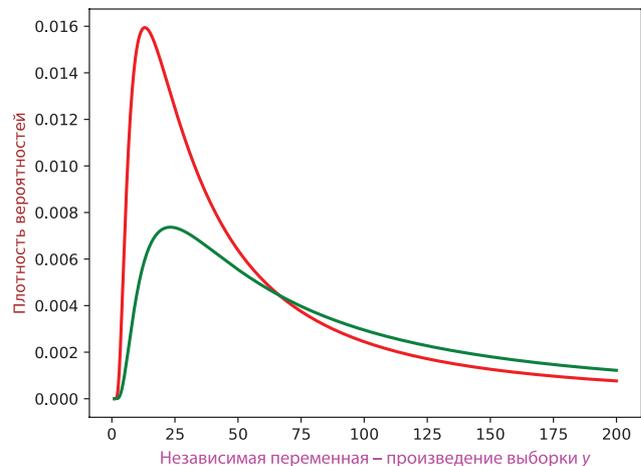


Рис. 1. Графики плотности вероятностей распределения случайной величины Y с $n = 10$ (красный) и $n = 12$ (зеленый), $\alpha = 2.5$

При увеличении n мода распределения экспоненциально возрастает, то есть точка максимума распределения сдвигается в сторону больших значений y . Значение плотности вероятности в точке максимума стремится, очевидно, к нулю:

$$\max \rho_n = \frac{\alpha^n}{\Gamma(n)} \cdot \left(\frac{n-1}{\alpha+1}\right)^{n-1} \cdot e^{-n+1} \sim \\ \sim \left(\frac{\alpha}{\alpha+1}\right)^n \cdot \frac{\alpha+1}{\sqrt{2\pi(n-1)}} \rightarrow 0, n \rightarrow +\infty.$$

Кроме того, легко посчитать и моменты данной случайной величины. Для момента произвольного p -го порядка имеем выражения:

$$M_n(Y^p) = \int_1^{+\infty} y^p \cdot \rho_n(y) dy = \frac{\alpha^n}{\Gamma(n)} \cdot \int_1^{+\infty} \frac{(\ln y)^{n-1}}{y^{\alpha-p+1}} dy.$$

Интеграл для моментов сходится для $p < \alpha$, то есть случайная величина Y имеет конечное число низших моментов. После замены $y = e^t$ получим окончательный вид интеграла для их вычисления:

$$M_n(Y^p) = \frac{\alpha^n}{\Gamma(n)} \cdot \int_0^{+\infty} t^{n-1} e^{-(\alpha-p)t} dt = \left(\frac{\alpha}{\alpha-p} \right)^n.$$

Выражение для моментов зависит от объема выборки n как показательная функция. В частности, математическое ожидание Y , вследствие того, что данная величина является произведением независимых величин, образующих случайную выборку, равно произведению математических ожиданий каждого множителя:

$$M(Y) = M\left(\frac{x_1}{\theta}\right) \cdot \dots \cdot M\left(\frac{x_n}{\theta}\right) = \left(\frac{\alpha}{\alpha-1}\right)^n.$$

Значения математического ожидания, дисперсии и всех существующих моментов неограниченно возрастают, так же как и мода распределения, при возрастании n . Скорость возрастания этих величин тем больше, чем больше порядок момента p .

Для дифференциальной энтропии распределения

$$H_n(Y) = - \int_1^{+\infty} \ln \rho_n(y) \cdot \rho_n(y) dy,$$

подставив плотность вероятности $\rho_n(y)$ в определение, получим интеграл:

$$H_n(Y) = \int_1^{+\infty} (\ln \Gamma(n) - n \ln \alpha + (\alpha + 1) \ln y - (n-1) \ln \ln y) \cdot \rho_n(y) dy.$$

После замены переменной интегрирования $y = e^t$ перейдем к выражению, связанному с интегральным представлением для гамма-функции Эйлера

$$H_n(Y) = \frac{\alpha^n}{\Gamma(n)} \int_0^{+\infty} (\ln \Gamma(n) - n \ln \alpha + (\alpha + 1)t - (n-1) \ln t) \cdot t^{n-1} \cdot e^{-\alpha t} dt.$$

Как известно, дифференциальная энтропия определяется с точностью до аддитивной константы. Поэтому при вычислении этого интеграла были

отброшены слагаемые, не зависящие от n . В результате вычисление этого интеграла дает следующее значение энтропии:

$$H_n(Y) = \ln \Gamma(n) - (n-1) \psi(n) + n \left(1 - \ln \alpha + \frac{1}{\alpha} \right).$$

Здесь используется обозначение:

$$\psi(x) = \frac{\Gamma'(x)}{\Gamma(x)} = \frac{d}{dx} \ln \Gamma(x)$$

– так называемая дигамма-функция Эйлера (см. [14]). В частности, для натуральных аргументов пси-функция выражается следующим образом:

$$\psi(n) = -\gamma + \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{k}, \quad n > 2.$$

Здесь $\gamma = 0.5772\dots$ – постоянная Эйлера.

График зависимости дифференциальной энтропии от n изображен на рисунке 2.

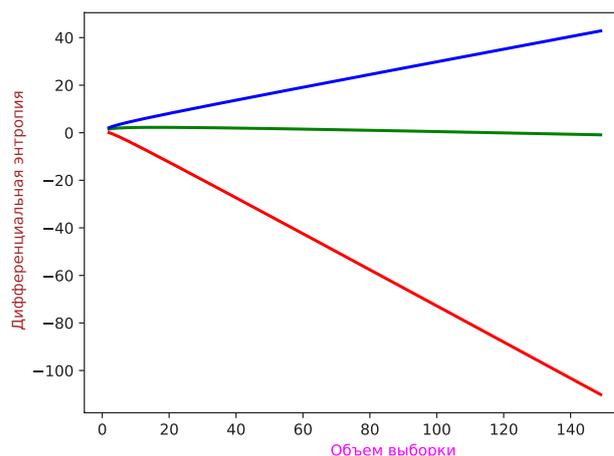


Рис. 2. Дифференциальная энтропия распределения произведения выборки с $\alpha = 3$ (красный), $\alpha = 1.8$ (зеленый) и $\alpha = 1.5$ (синий)

Зависимость дифференциальной энтропии от объема выборки n асимптотически линейная. Асимптотика для дифференциальной энтропии при больших объемах выборки $n \rightarrow +\infty$ имеет вид:

$$H_n(Y) = n \left(\frac{1}{\alpha} - \ln \alpha \right) + \frac{1}{2} \ln n + O(1).$$

Критическое значение параметра α_0 , при котором коэффициент линейного члена обращается в нуль, находится как корень уравнения $\alpha^{-1} = \ln \alpha$ и составляет приблизительно $\alpha_0 = 1.7632\dots$

Таким образом, полученное распределение обладает некоторыми особенностями, которые следует скорее отнести к недостаткам, чем к его

достоинствам. Это, прежде всего, существование только конечного числа моментов, зависящего от параметра распределения, возрастание дисперсии и моментов с ростом объема выборки n , что приводит к размыванию пика распределения и его смещению в бесконечность. Все это делает работу с этим распределением не очень удобной. Авторами работы найден оригинальный способ избавиться от недостатков, добавив положительных черт распределению для достаточной статистики.

СРЕДНЕЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ ВЫБОРКИ КАК ДОСТАТОЧНАЯ СТАТИСТИКА

Вместо случайной величины Y , являющейся достаточной статистикой для оценки степенного параметра Парето, рассмотрим другую случайную величину, равную среднему геометрическому элементов выборки $\{x_1, \dots, x_n\}$:

$$Y_g = \frac{\sqrt[n]{x_1 \cdot \dots \cdot x_n}}{\theta}.$$

Преимуществом данной величины является то, что она ограничена и при увеличении n не стремится неограниченно к бесконечности, в отличие от значения Y . Действительно, ранее было установлено, что оценка

$$\hat{\alpha} = \frac{n-1}{\ln X - n \ln \theta}$$

является несмещенной и состоятельной оценкой неизвестного параметра α . Поэтому предел правой части при $n \rightarrow \infty$ равен α . Это возможно (при $\alpha \neq 1$) только в том случае, когда $\ln X \sim Cn$, то есть когда $\ln X$ растет на бесконечности пропорционально n . Но тогда

$$\ln Y_g = \frac{\ln X}{n} - \ln \theta$$

имеет конечный предел при $n \rightarrow \infty$.

