**VİTMO** 

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ январь-февраль 2025 Том 25 № 1 http://ntv.ifmo.ru/ SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS January-February 2025 Vol. 25 No 1 http://ntv.ifmo.ru/en/ ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОЛТИК

# ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ OPTICAL ENGINEERING

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-1-8 УДК 681.78; 621.3; 621.396; 004.932

#### Многоспектральная оптико-электронная система Алексей Владимирович Григорьев<sup>1</sup>, Анатолий Владимирович Демин<sup>2</sup>, Евгений Николаевич Сечак<sup>3⊠</sup>

<sup>1</sup> АО «Вологодский оптико-механический завод», Вологда, 160009, Российская Федерация

<sup>2,3</sup> АО «ЛОМО», Санкт-Петербург, 194044, Российская Федерация

<sup>1</sup> scpence@vomz.ru, https://orcid.org/0009-0005-4695-6766

<sup>2</sup> dav\_60@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-2605-0964

<sup>3</sup> sechakevgeny@gmail.com<sup>\Box</sup>, https://orcid.org/0000-0002-8810-2022

#### Аннотация

Введение. Аэрофотооборудование и космические системы дистанционного зондирования поверхности Земли позволяют решать разнообразные задачи в условиях быстро изменяющихся оптико-физических параметров и динамики полета. Несмотря на свои преимущества, аэрофотографирование имеет ряд недостатков, которые ограничивают его применение в реальных условиях. К таким недостаткам можно отвести необходимость высокого уровня технологии процесса получения аэрофотоснимка и сравнительно большой срок обработки фотоматериалов в условиях быстро меняющихся техногенных процессов в зоне мониторинга. В данной работе рассмотрена актуальная задача создания многоспектральной оптико-электронной системы (комплекса) дистанционного зондирования Земли. Разработанная система позволяет получать информацию о характеристиках поверхности Земли преимущественно в видимом и инфракрасном диапазонах спектра. Основным достоинством мультиспектральных оптических и оптико-электронных комплексов является возможность работы в любое время суток и время года. Описан принцип построения авиационных интегрированных многоспектральных оптико-электронных систем, работающих на высоте до стратосферы, и основные его компоненты. Показаны возможности и перспективы применения таких систем в различных областях, включая мониторинг и управление. Метод. Предложена структурно-функциональная схема устройства, включающая независимые каналы сбора, хранения и передачи информации. Функциональное назначение экспериментального образца — поиск и обнаружение объектов ниже облаков в инфракрасном диапазоне. Канал видимого диапазона выполняет функцию ориентации зрительного восприятия оператора в пространстве и получения изображения объекта. Для передачи собранной информации предусмотрен канал лазерной связи. Основные результаты. Исследования экспериментального образца авиационного двухканального оптико-электронного комплекса, конструктивно выполненного как комплексированная техническая система с независимыми каналами и работающая в видимой и инфракрасной областях спектра, показали высокую точность и эффективность работы системы. Точность работы системы стабилизации составила около 7·10-9 с-1, дальность действия в инфракрасном диапазоне спектра не менее 150 км, необходимое время экспозиции не более 2 с. Обсуждение. Результаты работы могут быть использованы для дальнейшего развития и усовершенствования многоспектральных оптико-электронных систем дистанционного зондирования Земли.

#### Ключевые слова

многоспектральные оптико-электронные комплексы, оптическая система, 3D-модель, аэросъемка, лазерная связь

Ссылка для цитирования: Григорьев А.В., Демин А.В., Сечак Е.Н. Многоспектральная оптико-электронная система // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 1. С. 1–8. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-1-8

<sup>©</sup> Григорьев А.В., Демин А.В., Сечак Е.Н., 2025

### Multispectral optoelectronic system

#### Alexey V. Grigoriev<sup>1</sup>, Anatoliy V. Demin<sup>2</sup>, Evgenii N. Sechak<sup>3</sup>

<sup>1</sup> JSC "Vologda Optical and Mechanical Plant", Vologda, 160009, Russian Federation

<sup>2,3</sup> JSC "LOMO", Saint Petersburg, 194044, Russian Federation

<sup>1</sup> scpence@vomz.ru, https://orcid.org/0009-0005-4695-6766

<sup>2</sup> dav 60@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-2605-0964

<sup>3</sup> sechakevgeny@gmail.com<sup>⊠</sup>, https://orcid.org/0000-0002-8810-2022