Несмещенная оценка параметра распределения α в этом случае будет иметь слегка модифицированный вид:

$$X = \frac{n-1}{n \cdot \ln Y_g}.$$

Статистика Y_g – также достаточная статистика, но свойства ее существенно отличаются от свойств Y . Действительно, функция распределения $F_g(y) = P(Y_g < y)$ вычисляется во многом аналогично предыдущему случаю:

$$\begin{aligned} F_g(y) &= \int_{\Delta_g(y)} G(x_1, \dots, x_n | \alpha) dx_1 \dots dx_n = \\ &= \alpha^n \cdot \theta^{\alpha n} \int_{\Delta_g(y)} \frac{dx_1 \dots dx_n}{(x_1 \cdot \dots \cdot x_n)^{\alpha+1}}, \end{aligned}$$

где интегрирование ведется по объему $\Delta_g(y) = \{x_i > \theta; (x_1 \cdot \dots \cdot x_n) / \theta^n < y^n\}$. Приведем конечный результат вычислений для $F_g(y)$:

$$F_g(y) = 1 - e^{-d} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{d^k}{k!}; d = \alpha n \ln y; y \geq 1.$$

Плотность вероятности Y_g получается дифференцированием функции распределения по аргументу y :

$$\rho_g(y) = \frac{(\alpha n)^n}{\Gamma(n)} \cdot \frac{(\ln y)^{n-1}}{y^{\alpha n+1}}, y \geq 1$$

и $\rho_g(y) = 0$ для $y < 1$.

На рис. 3 приведен график распределения случайной величины Y_g .

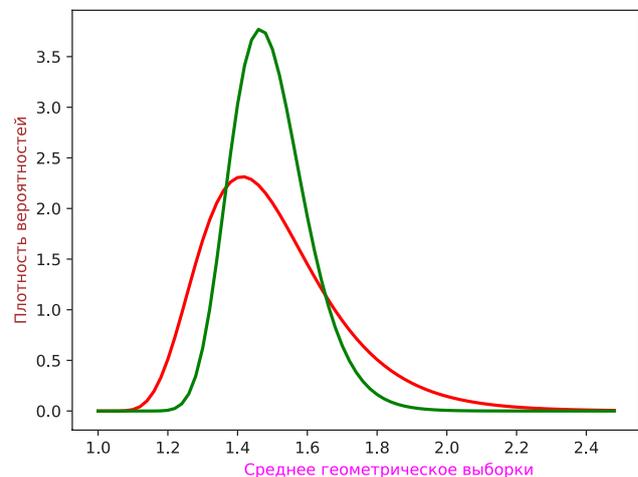


Рис. 3. Графики плотности вероятностей распределения случайной величины Y с $n = 10$ (красный) и $n = 30$ (зеленый), $\alpha = 2.5$

Свойства данного распределения существенно отличаются от предыдущего $\rho_n(y)$. Так, например, мода распределения теперь имеет вид:

$$y_g^{(0)} = \exp\left(\frac{n-1}{\alpha n+1}\right)$$

и при увеличении объема выборки n стремится к постоянному значению $e^{1/\alpha}$. Кроме того, моменты данной случайной величины также легко вычисляются:

$$M_n(Y_g^p) = \int_1^{+\infty} y^p \cdot \rho_{n,g}(y) dy = \frac{(\alpha n)^n}{\Gamma(n)} \cdot \int_1^{+\infty} (\ln y)^{n-1} \frac{dy}{y^{\alpha n-p+1}}.$$

Интеграл для моментов сходится для $\alpha n > p$. При увеличении n число моментов, существующих у данной случайной величины, неограниченно возрастает.

$$M_n(Y_g^p) = \frac{(\alpha n)^n}{\Gamma(n)} \cdot \int_0^{+\infty} t^{n-1} e^{-(\alpha n - p)t} dt = \left(\frac{\alpha n}{\alpha n - p} \right)^n.$$

Для моментов существует предельное выражение:

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} M_n(Y_g^p) = e^{p/\alpha}.$$

Дисперсия среднего геометрического стремится к нулю при увеличении n :

$$D_n(Y_g) = \left(\frac{\alpha n}{\alpha n - 2} \right)^n - \left(\frac{\alpha n}{\alpha n - 1} \right)^{2n}, \quad \lim_{n \rightarrow +\infty} D_n(Y_g) = 0.$$

Асимптотики математического ожидания и дисперсии при больших n имеют вид:

$$M_n(Y_g) = e^{1/\alpha} \left(1 + \frac{1}{2\alpha^2 n} + \frac{8\alpha + 3}{24\alpha^4 n^2} + o\left(\frac{1}{n^2}\right) \right),$$

$$D_n(Y_g) = e^{2/\alpha} \left(\frac{1}{\alpha^2 n} + \frac{4\alpha + 3}{2\alpha^4 n^2} + o\left(\frac{1}{n^2}\right) \right),$$

и неплохо аппроксимируют функции на всем интервале допустимых значений $\alpha n > 2$.

Дифференциальная энтропия для этого распределения:

$$H_n(Y_g) = - \int_1^{+\infty} \ln \rho_g(y) \cdot \rho_g(y) dy = \int_1^{+\infty} ((\alpha n + 1) \ln y + \ln \Gamma(n) - n \ln(\alpha n) - (n - 1) \ln \ln y) \cdot \rho_g(y) dy$$

после замены переменной интегрирования $y = e^t$ приводится к интегралу:

$$H_n(Y_g) = \frac{(\alpha n)^n}{\Gamma(n)} \int_0^{+\infty} ((\alpha n + 1)t + \ln \Gamma(n) - n \ln(\alpha n) - (n - 1) \ln t) \cdot t^{n-1} \cdot e^{-\alpha n t} dt.$$

Вычисление этого интеграла дает значение энтропии:

$$H_n(Y_g) = \ln \Gamma(n) - (n - 1) \psi(n) + n - n \ln(n\alpha) + \frac{1}{\alpha}.$$

Последнее слагаемое не зависит от n , однако сохранено для большей общности. Данное выражение для энтропии среднего геометрического получается из полученного ранее выражения для энтропии произведения заменой α на $(n\alpha)$.

Асимптотика данного выражения при больших $n \rightarrow +\infty$ имеет всегда отрицательный коэффициент при старшей степени:

$$H_n(Y_g) = -n \ln(\alpha n) + \frac{1}{2} \ln n + o(1).$$

Таким образом, зависимость от объема выборки при любом параметре α имеет аналогичный характер и функция монотонно убывает в отрицательной области значений.

График зависимости дифференциальной энтропии от n изображен на рисунке 4.

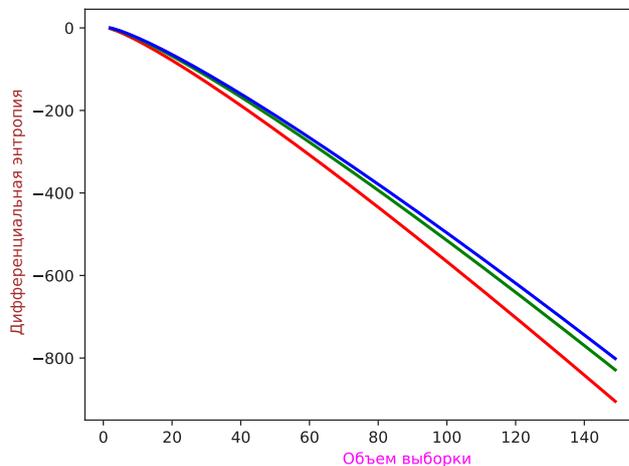


Рис. 4. Дифференциальная энтропия распределения среднего геометрического выборки с $\alpha = 3$ (красный), $\alpha = 1.8$ (зеленый) и $\alpha = 1.5$ (синий)

Как видно, график энтропии монотонно спадает с ростом n в отрицательную область и очень похож на аналогичный для распределения параметра Парето [2]. Бесконечное убывание энтропии в отрицательной области значений, как известно, свидетельствует о том, что с ростом объема выборки происходит сжатие распределения в δ -образную форму, что является следствием увеличения детерминированности и точности определения значения параметра распределения α .