#### Abstract

Aerial photography equipment and space systems for remote sensing of the Earth's surface make it possible to solve various problems in conditions of rapidly changing optical and physical parameters and flight dynamics. Despite its advantages, aerial photography has a number of disadvantages that limit its application in real conditions: the need for a high level of technology for obtaining an aerial photograph, a relatively long period of processing photographic materials in conditions of rapidly changing man-made processes in the monitoring zone. This article discusses the urgent task of creating a multispectral optical-electronic system (complex) for remote sensing of the Earth, which allows obtaining information about the characteristics of the surface in different spectral ranges, primarily in the visible and infrared. The main advantage of multispectral optical and optical-electronic complexes is the ability to work at any time of day or night and at any time of year. The article discusses the principle of constructing aviation integrated multispectral opticalelectronic systems operating at an altitude of up to the stratosphere, and its main components. From a modern perspective, the possibilities and prospects for using such systems in various fields, including monitoring and control, are shown. A structural and functional diagram of the device is proposed, including independent channels for collecting, storing and transmitting information. The functional purpose of the experimental sample is to search for and detect objects below the clouds in the infrared range. The visible range channel performs the function of orienting the operator's visual perception in space and obtaining an image of the object. A laser communication channel is provided for transmitting the collected information. Studies of the experimental sample of the aviation two-channel optical-electronic complex, structurally implemented as an integrated technical system with independent channels and operating in the visible and infrared spectral regions, showed high accuracy and efficiency of the system. The accuracy of the stabilization system was about  $7 \cdot 10^{-9}$  s<sup>-1</sup>, the range in the infrared range is at least 150 km, the required exposure time is no more than 2 s. The results of the work can be used for further development and improvement of multispectral optical-electronic systems for remote sensing of the Earth.

#### Keywords

multispectral optoelectronic complexes, optical system, 3D model, aerial photography, laser communication

For citation: Grigoriev A.V., Demin A.V., Sechak E.N. Multispectral optoelectronic system. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 1, pp. 1–8 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-1-8

#### Введение

Аэрофотооборудование и космические системы дистанционного зондирования поверхности Земли (ДЗЗ) позволяют решать разнообразные задачи в условиях быстро изменяющихся оптико-физических параметров и динамики полета. Однако, несмотря на свои преимущества, аэрофотографирование имеет ряд недостатков, которые ограничивают его применение в реальных условиях. В частности, существует потребность высокого уровня технологии процесса получения аэрофотоснимка. Сравнительно большой срок обработки фотоматериалов делает получение информации в реальном масштабе времени нецелесообразным для динамически изменяющихся техногенных процессов в зоне мониторинга [1–4].

Внедрение в практику бортовых авиационных многоспектральных оптико-электронных комплексов, работающих в диапазоне электромагнитного излучения (0,28–1000 мкм), позволяет расширить круг решаемых научно-технических задач при зондировании поверхности Земли и атмосферы на фоне оптико-физических помех.

Основным преимуществом мультиспектральных оптических и оптико-электронных комплексов является возможность работы в любое время суток и время года, поскольку любой объект в соответствии с законом Планка является источником электромагнитного излучения [1-8].

Установление информационного контакта многоспектральной оптико-электронной системы (МОЭС) с объектом по сути является решением задачи «вскрытия» (поиск, обнаружение, идентификация, пеленгация) объекта на фоне помех. При этом, если в видимом диапазоне спектра излучения объект наблюдается за счет его подсветки естественным или искусственным источником потока фотонов, а оптический и геометрический контраст объекта зависит от фона и является признаком «вскрытия», то в инфракрасном диапазоне это возможно за счет термодинамического контраста излучения объекта и фона, формируемого за счет двух независимых физических факторов [1, 5, 7, 9].

В последние годы наблюдается стремительный рост интереса к использованию авиационных и космических систем ДЗЗ для решения различных задач, таких как мониторинг окружающей среды, управление природными ресурсами, наблюдение за изменениями климата и др. Однако для эффективного решения этих задач необходимы более точные и быстрые методы получения информации.

Например, система Multispectral Camera Array компании ITRES [10], представляет собой комплекс из четырех камер, работающих в разных спектральных диапазонах (синий, зеленый, красный и ближний инфракрасный). Однако эта система имеет ряд недостатков, таких как ограниченная разрешающая способность и необходимость дополнительной обработки данных для получения точной информации.

Система Airborne Imaging Spectrometer for Applications компании SPECIM [10] представляет собой гиперспектральную камеру, работающую в диапазоне от 400 до 1000 нм. Известно, что эта система имеет высокую стоимость и требует специального оборудования для обработки информации.

Система Compact Airborne Spectrographic Imager компании ITRES [10] представляет собой компактную гиперспектральную камеру, работающую в диапазоне от 400 до 1000 нм. Система имеет ограниченную разрешающую способность и требует дополнительной обработки данных для получения точной информации.

Анализ научных работ показал, что МОЭС в основном создаются как комплексированные, и только в системах спектрального анализа — комбинированные, в которых присутствует изображение анализируемого объекта (как правило — спектральный анализ материалов и биологических объектов). Главный недостаток комплексированных и комбинированных МОЭС — все изображения наблюдаемой сцены в разных спектрах анализируются оператором раздельно. Это не позволяет создать единую картину, т. е. идентифицировать интересующий объект с его типом и соответствующей привязкой на местности, что необходимо в системах управления особенно когда анализ необходимо выполнять в реальном масштабе времени [1–4, 10–13].

Преимущество аэросъемки поверхности Земли с помощью МОЭС, в отличие от панхроматической аэрофотосъемки, — данные системы позволяют получать информацию в большем объеме и в масштабе реального времени. Это дает возможность более эффективно решать задачи мониторинга и управления, такие как обнаружение изменений в окружающей среде, наблюдение за движением транспорта и т. п.