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРА ДЛЯ ПОКАЗАТЕЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Показательное распределение является одним из известнейших распределений математической статистики и широко используется в теории массового обслуживания и многих других прикладных задачах. Показательное распределение также содержит параметр, оценка которого имеет важное значение в практических целях. Плотность вероятности распределения имеет вид:

$$\rho(x) = \lambda \cdot e^{-\lambda x}, \quad x \geq 0$$

и $\rho(x) = 0, x < 0$. Математическое ожидание и дисперсия случайной величины, распределенной по показательному закону, определяются, как известно, следующим образом:

$$M(X) = \frac{1}{\lambda}; \quad D(X) = \frac{1}{\lambda^2}.$$

Для выборки $\{x_1, \dots, x_n\}$ случайных величин, распределенных по показательному закону распределения с заданными параметрами λ и n , совместная плотность вероятности выборки имеет вид:

$$G(x_1, \dots, x_n | \lambda) = \rho(x_1) \cdot \dots \cdot \rho(x_n) = \lambda^n \cdot e^{-\lambda(x_1 + \dots + x_n)}.$$

Плотность зависит только от суммы элементов выборки, следовательно, для определения параметра достаточно знать значение $Y = x_1 + \dots + x_n$. Данная случайная величина и является достаточной статистикой для определения параметра распределения λ . Логарифмируя функцию G , получаем так называемый функционал правдоподобия:

$$L(\alpha) \equiv \ln G(x_1, \dots, x_n | \alpha) = n \ln \lambda - \lambda(x_1 + \dots + x_n).$$

Дифференцируя его по параметру распределения λ и приравнявая производную к нулю, получаем оценку для параметра распределения методом максимального правдоподобия:

$$\hat{\lambda} = \frac{n}{x_1 + \dots + x_n}.$$

Так же как и для распределения Парето, данная оценка является смещенной. Нетрудно вычислить математическое ожидание этой случайной величины:

$$M(\hat{\lambda}) = \int_0^{+\infty} \dots \int_0^{+\infty} \hat{\lambda} \cdot G(x_1, \dots, x_n | \lambda) dx_1 \cdot \dots \cdot dx_n = \frac{n}{n-1} \cdot \lambda.$$

Таким образом, несмещенной оценкой параметра λ является величина X , равная:

$$X = \frac{n-1}{x_1 + \dots + x_n} = \frac{n-1}{Y}.$$

Математическое ожидание и дисперсия этой величины оценки параметра распределения равны соответственно:

$$M(X) = \lambda; \quad D(X) = \frac{\lambda^2}{n-2}.$$

Можно также получить и функцию распределения для случайной величины X :

$$F(x) = P(X < x) = 1 - \lambda^n \int_{\Delta(x)} e^{-\lambda(x_1 + \dots + x_n)} dx_1 \cdot \dots \cdot dx_n,$$

где интегрирование осуществляется по n -мерному симплексу $\Delta(x): \{x_i > 0, x_1 + \dots + x_n < (n-1)/x\}$. Вычисляя интеграл, приходим к выражению:

$$F(x) = e^{-a_1/x} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{(a_1/x)^k}{k!}.$$

Здесь $a_1 = (n-1)\lambda$ – параметр. Плотность вероятности, получаемая дифференцированием функции распределения, будет иметь вид, похожий на соответствующую плотность распределения оценки показателя Парето:

$$\rho(x) = \frac{1}{a_1 \Gamma(n)} \cdot \left(\frac{a_1}{x}\right)^{n+1} e^{-a_1/x}.$$

ДОСТАТОЧНАЯ СТАТИСТИКА ДЛЯ ПОКАЗАТЕЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Как было указано ранее, одной из достаточных статистик для показательного распределения при оценке значения параметра этого распределения по случайной выборке $\{x_1, \dots, x_n\}$ является статистика случайной величины

$$Y = x_1 + \dots + x_n.$$

Сумма элементов выборки содержит полную информацию об оцениваемом параметре распределения. Получим теперь закон распределения и плотность вероятности для величины Y .

$$F(y) = P(Y < y) = \lambda^n \int_{\Delta(y)} e^{-\lambda(x_1 + \dots + x_n)} dx_1 \cdot \dots \cdot dx_n.$$

Область интегрирования $\Delta(x): \{x_i > 0, x_1 + \dots + x_n < y\}$. Функция распределения для оценки параметра

$$F(y) = 1 - e^{-\lambda y} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\lambda y)^k}{k!}$$

и плотность вероятности

$$\rho(y) = \frac{\lambda^n}{\Gamma(n)} \cdot y^{n-1} \cdot e^{-\lambda y}$$

получаются обычным образом. Математическое ожидание и дисперсия случайной величины могут быть получены и без использования плотности вероятности. Используя свойства математического ожидания независимых величин, получим:

$$M(Y) = M(x_1) + \dots + M(x_n) = \frac{n}{\lambda}.$$

Аналогично для дисперсии:

$$D(Y) = D(x_1) + \dots + D(x_n) = \frac{n}{\lambda^2}.$$

Свойства данного распределения обладают теми же недостатками, как и статистика произведения элементов выборки для оценки параметра

распределения Парето. А именно, математическое ожидание и дисперсия неограниченно возрастают с ростом объема выборки. Это делает работу с этой статистикой неудобной в случае больших значений n . Если использовать достаточную статистику, связанную со средним арифметическим элементов выборки:

$$Y_a = \frac{x_1 + \dots + x_n}{n},$$

то такой подход позволит избежать бесконечных моментов распределения. Используя свойства моментов суммы независимых величин, нетрудно получить:

$$M(Y_a) = \frac{1}{\lambda}; \quad D(Y_a) = \frac{1}{n\lambda^2} \rightarrow 0, \quad n \rightarrow +\infty.$$

Плотность распределения случайной величины Y_a равна:

$$\rho(y) = \frac{(n\lambda)^n}{\Gamma(n)} \cdot y^{n-1} \cdot e^{-n\lambda y}.$$

Несмещенная оценка для параметра показательного распределения имеет вид:

$$X = \frac{n-1}{n \cdot Y_a}; \quad M(X) = \lambda.$$

Для этих введенных случайных величин – суммы и среднего арифметического выборки из показательного распределения – также можно вычислить дифференциальную энтропию.

Как было получено ранее – случайная величина $Y = x_1 + \dots + x_n$ распределена с плотностью вероятности

$$\rho(y) = \frac{\lambda^n}{\Gamma(n)} \cdot y^{n-1} \cdot e^{-\lambda y}.$$

Нетрудно посчитать, что для такого распределения дифференциальная энтропия

$$H_n(Y) = \ln \Gamma(n) - (n-1)\psi(n) + n - \ln \lambda$$

монотонно возрастает независимо от значения λ . Асимптотика этой функции

$$H_n(Y) = \frac{1}{2} \ln n + \underline{O}(1).$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пулькин И.С., Татаринцев А.В. Свойства оценки максимального правдоподобия показателя распределения Парето. *Российский технологический журнал*. 2018;6(6):77–83. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-6-74-83>

Для достаточной статистики, связанной со средним арифметическим элементов выборки $Y_a = (x_1 + \dots + x_n) / n$, распределение вероятности, как было указано, получается заменой параметра λ на $n\lambda$:

$$\rho(y) = \frac{(n\lambda)^n}{\Gamma(n)} \cdot y^{n-1} \cdot e^{-n\lambda y}.$$

Выражение для энтропии и ее асимптотика будут монотонно убывать в отрицательную область значений:

$$H_n(Y) = \ln \Gamma(n) - (n-1)\psi(n) + n - \ln(n\lambda);$$

$$H_n(Y) = -\frac{1}{2} \ln n + \underline{O}(1).$$

Это свидетельствует о том, что особенности выбора достаточной статистики, исследованные для базового распределения Парето, не являются случайными, но повторяются и для показательного распределения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, использование достаточных статистик позволяет строить несмещенные и эффективные оценки параметров распределения, как для распределения Парето, так и для показательного распределения. Полезным приемом, улучшающим качество оценивания, оказалось построение такой функции от достаточной статистики, которая ограничена, если объем выборки возрастает. В частности, для распределений Парето таким свойством обладает среднее геометрическое выборки, а для показательного распределения – среднее арифметическое.