В настоящей работе рассматривается принцип построения авиационных интегрированных МОЭС, работающих на высоте до стратосферы, и основные их компоненты. Изучены возможности и перспективы применения, интегрированных МОЭС в различных областях, включая мониторинг и управление.

#### Функциональный состав и возможности МОЭС

МОЭС ДЗЗ представляет собой сложную систему, которая включает в себя несколько функциональных блоков, работающих вместе для получения и обработки данных. Функциональный состав такой системы может быть представлен следующим образом:

- блок сбора данных включает сенсоры различных типов (камеры, спектрометры, радары и т. д.), которые собирают данные об окружающей среде;
- блок обработки данных состоит из процессоров (центрального процессорного узла, графического процессорного узла, программируемой логической интегральной схемы и т. д.), которые обрабатывают данные, собранные сенсорами;

- блок управления содержит системы (управления полетом, управления сенсорами и др.), которые управляют работой МОЭС ДЗЗ;
- блок передачи данных объединяет системы, которые передают данные, собранные и обработанные системой, на Землю или в другие системы;
- блок питания обеспечивает питание системы (батареи, солнечные панели и т. д.).

МОЭС Д33 имеет следующие функциональные возможности: сбор данных (получение данных об окружающей среде в различных спектральных диапазонах); обработка данных (анализ данных, собранных сенсорами, для получения информации об окружающей среде); управление (система управления работой, включая управление полетом, сенсорами и др.); передача данных (пересылка информации, собранной и обработанной системой, на Землю или в другие системы).

Функциональный состав МОЭС представлен в варианте его исполнения для съемки поверхности Земли в диапазонах электромагнитного излучения: 0,38– 0,95 мкм, 3–5 мкм, 7,5–12 мкм.

Преимущество МОЭС Д33 — повышенная точность. Система может обеспечить более точные данные, чем отдельные сенсоры и более высокую скорость обработки данных, чем отдельные процессоры. Также МОЭС имеет более высокую гибкость в выборе сенсоров и процессоров.

МОЭС можно рассматривать как сложную техническую систему, функционирующую за счет действия совокупности законов физической оптики, механики, термодинамики, электродинамики и информатики, на вход которой поступает электромагнитное излучение оптического диапазона от объекта и фона, а на выходе — информация [11].

Структура МОЭС может состоять из двух или нескольких оптических каналов и подразделяется на три типа [2, 8, 11]. В первом типе МОЭС (комплексированная) оптические каналы объединены в единую конструкцию, в этом случае их оптические оси параллельны (такая конструкция позволяет увеличить разрешающую способность системы и повысить точность измерений), а для второго типа (комбинированная) — оптические каналы объединены путем полного или частичного совмещения их оптических осей (это дает возможность уменьшить размеры системы и повысить ее компактность). Третий тип (интегрированная) — оптические каналы МОЭС объединены на основе оптической системы, которая формирует единое многоспектральное изображение (можно получить полную информацию о наблюдаемом объекте и повысить точность измерений).

Компонентами МОЭС, обеспечивающими решение основной задачи — «вскрытие» объекта, — являются мультиспектральная оптическая система, которая позволяет собирать информацию о наблюдаемом объекте в различных спектральных диапазонах, и система приема и преобразования информации (СППИ) — принимающая и преобразовывающая информацию, собранную мультиспектральной оптической системой. На современном этапе СППИ должна обладать элементами искусственного интеллекта, которые позволяют авто-



Рис. 1. Функциональный состав авиационной многоспектральной оптико-электронной системы: ЛА с КП — летательный аппарат с командным пунктом; ВД — видимый диапазон; ФПУ — фотоприемное устройство; ИК1 — инфракрасный диапазон 1; ИК2 — инфракрасный диапазон 2; Δλ<sub>1</sub> — диапазон электромагнитного излучения 0,38–0,95 мкм, Δλ<sub>2</sub> — диапазон электромагнитного излучения 3–5 мкм; Δλ<sub>3</sub> — диапазон электромагнитного излучения 7,5–12 мкм

*Fig. 1.* Functional composition of an aviation multispectral optoelectronic system: MOOC is Multispectral Optical Electronics System;  $\Pi A c K\Pi$  is an aircraft with a control panel and with a command post;  $B\Pi$  is the visible range;  $\Phi\Pi Y$  is a photodetector; HK1 is the infrared range 1; HK2 is the infrared range 2;  $\Delta\lambda_1$  is the range of electromagnetic radiation 0.38–0.95  $\mu$ ,  $\Delta\lambda_2$  is the range of electromagnetic radiation 7.5–12  $\mu$ 

матически обрабатывать и анализировать полученную информацию [11].

Основными характеристиками МОЭС являются спектральный диапазон работы, разрешающая способность, светосила, оптическая передаточная функция, угол поля зрения, фокусное расстояние (таблица).

Спектральный диапазон работы определяет возможности системы в различных областях применения. Например, системы, работающие в видимом спектральном диапазоне, могут быть использованы для наблюдения за объектами на поверхности Земли, а системы, работающие в инфракрасном диапазоне для наблюдения за объектами в атмосфере или за пределами Земли.

Для решения задачи одновременного анализа пространственного распределения и спектральных характеристик наблюдаемых объектов, процессов и явлений в МОЭС вводится гиперспектральный съемочный канал. Для гиперспектральной съемки важно количество спектральных зон (каналов), ширина зоны и последовательность измерений, при этом ширина каждой спектральной зоны не более 10 нм (в видимом диапазоне — 4 нм).

«Гиперкуб» входных данных, состоящий из строк и столбцов, является трехмерной матрицей, включающей пространственное распределение яркостей в поле зрения МОЭС и длин волны регистрируемого излучения. Поскольку «гиперкуб» данных получается в результате обусловленных условий съемки, и является впоследствии базой, а «гиперкуб», полученный в результате гиперспектроскопической съемки в реальных условиях и масштабе времени, однозначно не соответствуют базе,

| Основные<br>характеристики      | Возможности системы   | Основные параметры   |  |
|---------------------------------|---|--|--|
| Разрешающая способ-<br>ность    | различает два близких объекта   | диаметр входного зрачка, фокусное расстояние и спектральный диапа-<br>зон работы |  |
| Светосила                       | собирает свет от наблюдаемого объекта   |  |  |
| Оптическая передаточная функция | описывает связь между оптическими параметрами наблюда-<br>емого объекта и его изображением  |  |  |
| Угол поля зрения                | угол, под которым наблюдаемый объект виден в изображении  | диаметр входного зрачка и фокус-<br>ное расстояние                               |  |
| Фокусное расстояние             | определяет расстояние между оптической системой и на-<br>блюдаемым объектом, при котором изображение объекта<br>формируется в фокальной плоскости | диаметр входного зрачка и спек-<br>тральный диапазон работы                      |  |

*Таблица*. Основные характеристики и факторы, влияющие на МОЭС *Table*. The main characteristics and factors affecting the Multispectral Optical Electronics System (MOES)

то для принятия решения о правильном распознавании и идентификации наблюдаемого объекта требуется время (возможно, не малое). В этой связи применение искусственного интеллекта при анализе результатов гиперспектроскопической съемки позволяет принять объективное и правильное решение в реальном масштабе времени [14–16].

СППИ с искусственным интеллектом, с вычислителем и выходом на систему связи летательных аппаратов с командным пунктом на Земле является основной подсистемой формирования выходной информации на основании пространственно-энергетической связи поверхности Земли и фотозоной, создаваемой оптической системой. Фотозона формируется фотоприемниками с предусилителями, каждый из которых работает в своей спектральной зоне и реагирует в видимом диапазоне на поток фотонов, а в инфракрасном диапазоне — на тепловое излучение.

Фотоприемные матрицы располагаются на прецизионной посадочной поверхности и согласованы с рабочей системой координат МОЭС. Следует отметить, что геометрическая проекция пиксела на поверхности Земли в надире должна быть не больше требуемого от МОЭС линейного разрешения на поверхности Земли, а чувствительность приемника при соответствующей площади входного зрачка оптической системы МОЭС должна обеспечивать необходимое отношение сигнал/ шум [11, 15, 16].

Система распознавания объекта в МОЭС формирует интегрированное изображение с применением результатов гиперспектральной съемки и искусственного интеллекта в реальном масштабе времени. Если на летательном аппарате нет возможности иметь компьютер, то задача распознавания решается на командном пункте путем оперативной передачи информации. Более полное раскрытие принципов построения СППИ является предметом отдельной работы, когда важно учитывать влияние атмосферы [17], качество оптического изображения [18] и аспекты восприятия изображения [19].

#### Оптическая линия лазерной связи

Применение оптических линий лазерной связи позволяет преодолеть проблемы радиочастотных линий связи, связанные с необходимостью передачи больших объемов информации (особенно видеоинформации) со скоростью не менее 1,2 Гбит/с (скорость передачи информации по радиолинии не более 0,1 Гбит/с). При практической реализации методов лазерной связи неизбежно возникает множество технических проблем, в частности с малой расходимостью лазерного пучка и требованием значительно более точного его позиционирования относительно командного пункта, чем радиолуч. Тем самым необходимо в состав МОЭС ввести канал лазерной связи (канал дуплексной лазерной связи или терминал, который может быть отдельно размещен на борту летательном аппарате), у которого приемопередающая оптическая антенна постоянно ориентирована на командный пункт [16, 20, 21]. Это позволит обеспечить стабильную связь между летательным аппаратом и командным пунктом и передавать данные в режиме реального времени. Система стабилизации должна обеспечивать стабильное положение линии визирования и компенсировать механические воздействия на комплекс от летательного аппарата. Таким образом, для корректной приемо-передачи информации с борта летательного аппарата на командный пункт необходимо учитывать большой перечень внешних дестабилизирующих факторов, ключевые аспекты и подробное описание которых представлены в работах [12, 20, 21].