Рассматривая это среднее геометрическое как случайную величину, мы получаем инструмент для построения эффективных оценок параметров распределений, поскольку ее дисперсия стремится к нулю с ростом объема выборки.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

REFERENCES

1. Pulkin I.S., Tatarintsev A.V. Properties of the maximum likelihood estimates of the exponent of Pareto distribution. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2018;6(6):74–83 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-6-74-83>

2. Пулькин И.С., Татаринцев А.В. Статистические свойства показателя распределения Парето. *Cloud of Science*. 2020;7(3):498–509.
3. Пулькин И.С., Татаринцев А.В. Инерция формы оценки показателя распределения Парето. *Cloud of Science*. 2020;7(4):790–800.
4. Afify A.Z., Yousof H.M., Butt N.S., Hamedani G.G. The transmuted Weibull-Pareto distribution. *Pak. J. Statist.* 2016;32(3):183–206.
5. Dixit U.J., Nooghabi M.J. Comments on the estimate for Pareto distribution. *Stat. Methodology*. 2010;7:687–691.
6. Ekpenyong E.J., Njoku O.J., Akpan V.M. Efficiency of some estimation methods of the parameters of a two-parameter Pareto distribution. *Am. J. Mathem. Stat.* 2018;8(5):105–110.
7. Gui W. Modified inverse moment estimation: its principle and applications. *Comm. Stat. Appl. Meth.* 2016;23(6):479–496. <https://doi.org/10.5351/CSAM.2016.23.6.479>
8. Hussain S., Bhatti S.H., Ahmad T., Aftab M., Tahir M. Parameter estimation of Pareto distribution: some modified moment estimators. *Maejo Int. J. Sci. Technol.* 2018;12(01):11–27.
9. Langousis A., Mamalakis A., Puliga M., Deidda R. Threshold detection for the generalized Pareto distribution: review of representative methods and application to the NOAA NCDC daily rainfall database. *Water Resour. Res.* 2016;52(4):2659–2681. <https://doi.org/10.1002/2015WR018502>
10. Mansoor R.M., Devendra K. Generalized Pareto distribution based on generalized order statistics and associated inference. *Statistics in Transition. New series*. 2019;20(3):57–79. <https://doi.org/10.21307/stattrans-2019-024>
11. Pu C., Pan X. On the actuarial simulation of the general Pareto distribution of catastrophe loss. In: *Lecture Notes in Electrical engineering. Book series*. 2013. V. 242. P. 1153–1164. https://doi.org/10.1007/978-3-642-40081-0_97
12. Ивченко Г.И., Медведев Ю.И. *Введение в математическую статистику*. М.: Изд-во ЛКИ; 2010. 600 с.
13. Козлов М.В., Прохоров А.В. *Введение в математическую статистику*. М.: Изд-во МГУ; 1987. 264 с.
14. Абрамовиц М., Стиган И. *Справочник по специальным функциям*: пер. с англ. М.: Наука; 1979. 832 с.
2. Pulkin I.S., Tatarintsev A.V. Statistical properties of the Pareto distribution indicator. *Cloud of Science*. 2020;7(3):498–509 (in Russ.).
3. Pulkin I.S., Tatarintsev A.V. Shape inertia of the Pareto distribution parameter estimating. *Cloud of Science*. 2020;7(4):790–800 (in Russ.).
4. Afify A.Z., Yousof H.M., Butt N.S., Hamedani G.G. The transmuted Weibull-Pareto distribution. *Pak. J. Statist.* 2016;32(3):183–206.
5. Dixit U.J., Nooghabi M.J. Comments on the estimate for Pareto distribution. *Stat. Methodology*. 2010;7:687–691.
6. Ekpenyong E.J., Njoku O.J., Akpan V.M. Efficiency of some estimation methods of the parameters of a two-parameter Pareto distribution. *Am. J. Mathem. Stat.* 2018;8(5):105–110.
7. Gui W. Modified inverse moment estimation: its principle and applications. *Comm. Stat. Appl. Meth.* 2016;23(6):479–496. <https://doi.org/10.5351/CSAM.2016.23.6.479>
8. Hussain S., Bhatti S.H., Ahmad T., Aftab M., Tahir M. Parameter estimation of Pareto distribution: some modified moment estimators. *Maejo Int. J. Sci. Technol.* 2018;12(01):11–27.
9. Langousis A., Mamalakis A., Puliga M., Deidda R. Threshold detection for the generalized Pareto distribution: review of representative methods and application to the NOAA NCDC daily rainfall database. *Water Resour. Res.* 2016;52(4):2659–2681. <https://doi.org/10.1002/2015WR018502>
10. Mansoor R.M., Devendra K. Generalized Pareto distribution based on generalized order statistics and associated inference. *Statistics in Transition. New series*. 2019;20(3):57–79. <https://doi.org/10.21307/stattrans-2019-024>
11. Pu C., Pan X. On the actuarial simulation of the general Pareto distribution of catastrophe loss. In: *Lecture Notes in Electrical engineering. Book series*. 2013. V. 242. P. 1153–1164. https://doi.org/10.1007/978-3-642-40081-0_97
12. Ivchenko G.I., Medvedev Yu.I. *Vvedeniye v matematicheskuyu statistiku (An introduction to mathematical statistics)*. Moscow: LKI; 2010. 600 p. (in Russ.).
13. Kozlov M.V., Prokhorov A.V. *Vvedeniye v matematicheskuyu statistiku (An introduction to mathematical statistics)*. Moscow: MGU; 1987. 264 p. (in Russ.).
14. Abramovits M., Stigan I. *Spravochnik po spetsial'nyim funktsiyam (Handbook of special functions)*. Moscow: Nauka; 1979. 832 p. (in Russ.).
[*Handbook of mathematical functions with formulas, graphs and mathematical tables*. (Eds.). Abramowitz M., Stegun I. N.Y.: Dover Publications; 1964. 1046 p.]

Об авторах

Пулькин Игорь Сергеевич, к.ф.-м.н., доцент кафедры высшей математики Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: pulkin@mirea.ru.

Татаринцев Андрей Владимирович, к.ф.-м.н., доцент кафедры высшей математики-2 Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: tatarintsev@mirea.ru. Scopus Autor ID: 57221996001, 7004076246.

About the authors

Igor S. Pulkin, Cand. Sci. (Phys.–Math.), Associate Professor, Higher Mathematics Department, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: pulkin@mirea.ru.

Andrey V. Tatarintsev, Cand. Sci. (Phys.–Math.), Associate Professor, Department of Mathematics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: tatarintsev@mirea.ru. Scopus Autor ID: 57221996001, 7004076246.

Мировоззренческие основы технологии и общества
Philosophical foundations of technology and society

УДК 811.161.1

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-98-107>

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Репродуктивный метод в обучении иностраннх студентов русскому языку и его инновационные аспекты

Р.Д. Шоканова¹,
Е.Н. Тарасова^{2,®}

¹ Московский педагогический государственный университет, Москва, 119991 Россия

² МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

® Автор для переписки, e-mail: tarasova_e@mirea.ru

Резюме. Репродуктивный метод в системе обучения русскому языку как иностранному направлен на воспроизведение иностранными студентами способов деятельности по представленным преподавателем алгоритмам, на обогащение знаниями, навыками и умениями, а также на формирование основных мыслительных операций: абстрагирование, анализ, синтез, обобщение и других. При усвоении «языка профессии» происходит формирование основных мыслительных операций: абстрагирования, анализа, синтеза, обобщения и других. Репродуктивный метод, имея основу алгоритмизации, интегрировавшись с когнитивной теорией обучения, вышел на новый уровень – репродуктивно-когнитивный метод. Системный анализ в сочетании с алгоритмизацией становятся основой репродуктивно-креативного метода. Обозначенные в статье методы обогащают знания, навыки и умения студентов, которые чаще всего осуществляются на этапах коррекции, диагностики и закрепления знаний, но не гарантируют развития творческих способностей, не позволяют планомерно и целенаправленно их формировать. В частности, концепцией репродуктивно-креативного метода является принцип коммуникативной направленности, который лег в основу компетентностного обучения. В компетентностном обучении деятельностная составляющая, в отличие от других возможных подходов, рассматривается с позиции компетентности, т.е. способности студента эффективно и самостоятельно, но с помощью преподавателя использовать изучаемый язык на основе приобретенного опыта в виде знаний, навыков, умений. Знания, полученные в результате применения объяснительно-иллюстративного метода, слабо формируют навыки и умения, поэтому благодаря разработанной системе заданий, где четко прослеживается алгоритмизация учебного процесса, преподаватель организует деятельность студентов по неоднократному воспроизведению сообщенных им знаний и показанных способов деятельности.