Алгоритмы обработки сигналов в МОЭС должны быть разработаны с учетом специфики системы и задач, которые она решает. Это включает в себя разработку алгоритмов фильтрации, компенсации и коррекции сигналов, а также алгоритмов распознавания и классификации объектов.

Таким образом, МОЭС является сложной системой, которая требует решения многих технических проблем для обеспечения стабильной и точной работы. Применение оптических линий лазерной связи и системы стабилизированного управления линией визирования позволяет преодолеть некоторые из этих проблем и обеспечить стабильную связь между летательным аппаратом и командным пунктом.

#### Структурно-функциональная схема МОЭС

Структурно-функциональная схема инфракрасного канала представлена на рис. 2. Эта схема включает оптическую систему инфракрасного канала, фотоприемное устройство, блок электронной обработки, устройство управления по тангажу.

На рис. 3 представлена сборка МОЭС, выполненная на этапе эскизного проектирования. МОЭС включает в себя оптические системы видимого и инфракрасного каналов, опорно-поворотное устройство оптических каналов по тангажу и рысканию, креновую платформу с устройством управления. Подробное описание оптико-механического блока на опорно-поворотном устройстве представлено в работе [11]. В результате создания рабочей конструкторской документации на изделие с последующим изготовлением и корректировкой расчета изготовлен экспериментальный образец (рис. 4). В ходе наземной экспериментальной отработки были проведены испытания для подтверждения заложенных технических характеристик изделия, после которых было принято решение об изготовлении опытного образца для летных испытаний в реальных условиях эксплуатации.

Функциональное назначение экспериментального образца — поиск и обнаружение объектов ниже облаков в инфракрасном диапазоне. Канал видимого диапазона выполняет функцию ориентации зрительного восприятия оператора в пространстве и получения изображения объекта.



*Рис. 2.* Структурно-функциональная схема инфракрасного канала двухканальной авиационной многоспектральной оптикоэлектронной системы

Fig. 2. Structural and functional diagram of the infrared channel of a two-channel aviation MOES



Рис. 3. Компоновочная модель многоспектральной оптико-электронной системы:

РГС — разъем герметичный с защитой; ШРГ — штепсельный разъем герметичный; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; БОЭ — блок оборудования энергетического

*Fig. 3.* Layout model of a multispectral optoelectronic system: ШРГ — hermetically sealed connector; PΓC — hermetically sealed plug connector; AЦΠ — analog-to-digital converter; БОЭ – power equipment unit



Рис. 4. Экспериментальный образец многоспектральной оптико-электронной системы. Габаритные размеры образца: длина 855 мм; диаметр 520 мм; световой диаметр системы 345 мм

*Fig. 4.* An experimental sample of a multispectral optoelectronic system. Overall dimensions of the sample: length 855 mm; diameter 520 mm; light diameter of the system 345 mm

#### Заключение

Показаны преимущества аэросъемки поверхности Земли с помощью многоспектральной оптико-электронной системы, которые, в отличии от панхроматической

#### Литература

- 1. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Многоспектральные оптико-электронные системы // Специальная техника. 2002. № 4. С. 56–62.
- Алишев Я.В. Многоканальные системы передачи оптического диапазона. Минск: Вышэйшая школа, 1986. 235 с.
- Кондратьев А.В. Методы обработки цифровой многоспектральной спутниковой информации. СПб.: РГГМИ, 1997. 107 с.
- Григорьев А.В., Демин А.В. Многоканальные и многоспектральные оптико-электронные комплексы // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2023. № 3. С. 3–8.
- Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приёмниками излучения. М.: Университетская книга: Логос, 2007. 191 с.
- Мордвин Н.Н., Попов Г.Н. Концепция построения оптико-электронных приборов наблюдения универсального назначения // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2009. Т. 52. № 6. С. 34–39.
- Вольф У., Цисис Г. Справочник по инфракрасной технике. Т. 1. М.: Мир, 1995. 608 с.
- Моисеев В.А., Терешин Е.А., Демьянов Э.А., Журавлев П.В., Ульянова Е.О., Шатунов К.П., Чурилов С.М. Принципы построения многоспектральных комплексированных оптико-электронных систем // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2004. Т. 47. № 9. С. 51–57.
- Григорьев А.В., Демин А.В. Имитационная модель пассивного детектирования высокоскоростных летательных аппаратов // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2023. № 2. С. 55–59.
- Ma W., Wan Y., Li J., Zhu S., Wang M. An automatic morphological attribute building extraction approach for satellite high spatial resolution imagery // Remote Sensing. 2019. V. 11. N 3. P. 337. https://doi.org/10.3390/rs11030337
- Демин А.В., Цыцулин А.К., Нонин А.С., Семашкин О.И., Михайловский А.И., Добряков Б.Н., Денисов А.В., Сечак Е.Н., Сторощук О.Б. Авиационный многоспектральный оптико-электронный комплекс // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2024. № 3. С. 18–26.

аэрофотосъемки, позволяют получать информацию в большем объеме и в масштабе реального времени. Это достигается за счет использования многоспектральных оптико-электронных систем, которые могут собирать информацию в различных спектральных диапазонах, включая видимый и инфракрасный.