Ключевые слова: репродуктивный метод, обучение русскому языку как иностранному, репродуктивно-когнитивный метод, когнитивная теория обучения, репродуктивно-креативный метод

• Поступила: 20.11.2020 • Доработана: 16.12.2020 • Принята к опубликованию: 09.03.2021

Для цитирования: Шоканова Р.Д., Тарасова Е.Н. Репродуктивный метод в обучении иностранных студентов русскому языку и его инновационные аспекты. *Российский технологический журнал*. 2021;9(3):98–107. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-98-107>

Прозрачность финансовой деятельности: Никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Reproductive method in teaching Russian to foreign students and its innovative aspects

Rashida D. Shokanova¹,
Elena N. Tarasova^{2,@}

¹ Moscow Pedagogical State University, Moscow, 119991 Russia

² MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

@ Corresponding author, e-mail: tarasova_e@mirea.ru

Abstract. The reproductive method in the system of teaching Russian as a foreign language is aimed at reproducing the ways of activity by foreign students according to the algorithms presented by the teacher, at enriching them with knowledge, skills and abilities, as well as at forming the main mental operations: abstraction, analysis, synthesis, generalization, and others. When learning the «language of the profession», the main mental operations are formed: abstraction, analysis, synthesis, generalization, and others. The reproductive method, having the basis of algorithmization, integrated with the cognitive theory of learning, has reached a new level – the reproductive-cognitive method. System analysis in combination with algorithmization becomes the basis of the reproductive and creative method. The methods outlined in the article enrich the knowledge, skills and abilities of students, which are most often carried out at the stages of correction, diagnosis and consolidation of knowledge, but do not guarantee the development of creative abilities, do not allow them to be systematically and purposefully formed. In particular, the concept of the reproductive-creative method is the principle of communicative orientation, which formed the basis of competence-based learning. In competence-based learning, the activity component, unlike other possible approaches, is considered from the viewpoint of competence, i.e., the ability of the student to effectively and independently, but with the help of the teacher, use the language being studied on the basis of the acquired experience in the form of knowledge, skills, and abilities. The knowledge obtained as a result of the use of the explanatory and illustrative method weakly forms skills and abilities. Therefore, thanks to the developed system of tasks, where the algorithmization of the educational process is clearly traced, the teacher organizes the students' activities by repeatedly reproducing the knowledge communicated to them and the ways of activity shown.

Keywords: reproductive method, teaching the Russian language as a foreign language, learning algorithmization, reproductive-cognitive method, cognitive theory of instruction, reproductive-creative method

• Submitted: 20.11.2020 • Revised: 16.12.2020 • Accepted: 09.03.2021

For citation: Shokanova R.D., Tarasova E.N. Reproductive method in teaching Russian to foreign students and its innovative aspects. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(3):98–107 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-98-107>

Financial disclosure: No author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Репродуктивный метод обучения – способ организации деятельности учащихся по неоднократному воспроизведению сообщенных им знаний и показанных способов действий. Элементы данного метода, основанные на подражании, играют заметную роль в развитии памяти и способностей к воспроизведению. Этапы решения задачи по воспроизведению и повторению способа деятельности по заданным

преподавателем алгоритмам, являются главными признаками метода, названного *репродуктивным*. Сам термин «репродукция» (от лат. *re* – приставка, указывающая на повторное действие + *producti* – производство, произведение, то же, что и воспроизведение) обозначает воспроизведение заученных лексических единиц и фраз [1].

В основе репродуктивного метода лежит репродуктивная деятельность (*reproductive activity*) человека, являющаяся действием по воспроизведению

заученного материала. Такая репродуктивная деятельность отражает значительный уровень владения языком. При изучении русского как иностранного таким образом обеспечивается связь теории с практикой, репродуктивный метод вооружает студентов практическими умениями овладения речью, является гарантом усвоения языка.

Алгоритмизация в обучении русскому языку как иностранному (РКИ) необходима: студент, выполняя задание, учится осуществлять заданный порядок учебных действий; распознавая, анализировать явления языка; синтезируя, выяснять правила; систематизировать заданные манипуляции по образцу. Алгоритм рассматривается как инструмент построения модели, которая через образовательную технологическую призму решает учебные задачи.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Точная и строгая последовательность большинства обучающих действий, методов и приемов дает колоссальный эффект в образовательном процессе, в частности, при обучении русскому языку как иностранному, если преподаватель разрабатывает, составляет и дает установку обучаемым для выполнения той или иной мыслительной операции по логично продуманным предписаниям, которые получили название алгоритмов. Применительно к обучению это означает следующее:

- составление ряда однотипных дидактических задач;
- создание одинаковых и однозначно понимаемых исходных данных;
- разработка точных правил для строго последовательных учебных действий, выполнение которых приведет к необходимому (заданному) результату.

Кроме того, применение обозначенного метода способствует активизации познавательной деятельности иностранных студентов.

ПРОБЛЕМА

Примеры использования репродуктивного метода в практике преподавания русского языка как иностранного иллюстрируют различные его аспекты, в том числе инновационные, так как именно их применение способствует формированию ценностных и мировоззренческих ориентаций личности, развитию индивидуальных мыслительных особенностей студентов. Научно-методическая и практико-ориентированная проблема сегодня заключается в том, что репродуктивный метод в системе обучения РКИ направлен на эффективное усвоение иностранными студентами различных уровней грамматики,

лексикологии и фразеологии, а также на овладение научным стилем русского литературного языка. При усвоении «языка профессии» происходит формирование основных мыслительных операций: абстрагирования, анализа, синтеза, обобщения и других. Интегрировавшись с когнитивной теорией обучения, репродуктивный метод вышел на новый уровень – репродуктивно-когнитивный метод. Системный анализ в сочетании с алгоритмизацией становятся основой репродуктивно-креативного метода, дающего основу принципу коммуникативной направленности, находящегося в основе компетентностного обучения.

Концепция репродуктивного метода обучения: постановка цели и реализация задач осуществляется в рамках структурно-алгоритмической технологии, под которой понимается система методологических, теоретических и методических подходов по формированию знаний, навыков, умений.

Переставим части в предложении. Идею алгоритмизации обучения, сутью которой являются точные правила для строго последовательных учебных действий, глубоко исследовал профессор Л.Н. Ланда [2]. Е.Г. Шатова [3] также структурировала идеи алгоритмизации в методике обучения русскому языку. Основными элементами современного урока, которые отражают эти закономерности, можно считать: 1) актуализацию прежних знаний и способов действий учащихся (не только воспроизведение ранее усвоенных знаний, но и их применение в новой ситуации, и стимулирование познавательной активности учащихся, и контроль учителя); 2) формирование новых понятий и способов действий; 3) применение – формирование умений и навыков (включающее специальное повторение и закрепление) [4]. Следовательно, если дидактическая структура урока является постоянной и в работе учителя выступает в виде общего предписания, общего алгоритма организации урока, то методическая подструктура обязывает его планировать конкретные виды деятельности на разных этапах урока: ответы учащихся, выполнение упражнений, объяснение материала с использованием методов и средств обучения, решение познавательных задач под руководством учителя и самостоятельно [4].

В лингводидактике репродуктивное усвоение языковых средств лексики, грамматики, стилистики, фонетики чаще всего проходит по системе алгоритмов, алгоритмизации, так как требует от студента активного многократного воспроизведения усвоенных языковых средств как в устной, так и в письменной речи. При формировании знаний и повышении их качества, мы старались учесть советы Е.Г. Шатовой, так как данный метод направлен на приобретение знаний, навыков и умений через систему алгоритмов и представлен в виде образцов-заданий (выполнение

упражнений по образцам, составление планов, пересказ, заучивание наизусть, творческое списывание и многое другое), которые требуют неоднократного воспроизведения знаний и способов деятельности, уже усвоенных студентами. И все же вопрос о методике работы с алгоритмами пока еще недостаточно разработан. Как сделать построение и ввод алгоритма органической частью урока, а не отдельным приложением к нему? Как убедить ученика в необходимости рассуждать по алгоритму, а главное – как упростить, сделать экономными и доступными образцы рассуждения учащихся при выполнении упражнений по грамматике и лексике на разных этапах усвоения материала. Интересно, что роль алгоритмов и алгоритмизации учебного материала возросла не в связи с «внутриматематическими» вычислительными задачами, а с необходимостью управления процессом обучения вообще и познавательной деятельностью учащихся в особенности. Это одна из актуальнейших проблем современной педагогической науки, решение которой открывает дополнительные резервы в повышении качества знаний и умственного развития учащихся [3].

Репродуктивный метод подразделяется на:

- объяснительно-иллюстративный [5];
- собственно-репродуктивный [6].

Строго говоря, **объяснительно-иллюстративный** репродуктивный метод, построенный на принципах алгоритма, преимущественно культивирует осознанное усвоение материала, прочные гарантированные знания, которые имеют следующие основные признаки:

- передача знаний в «готовом» виде;
- восприятие знаний в «готовом» виде;
- осмысление и запоминание;
- восприятие знаний различными способами: слово учителя, беседа, наглядность, иллюстрирование;
- умозаключение: преимущественно – дедуктивное.