Впервые предложена структурно-функциональная схема многоспектральной оптико-электронной системы, которая позволяет разработчику комплексов помимо проектирования создавать методику комплексного экспериментального исследования. Схема включает в себя следующие основные компоненты: оптические системы, системы стабилизации, системы управления и системы передачи данных. Оптические системы включают в себя многоспектральные камеры, которые могут собирать информацию в различных спектральных диапазонах. Для обеспечения передачи результатов аэросъемки многоспектральной оптико-электронной системы на командный пункт Земли предусмотрена лазерная связь, которая позволяет передавать большие объемы данных в режиме реального времени и обеспечивает высокую точность и надежность передачи.

Испытания экспериментального авиационного двухканального оптико-электронного комплекса, разработанного как комплексная техническая система с независимыми каналами, показали его высокую точность и эффективность работы в видимом и инфракрасном диапазонах спектра.

#### References

- Tarasov V.V., Iakushenkov Iu.G. Multispectral optical-electronic systems. Special'naja tehnika, 2002, no. 4, pp. 56–62. (in Russian)
- Alishev Ia.V. Multichannel Optical Range Transmission Systems. Minsk, Vyshjejshaja shkola Publ., 1986, 235 p. (in Russian)
- Kondratev A.V. Processing Methods for Digital Multispectral Satellite Information. St. Petersburg, RSHU Publ., 1997, 107 p. (in Russian)
- 4. Grigoriev A.V., Demin A.V. Multichannel and multispectral optoelectronic complexes. *Voprosy radiojelektroniki. Serija: Tehnika televidenija*, 2023, no. 3, pp. 3–8. (in Russian)
- Tarasov V.V., Iakushenkov Iu.G. Dual- and Multi-range Opticalelectronic Systems with Matrix Radiation Receivers. Moscow, Universitetskaja kniga: Logos, 2007, 191 p. (in Russian)
- Mordvin N.N., Popov G.N. Conceptual design of universal opticalelectronic observation devices. *Journal of Instrument Engineering*, 2009, vol. 52, no. 6, pp. 34–39. (in Russian)
- Wolfe W.L., Zissis G.J. *The Infrared Handbook*. General Dynamics, 1985, 1700 p.
- Moiseyev V.A., Tereshin E.A., Demjanov E.A., Zhuravlev P.V., Ulyanova E.O., Shatunov K.P., Churilov S.M. Realization ways of multispectral integrated of optoelectronic systems. *Journal of Instrument Engineering*, 2004, vol. 47, no. 9, pp. 51–57. (in Russian)
- Grigoriev A.V., Demin A.V. Simulation model of passive detection of high-speed aircraft. *Voprosy radiojelektroniki. Serija: Tehnika televidenija*, 2023, no. 2, pp. 55–59. (in Russian)
- Ma W., Wan Y., Li J., Zhu S., Wang M. An automatic morphological attribute building extraction approach for satellite high spatial resolution imagery. *Remote Sensing*, 2019, vol. 11, no. 3, pp. 337. https://doi.org/10.3390/rs11030337
- Demin A.V., Tsytsulin A.K., Nonin A.S., Semashkin O.I., Mikhailovsky A.I., Dobriakov B.N., Denisov A.V., Sechak E.N. Aviation multispectral optical-electronic complex. *Voprosy radiojelektroniki. Serija: Tehnika televidenija*, 2024, no. 3, pp. 18–26. (in Russian)
- Demin A.V., Sorokin A.V., Gordeev D.M., Belyansky M.A., Ptitsyna A.S., Shalkovskiy A.G., Churikov A.B., Smolin A.S.

- Демин А.В., Сорокин А.В., Гордеев Д.М., Белянский М.А., Птицына А.С., Шалковский А.Г., Чуриков А.Б., Смолин А.С. Авиационный теплопеленгатор // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2011. Т. 54. № 5. С. 93–97.
- Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В.А. Сойфера. М.:Физматлит, 2003. 784 с.
- Горбунов Г.Г., Демин А.В., Никифоров В.О., Савицкий А.М., Скворцов Ю.С., Сокольский М.Н., Трегуб В.П. Гиперспектральная аппаратура для дистанционного зондирования Земли // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 10. С. 75–82.
- Серебряков Д.А., Гареев В.М., Гареев М.В., Корнышев Н.П. Особенности формирования изображений в гиперспектральной системе на базе интерферометра Фабри-Перо // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2023. № 1. С. 128–132.
- Вагин В.А., Гершун М.А., Жижин Г.Н., Тарасов К.И. Светосильные спектральные приборы. М.: Наука, 1988. 262 с.
- Зуев В.В., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 256 с.
- Вычислительная оптика: Справочник / Под общ. ред. М.М. Русинова. Л:. Машиностроение, 1984. 423 с.
- Красильников Н.Н. Теория передачи и восприятия изображений. Теория передачи изображений и ее приложения. М.: Радио и связь, 1986. 246 с.
- 20. Демин А.В., Попов В.В., Зимин В.А., Сторощук О.Б., Цыцулин А.К. Космическая лазерная система дуплексной связи // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2023. № 4. С. 14–22.
- Григорьев А.В., Демин А.В. Стабилизация изображения в многоканальных оптико-электронных комплексах // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2023. № 3. С. 9–14.

#### Авторы

**Григорьев Алексей Владимирович** — заместитель генерального директора по науке, АО «Вологодский оптико-механический завод», Вологда, 160009, Российская Федерация, https://orcid.org/0009-0005-4695-6766, scpence@vomz.ru

Демин Анатолий Владимирович — доктор технических наук, профессор, начальник бюро, АО «ЛОМО», Санкт-Петербург, 194044, Российская Федерация, вс 56921555500, https://orcid.org/0009-0006-2605-0964, dav\_60@mail.ru

Сечак Евгений Николаевич — кандидат технических наук, начальник специализированного конструкторского бюро, АО «ЛОМО», Санкт-Петербург, 194044, Российская Федерация, sc 57218939105, https://orcid.org/0000-0002-8810-2022, sechakevgeny@gmail.com

Статья поступила в редакцию 19.09.2024 Одобрена после рецензирования 08.11.2024 Принята к печати 23.01.2025



Airborne heat direction finder. *Journal of Instrument Engineering*, 2011, vol. 54, no. 5, pp. 93–97. (in Russian)

- 13. Methods of Computer Image Processing / ed. by V.A. Soifer. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003, 784 p. (in Russian)
- Gorbunov G.G., Demin A.V., Nikiforov V.O., Savitskii A.M., Skvortsov Y.S., Sokol'skii M.N., Tregub V.P. Hyperspectral apparatus for remote probing of the earth. *Journal of Optical Technology*, 2009, vol. 76, no. 10, pp. 651–656. (in Russian). https://doi.org/10.1364/ JOT.76.000651
- Serebrjakov D.A., Gareev V.M., Gareev M.V., Kornyshev N.P. Features of image formation in a hyperspectral system based on the Fabry-Perot interferometer. *Voprosy radiojelektroniki. Serija: Tehnika televidenija*, 2023, no. 1, pp. 128–132. (in Russian)
- Vagin V.A., Gershun M.A., Zhizhin G.N., Tarasov K.I. *High-aperture* Spectral Instruments. Moscow, Nauka Publ., 1988, 262 p. (in Russian)
   Zuev V.E., Krekov G.M. Optical Models of the Atmosphere.
- Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1986, 256 p. (in Russian)
- Optical Computation. Handbook / ed. by M.M. Rusinov. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1984, 423 p. (in Russian)
- Krasilnikov N.N. Theory of the Images Transfer and Sensing. Theory of the Images Transfer and its Applications. Moscow, Radio i svjaz' Publ., 1986, 246 p. (in Russian)
- Demin A.V., Popov V.V., Zimin V.A., Storoschuk O.B., Tsytsulin A.K. Space laser duplex communication system. *Voprosy radiojelektroniki*. *Serija: Tehnika televidenija*, 2023, no. 4, pp. 14–22. (in Russian)
- Grigoriev A.V., Demin A.V. Image stabilization in multichannel optoelectronic complexe. *Voprosy radiojelektroniki. Serija: Tehnika televidenija*, 2023, no. 3, pp. 9–14. (in Russian)

#### Authors

Alexey V. Grigoriev — Deputy Director General for Science, JSC "Vologda Optical and Mechanical Plant", Vologda, 160009, Russian Federation, https://orcid.org/0009-0005-4695-6766, scpence@vomz.ru

Anatoliy V. Demin — D.Sc., Professor, Head of the Advanced Development Bureau, JSC "LOMO", Saint Petersburg, 194044, Russian Federation, Sc 56921555500, https://orcid.org/0009-0006-2605-0964, day 60@mail.ru

**Evgenii N. Sechak** — PhD, Head of the Specialized Design Bureau, JSC "LOMO", Saint Petersburg, 194044, Russian Federation, **SC** 57218939105, https://orcid.org/0000-0002-8810-2022, sechakevgeny@gmail.com

Received 19.09.2024 Approved after reviewing 08.11.2024 Accepted 23.01.2025

Работа доступна по лицензии Creative Commons «Attribution-NonCommercial» **VİTMO** 

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ январь-февраль 2025 Том 25 № 1 http://ntv.ifmo.ru/ SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS January-February 2025 Vol. 25 No 1 http://ntv.ifmo.ru/en/ ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКІ

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-9-22 УДК 538.975

# Исследование влияния длины волны лазерного излучения на эффект дихроизма в пленках ZnO:Ag

Владислав Романович Гресько<sup>1⊠</sup>, Максим Михайлович Сергеев<sup>2</sup>, Артур Джуракулович Долгополов<sup>3</sup>, Лилия Александровна Сокура<sup>4</sup>, Евгений Анатольевич Григорьев<sup>5</sup>

1,2,3,4 Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

<sup>4</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

<sup>5</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация

<sup>1</sup> gresko.97@mail.ru<sup>\boxdot</sup>, https://orcid.org/0000-0003-3308-6034

<sup>2</sup> maxim.m.sergeev@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-2854-9954