Знания, полученные в результате применения объяснительно-иллюстративного метода, слабо формируют навыки и умения, поэтому благодаря разработанной системе заданий, где четко прослеживается алгоритмизация учебного процесса, преподаватель организует деятельность студентов по неоднократному воспроизведению сообщенных им знаний и показанных способов деятельности. Преподаватель дает задания, а студенты их выполняют: делают морфологические и морфемные разборы, склоняют и спрягают, составляют словосочетания, определяют члены предложения. Работают по инструкции, по образцу, то есть по алгоритму. Наглядные пособия и технические средства обучения объяснительно-иллюстративного метода несут интегрированную нагрузку и являются важнейшим средством обучения (плакаты, картины, карточки, таблицы и др.).

Применение объяснительно-иллюстративного метода – одно из важнейших условий сознательного усвоения русского языка студентами-инофонами.

Собственно-репродуктивный метод предполагает осмысленное и осознанное повторение материала. Суть собственно-репродуктивного метода: студент сознательно усваивает, понимает и запоминает, а также свободно может воспроизводить материал в речи, благодаря многократному повторению. По мере увеличения объема знаний возрастает частота применения собственно-репродуктивного метода. В ходе собственно-репродуктивной деятельности учащийся не прибавляет никакой новой информации, а многократным повторением прочно фиксирует данные знания. Собственно-репродуктивный метод имеет следующие основные признаки:

- передача знаний в «готовом» виде;
- восприятие знаний в «готовом» виде;
- глубокое и сознательное понимание, осмысление, усвоение и запоминание;
- сообщение и объяснение знаний, умений и навыков;
- полное воспроизведение, благодаря многократному повторению;
- умозаключение: преимущественно – индуктивное.

Строго говоря, применение алгоритма предполагает использование обоих методов – объяснительно-иллюстративного и собственно-репродуктивного. Репродуктивный метод, естественно, для повышения качества знаний использует репродуктивную лексику, речь и упражнения, которые также построены на принципах алгоритмизации, с целью обеспечения облегченного воспроизведения для коммуникации студентов-инофонов.

Использование репродуктивных упражнений является важным элементом в обучении студентов русскому языку. По мнению авторов словаря [1], это тип упражнений по их назначению, то есть это те упражнения, которые связаны с воспроизведением прочитанного письменно или услышанного устно. При выполнении данных упражнений внимание студента сосредоточено, прежде всего, на содержательной стороне, при этом он извлекает из памяти языковой материал, соответствующий замыслу выступления [1]. Данный тип упражнений – необходимый, логичный и актуальный этап работы при обучении всем видам речевой деятельности, но в особенности говорению и письму.

Обучая с помощью репродуктивных методов, желательно придерживаться следующих критериев:

- определение и формирование компетенций, а также ожидаемых результатов обучения;
- создание интегрального педагогического набора;
- создание своего уникального учебно-образовательного стиля (возможно, образовательной технологии);

- сбор информации для учебного материала с учетом фактора сжатия;
- создание индивидуального (эксклюзивного) курса с помощью соответствующих алгоритмов, инструментария;
- загрузка курса в систему управления обучением (LearningManagementSystem, LMS).

Рассмотрим примеры алгоритмизации и варианты выполнения заданий по аналогии.

Использование репродуктивных методов обучения русскому языку как иностранному для порогового уровня А (А1, А2), согласно документу «Общеввропейские компетенции владения иностранным языком А» [7]:

- **Уровень А** – это элементарный уровень, который обеспечивает выживание иностранца в России: *обратиться к врачу, сходить в магазин, познакомиться с кем-либо и т.п.*

Пример алгоритмизации № 1 для уровня А

Задание № 1. Выберите из данных ниже слов существительные мужского, среднего, женского рода и впишите в таблицу.

Алгоритм: солнце – средний род.

Варианты выполнения задания:

Мужской род	
Женский род	
Средний род	

Слова для выбора: море, студентка, чайник, книга, автомобиль, дядя, ночь, заяц, одеяло, дедушка, степь.

Задание № 2. Закончите предложение, выбрав один из вариантов.

Алгоритм: Она всегда рисовала красивые рисунки.

Варианты выполнения задания:

Я всегда...	а) ... гуляю в саду. б) ... написал письмо родителям. в) ... слушает музыку.
Мария часто...	г) ...решили задачу.
Наконец он...	
Они сразу...	

Оба охарактеризованных метода отличаются тем, что они обогащают знания, навыки и умения студентов, которые чаще всего осуществляются на этапах коррекции, диагностики и закрепления знаний, но не гарантируют развития творческих способностей, не позволяют планомерно и целенаправленно их формировать. Алгоритм как средство реализации весьма эффективен, но сущность познавательной деятельности в данной системе не выходит за рамки деятельности, организуемой репродуктивными методами. Эта ипостась относится к продуктивным методам.

ИННОВАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ РЕПРОДУКТИВНОГО МЕТОДА

В связи с качественным изменением жизни и цифровизацией всех систем жизнедеятельности нашего общества естественно, что изменения коснулись и методов преподавания [8]. Произошедшие изменения частично трансформировали репродуктивный метод и ряд алгоритмов, которые направлены на повышение креативной и когнитивной деятельности, соотнесение средств практической деятельности с научными фактами, а также активное введение образовательных технологий с интерактивными методиками (аудио, видео, анимация и другие возможности IT).

Данный метод интегрирует креативный и когнитивный подходы при проведении занятий в активной и познавательной деятельности (викторины, дискуссии, подготовка доклада, презентации, лингвистические игры, использование IT и многое другое). Выбор будет зависеть от нескольких факторов: цели, задач, типа, этапа, методов занятий, особенностей менталитета иностранных студентов, содержания теоретического материала, личности педагога и др. Благодаря современным образовательным технологиям, определена последовательность действий по установлению различных структурных связей строения урока, где сохраняется логика, концепция и парадигма учебного предмета. Студенту, как субъекту учебной деятельности, сама организация процесса обучения предоставляет неограниченные возможности формирования самообразования и самообучения (но под руководством преподавателя), так как весь процесс строится на основе осознанного самоменеджмента. Креативные методы обучения, как правило, основаны на личностно-ориентированном подходе.

РЕПРОДУКТИВНО-КОГНИТИВНЫЙ МЕТОД

Для решения слабо структурированных проблем используется когнитивная теория обучения языку. Когнитивная теория опирается на принцип сознательности и необходимости конкретного объяснения свойств и особенностей изучаемого языка. Когнитивный метод – различные действия по установлению структурных связей между переменными и постоянными элементами познавательной системы. Лингводидактика, являясь общей теорией обучения языку, тесно взаимодействует с базовыми для нее науками, которые, используя теорию когнитивного развития, управляют как познавательным процессом, так и познавательной деятельностью в целом.

Теория когнитивного развития была разработана швейцарским философом и психологом Жаном

Пиже, который определяет когнитивное развитие как развитие всех видов мыслительных процессов, таких как восприятие, память, формирование понятий, решение задач, воображение и логика. А к числу определяющих признаков когнитивной системы могут быть отнесены: выразительность, эффективность, алгоритмичность, усваиваемость, обобщенность, анализ и другие критерии, легко адаптируемые дидактикой при обучении русскому языку как иностранному.

Когнитивная теория обучения языку, возникшая в противовес аудиolingвальному методу, предполагает как понимание учащимися структуры языка (для чего даются необходимые пояснения), так и последующую интенсивную тренировку с целью формирования речевых навыков и умений [1].

Для формирования репродуктивно-когнитивного метода необходима **когнитивная стратегия**, которая опирается на концепцию данного метода. Когнитивная стратегия, по мнению авторов словаря Э.Г. Азимова и А.Н. Щукина, – это ментальные процессы, направленные на переработку информации в целях обучения, ориентированные на усвоение, хранение и извлечение информации из памяти. Лексические стратегии, входящие в состав когнитивной компетенции, направлены на поиск значений слова, визуальных соответствий, подбор и накопление лексических средств, расширение лексической базы [1].

Сущностная выраженность данного метода носит многосторонний характер и направлена на:

- четкое овладение системой операций, формирующих у учащегося рациональные умственные действия;
- развитие коммуникативной компетенции;
- формирование когнитивной лингвистики (когнитивная лингвистика, по мнению авторов Э.Г. Азимова и А.Н. Щукина, является лингвистическим направлением, в центре внимания которого находится язык как когнитивный инструмент, система знаков, определяющая презентацию, кодирование и преобразование информации [1]);
- формирование методологического мышления преподавателя как основы профессионализма;
- определение стратегии и тактики данного метода.

Технологическая выраженность когнитивной теории и алгоритмизации касается всех аспектов данного метода. Цель метода – проекция образовательной системы на новый эталон функционирования метода и раскрытие всех его потенциальных возможностей.

Концепция репродуктивно-когнитивного метода обучения: постановка цели и реализация задач осуществляются в рамках мыслительно-познавательной деятельности, направленной на развитие

интеллекта, логики, творчества каждой индивидуальности.

Методом исследования репродуктивно-когнитивной технологии является контент-анализ. Процедура составления данного бинарного метода включает следующие основные критерии когнитивной теории и алгоритмизации:

- определение целей;
- формулировка ситуационной задачи;
- создание инновационной модели.

Репродуктивно-когнитивный метод используют для формирования творческих, мыслительных, познавательных, обобщающих, аналитических, лингвистических и т.д. умений и навыков иностранных студентов. Данный метод имеет следующие характерные признаки:

- 1) знания студентам предлагают в «готовом» виде, но ставят цель осмыслить новое и высказать свою точку зрения, свою позицию;
- 2) студенты понимают, запоминают, анализируют, правильно осмысливают, логически воспроизводят.

Данный метод, используя алгоритм, выполняет функцию, необходимую студенту для мыслительных операций: добавить, убавить, сделать самостоятельное умозаключение. Преподаватель РКИ часто ставит перед студентами-инофонами определенную задачу, задает проблемные вопросы и добивается их осмысления. Применение алгоритмической репродукции активизирует целый ряд когнитивных мыслительных операций. Если в репродуктивном методе студент минимально прибавляет новую информацию, то в репродуктивно-когнитивном студент использует мыслительные процессы: суждение, обобщение, интегрирование, рассуждение, преобразование, абстрагирование, осмысление, логические выводы и др., дающие возможность «перерабатывать» большое количество информационного потока. Цель преподавателя РКИ – поставить перед аудиторией иностранных студентов проблему частично (или задачу, или задать вопрос) и, мотивировав, найти способы ее решения, но при этом можно дать незначительную подсказку. Особенностью его реализации, в отличие от репродуктивного метода, является то, что он не предполагает наличия точного механизма действий. Репродуктивно-когнитивный метод обучения – это метод закрепления и обновления полученных знаний и умений в результате творческо-мыслительно-познавательной деятельности. Постановка в начале занятия частичной проблемы (задачи или вопроса) – это всегда поиск нового способа решения вопроса. Таким образом, данный метод обучения, базируясь на теории когнитивного подхода совместно с алгоритмизацией,

как бинарный продукт, интерпретирует учебный процесс по-новому (возможны зачатки новой образовательной технологии). В репродуктивно-когнитивном методе необходимо подключение максимального количества активных и интерактивных методов и приемов для активизации мыслительной деятельности в учебном процессе и формирования когнитивной лингвистики.

Рассмотрим, как «Современный словарь методических терминов и понятий» [1] объясняет понятие «когнитивная грамматика». Когнитивная грамматика, по мнению авторов словаря, – это грамматическое описание языков, ориентированное на рассмотрение когнитивных аспектов, процессов и структур языковых явлений, то есть на их связи с процессами познания мира, восприятия, памяти, мышления, систем интерпретации и переработки информации человеком.

Умозаключение, формируемое при использовании данного метода, – индуктивно-дедуктивное. Теория когнитивного подхода предлагает придерживаться некоторых принципов, которые максимально активизируют репродуктивно-когнитивный метод:

- измерения – для определения функциональности системы, выделения части из общей системы и придания значения каждой части при их максимальной активизации;
- эквивалентности – финальный результат может быть достигнут независимо от различных начальных условий и дидактических путей;
- единства – целостная система состоит из отдельных, но связанных между собой частей;
- связанности – проведение процедуры определения связей между элементами рассматриваемой системы и соотнесения их с внешней средой (учет внешней среды);
- модульности – выделение модулей в исследуемой системе и рассмотрение ее как совокупности модулей.

Репродуктивно-когнитивный метод, имея яркие дидактико-методические признаки, априори заслуживает внимание методистов.

По мнению М.Р. Львова – автора «Словаря-справочника по методике преподавания русского языка» [5], объяснительно-иллюстративный и собственно-репродуктивный методы в такой методике не отменяются, но утрачивают ведущую роль. Репродуктивно-когнитивный метод можно считать переходным к репродуктивно-креативному методу. Говоря о репродуктивно-когнитивном методе обучения, хочется отметить когнитивный подход (англ. *cognitive approach*), основанный на когнитивной психологии и предусматривающий в процессе обучения языку опору на принцип сознательности. Обучение

языку, как отмечают авторы современного словаря Э.Г. Азимов и А.Н. Щукин, не должно строиться только на восприятии и механическом заучивании единиц языка и правил. Учащихся следует вовлекать в активный процесс познания сути изучаемых явлений, когда создаются условия для реализации личностных ориентиров [1].

Особенности познавательных процессов, рассматриваемых с точки зрения когнитивных процессов, предусматривают когнитивный стиль. Когнитивный стиль – это не только стиль познания, но и обучения, коммуникации, активной деятельности. Когнитивный стиль включает содержание мотивов обучения, ценностных ориентаций личности, индивидуальные мыслительные особенности, индивидуальное формирование речевых навыков, языковых компетенций.

Использование репродуктивных методов обучения русскому языку как иностранному для порогового уровня В (В1, В2), согласно документу «Общеввропейские компетенции владения иностранным языком В» [7]:

- **Уровень В**, который необходим для поступления в российский университет. Здесь учитываются все компетенции: *говорение, чтение, письмо, аудирование*.

Пример алгоритмизации № 2 для уровня В

Задание № 1. В данных алгоритмах ответы известны. Задайте вопрос, ориентируясь на ответ.

Алгоритм: – Ты с кем? – Я с мамой.

Выполнения задания:

– ... ?	– ... ?	– ... ?	– ... ?
– в библиотеку.	– с подругой.	– в четыре.	– ничего.

Задание № 2. Придумайте ситуации, опишите их и задайте пять вопросов, на которые невозможны следующие ответы: недавно; час назад; недолго; только один день.

РЕПРОДУКТИВНО-КРЕАТИВНЫЙ МЕТОД¹

Креативные методы и подходы требуют креативных исследований и нововведений. В учебной работе, наряду с традиционными методами

¹ Репродуктивно-креативный метод был разработан польским ученым, методистом Я. Генцелем и впервые применен в 1963 г. при обучении русскому языку студентов-филологов в Краковской высшей педагогической школе. Начиная с 1973 г., репродуктивно-креативный метод стал применяться в экспериментальных классах лицеев, а с 1976 г. – в экспериментальных классах восьмилетних школ № 1 г. Кракова и Краковского воеводства.

преподавания, существуют творческие эксклюзивные методы обучения, которые формируют креативное мышление и инсайт, под которым понимается сложное интеллектуальное явление, когда на интуитивном прорыве студенты приходят к внезапному нахождению решения вопроса, поставленного перед ними преподавателем.

Если говорить об общих принципах репродуктивно-креативного метода, то, по мнению Я. Генцеля [9], они имеют следующие критерии:

- речевые умения формируются на базе иноязычного текста;
- необходимыми компонентами процесса овладения продуктивными речевыми умениями являются предварительное восприятие, репродукция и трансформация иноязычных текстов;
- овладение речевыми умениями на базе текстов предполагает одновременное осознанное усвоение элементарных лингвистических знаний;
- первым шагом к овладению иноязычной речью должно стать усвоение образцовой артикуляции и интонации.

Репродуктивно-креативный метод (от лат. *creatio* – созидание), по мнению авторов словаря [1], является комбинированным методом и направлен на формирование коммуникативной компетенции с опорой на письменный текст. Концепция данного метода базируется на том, что процесс формирования речевых умений включает предварительное восприятие текста, его последующую репродукцию и трансформацию [10].

Креативность в самом широком смысле этого слова – это высшая ступень творческих способностей человека, позволяющая принимать экстравагантные решения, создавать принципиально новые идеи, способствовать формированию нестандартных умозаключений. Использование креативных методов и приемов обогащает и одухотворяет учебный процесс, максимально развивает когнитивные мыслительные способности, выявляет большое количество одаренных учащихся, динамически развивает логику, создает необычайно творческую обстановку и психологический комфорт, при котором студенты легко и непринужденно формируют речевую деятельность.

В качестве предмета речевой деятельности мысль реализуется с помощью языка либо в процессе формулирования собственной мысли (говорение, письмо), либо при восприятии мыслей других людей (чтение, слушание). При формировании речевой деятельности необходимо воспользоваться советами Я. Генцеля [9], который указывал, что говорение считается самым важным речевым умением, что большую часть времени урока необходимо отводить развитию устной речи. Письму необходимо обучать

на всех этапах параллельно умению говорить. Как же происходит чтение, по мнению ученого? Для этого необходимо составить активный словарь лексических единиц, который должен быть усвоен, потому что значительно облегчает чтение текста. Степень усвоения лексики проверяется в процессе репродукции или трансформирования текста посредством устного перевода на русский язык. Аудирование, по его же словам, занимает относительно скромное место.

Креативно-репродуктивный метод, акцентируя глубокое внимание на знаниях, навыках и умениях, в последующем формирует коммуникативную компетенцию [11]. Учащиеся, овладевшие следующими этапами – корректировочный артикуляционный курс, интенсивный разговорный курс, этап репродукции читаемых текстов и продуктивное говорение, – способны самостоятельно пользоваться знаниями, сформированными коммуникативной компетенцией [12]. Метод базируется на следующих положениях:

- языковые знания;
- речевые навыки и умения (формируемые на базе иноязычного текста).

На сегодняшний день созрела необходимость расширения и углубления репродуктивно-креативного метода, поскольку «дети изменились, а инструменты меняются медленно». Принцип сознательности выступает в качестве ведущего принципа обучения; представление языковых единиц проводится на сопоставительной основе, что способствует преодолению (интерференции) родного языка. Система обучения включает в себя несколько этапов и предусматривает корректировочный и артикуляционный курсы, интенсивный разговорный курс, этап репродукции читаемых текстов и, наконец, – продуктивное говорение и письмо.

Польский ученый Я. Генцель, внесший большой вклад в развитие и продвижение репродуктивно-креативного метода, подводя итоги, объясняет, что активизация учащихся выступает как существенное условие успеха при обучении данным методом [9].

Репродуктивно-креативный метод, предусматривающий постепенный переход от рецептивных к продуктивным формам работы, имеет свои неоспоримые преимущества в достижении качественных и гарантированных знаний. Умозаключение, порождаемое в процессе использования данного метода, – индуктивно-дедуктивное.

Использование репродуктивных методов обучения русскому языку как иностранному для порогового уровня С (С1, С2), согласно документу «Общеввропейские компетенции владения иностранным языком С» [7]:

- **Уровень С**, который необходим для совершенного владения языком.

Пример алгоритмизации № 3 для уровня С

Задание № 1. Прочитайте, как в делопроизводстве обычно начинают письмо. Обратите внимание на форму обращения. Как вы думаете, к кому можно так обратиться? В каком письме (официальном/неофициальном) такие обращения уместны. Обратите внимание на речевые единицы научного стиля. Сопоставьте научный стиль с другими стилями, аргументируйте научный стиль.

Варианты выполнения задания:

Уважаемый господин Петров, (!) Уважаемые господа, (!) Уважаемые коллеги! Дорогие коллеги! Многоуважаемые дамы и господа! Коллега, Уважаемая Мария Степановна! Дорогой дедушка! Милая Маша! Здравствуйте, Ванюша и Сашенька! Здравствуйте, Петя! Добрый день, Николай!

Задание № 2. Допишите предложения, преобразовав их в сложноподчиненные. Используя данные предложения, составьте текст и аргументируйте его значение.

1. С двенадцатого века стали пользоваться
2. Часть куска, которую отрубали, называлась ...
3. В шестнадцатом веке на монетах появился всадник...
4. Народ стал называть эти монеты ...

Данный метод можно рассматривать как переходный к продуктивным методам обучения, и потому мы предлагаем его использовать на самом «продвинутом» этапе обучения языку [13].

Репродуктивный метод является классическим традиционным методом обучения, заслужившим

огромный авторитет в дидактике и методике [14]. Его отличительными чертами являются: экономность организации, возможность передачи большого объема информации за короткий промежуток времени, практическое усвоение нового материала, прочность усвоения, расширение возможности запоминания и усвоение теоретических знаний, преодоление интерференции родного языка [15].

Примеры некоторых видов креативных методов:

- настольные игры;
- словесные игры;
- игры-соревнования;
- лингвистический КВН;
- путешествие по карте;
- путешествие в страну «Языкознание»;
- путешествие в страну чудес;
- использование (применение) сказок;
- лингвистические турниры;
- лингвистические олимпиады;
- диспут на заданную тему.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, как классический вариант репродуктивного метода, так и новые творческие методы, созданные на его основе, положительно сказываются на эффективности познавательной, активной, творческой, мыслительной деятельности иностранных студентов, изучающих РКИ. И на сегодняшний день репродуктивный метод остается самым востребованным и актуальным методом в лингводидактике.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азимов Э.Г., Шукин А.Н. *Современный словарь методических терминов и понятий. Теория и практика обучения языкам*. М.: Русский язык, Курсы; 2018. 496 с. ISBN 978-5-88337-701-2
2. Шатова Е.Г. *Урок русского языка в современной школе. Типы, структура, методика*. М.: Дрофа; 2007. 253 с. ISBN: 978-5-358-04565-1
3. Львов М.Р. *Словарь-справочник по методике преподавания русского языка: пособие для студентов пед. вузов и колледжей*. М.: Высшая школа: Academia; 1999. 269 с. ISBN 5-7695-0348-X
4. Мынбаева А.К., Садвакасова З.М. *Инновационные методы обучения, или как интересно преподавать*. Алматы; 2012. 355 с. ISBN 978-601-247-667-5
5. Шукин А.Н. *Методика преподавания русского языка как иностранного*. М.: Высшая школа; 2003. 333 с. ISBN 5-06-004545-5

REFERENCES

1. Azimov E.G., Shchukin A.N. *Sovremennyyi slovar' metodicheskikh terminov i ponyatii. Teoriya i praktika obucheniya yazykam (The modern dictionary of methodological terms and concepts. Theory and practice of teaching languages)*. Moscow: Russkii yazyk, Kursy; 2018. 496 p. (in Russ.). ISBN 978-5-88337-701-2
2. Shatova E.G. *Urok russkogo yazyka v sovremennoi shkole. Tipy, struktura, metodika (Russian language lesson in a modern school. Types, structure, methods)*. Moscow: Drofa; 2007. 253 p. (in Russ.). ISBN 978-5-358-04565-1
3. L'vov M.R. *Slovar'-spravochnik po metodike prepodavaniya russkogo yazyka: posobie dlya studentov ped. vuzov i kolledzhei (Dictionary-guide on the methodology of teaching the Russian language: a manual for students of ped. universities and colleges)*. Moscow: Vysshaya shkola: Academia; 1999. 269 p. (in Russ.). ISBN 5-7695-0348-X

6. Генцель Я. Обучение русскому языку как иностранному репродуктивно-креативным методом. *Русский язык за рубежом*. 1988;2:49–53.
7. *Педагогика. Большая современная энциклопедия*; сост. Е.С. Рапацевич. Минск: Современное слово; 2005. 719 с. ISBN 985-443-481-8
4. Мунбаева А.К., Садвакасова З.М. *Innovatsionnye metody obucheniya, ili kak interesno prepodavat' (Innovative teaching methods, or how interesting to teach)*. Almaty; 2012. 355 p. (in Russ.). ISBN 978-601-247-667-5
5. Shchukin A.N. *Metodika prepodavaniya russkogo yazyka kak inostrannogo (Methods of teaching Russian as a foreign language)*. Moscow: Vysshaya shkola; 2003. 333 p. (in Russ.). ISBN 5-06-004545-5
6. Genzel Ya. Teaching the Russian language as a foreign by reproductive and creative method. *Russkii yazyk za rubezhom = Russian Language Abroad*. 1988;2:49–53 (in Russ.).
7. *Pedagogika. Bol'shaya sovremennaya entsiklopediya (Pedagogy. Great modern encyclopedia)*; comp. E.S. Rapatsevich. Minsk: Sovremennoe slovo; 2005. 719 p. (in Russ.). ISBN 985-443-481-8

Об авторах

Шоканова Рашида Джумахановна, аспирант, Московский педагогический государственный университет (119991, Россия, Москва, ул. Малая Пироговская, д. 1, стр. 1). E-mail: shokra2608@mail.ru.

Тарасова Елена Николаевна, д. пед. наук, заведующий кафедрой русского языка (как иностранного) Института международного образования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: tarasova_e@mirea.ru.

About the authors

Rashida D. Shokanova, Graduate Student, Moscow Pedagogical State University (1, str. 1, M. Pirogovskaya ul., Moscow, 119991 Russia). E-mail: shokra2608@mail.ru.

Elena N. Tarasova, Dr. Sci. (Education), Head of the Department of Russian Language (as a Foreign Language), Institute of International Education, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: tarasova_e@mirea.ru.