<sup>3</sup> addolgopolov@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-9548-791X

<sup>4</sup> sokuraliliy@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9725-5912

<sup>5</sup> grigoryev\_egeniy@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0614-6695

#### Аннотация

Введение. Пленки ZnO:Ag применяются в качестве фотопоглощающих слоев в плазмонных фотодетекторах. Применение лазерного излучения при изготовлении фотодетекторов позволяет управлять параметрами пика плазмонного резонанса и изменять диапазон спектральной чувствительности устройства. Известные исследования по лазерному воздействию на подобные фотопоглощающие пленки с наночастицами уделяют мало внимания эффекту дихроизма, возникающему в результате лазерного воздействия. При наличии дихроизма эффективность плазмонного фотодетектора зависит от поляризации детектируемого излучения. В работе исследован эффект дихроизма, возникающий в ZnO:Ад пленках при воздействии фемтосекундного лазерного излучения с длинами волн вблизи плазмонного резонанса наночастиц и вдали от него. Метод. Для получения эффекта дихроизма в пленках использовались лазерные импульсы с длиной волны вблизи плазмонного резонанса наночастиц (515 ± 5 нм) и вдали от него (1030 ± 5 нм). Применены импульсы с линейной поляризацией длительностью 224 ± 15 фс и частотой следования 200 кГц. Спектры пропускания линейнополяризованного света с областями пленок ZnO:Ag, модифицированными лазерным излучением, получены с помощью микроскопа-спектрофотометра. Размер, концентрация, форма и расположение наночастиц в пленках, морфология поверхности пленок оксида цинка (ZnO) исследовались методами электронной микроскопии. Основные результаты. Показано, что лазерное излучение с длиной волны вблизи плазмонного резонанса наночастиц с плотностью энергии в импульсе выше 43 ± 0,5 мДж/см<sup>2</sup>, приводит к появлению в пленках эффекта дихроизма. Возникновение этого эффекта связано с переориентацией наночастиц. Лазерное воздействие приводит к переориентации исходного хаотичного расположения наночастиц в направление, параллельное вектору поляризации лазерного излучения. Наибольшее значение величины линейного дихроизма достигается в области длин волн плазмонного резонанса 515 ± 5 нм при плотности энергии излучения 66 ± 0,5 мДж/см<sup>2</sup>. Дальнейшее увеличение плотности энергии приводит к уменьшению дихроизма за счет возвращения хаотической ориентации. Воздействие излучения с длиной волны вдали от плазмонного резонанса 1030 ± 5 нм с эквивалентными плотностями энергии не приводит к переориентации наночастиц и, как следствие, изменение величины линейного дихроизма оказывается значительно ниже. Обсуждение. Согласно предложенной гипотезе отличия между результатами лазерного воздействия могут быть связаны с различными механизмами поглощения излучения в материале. Излучение с длиной волны 515 ± 5 нм поглощается наночастицами. В случае линейной поляризации излучения происходит ионизация наночастиц и их переориентация параллельно вектору поляризации. На длине волны 1030 ± 5 нм излучение поглощается матрицей ZnO. Это приводит к нагреву пленки, передаче тепла к наночастицам, в результате процесс переориентации наночастиц параллельно вектору поляризации затрудняется, а эффект дихроизма проявляется значительно меньше. Результаты проведенного исследования могут быть использованы при проектировании и изготовлении фотодетекторов за счет выявленной возможности смещать пик плазмонного резонанса наночастиц в фотопоглощающем слое фотодетектора. Управление эффектом дихроизма позволяет управлять диапазоном чувствительности детекторов.

© Гресько В.Р., Сергеев М.М., Долгополов А.Д., Сокура Л.А., Григорьев Е.А., 2025

#### Ключевые слова

фемтосекундные лазерные импульсы, дихроизм, золь-гель пленки, пленки оксида цинка, наночастицы серебра, плазмонный резонанс, лазерная модификация

#### Благодарности

Исследования финансировались за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-29-00180). Исследование структуры методом СЭМ-электронной микроскопии было проведено в Центре нанотехнологий Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета в рамках проекта № 118201839.

Ссылка для цитирования: Гресько В.Р., Сергеев М.М., Долгополов А.Д., Сокура Л.А., Григорьев Е.А. Исследование влияния длины волны лазерного излучения на эффект дихроизма в пленках ZnO:Ag // Научнотехнический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 1. С. 9–22. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-9-22

# Study of the influence of laser wavelength on the dichroism effect in ZnO:Ag films Vladislav R. Gresko<sup>1⊠</sup>, Maksim M. Sergeev<sup>2</sup>, Arthur D. Dolgopolov<sup>3</sup>, Liliia A. Sokura<sup>4</sup>, Evgeniy A. Grigoryev<sup>5</sup>

1,2,3,4 ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

<sup>4</sup> Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

<sup>5</sup> St. Petersburg State University (SPbSU), Saint Petersburg, 199034, Russian Federation

<sup>1</sup> gresko.97@mail.ru<sup>\overline{1}</sup>, https://orcid.org/0000-0003-3308-6034

<sup>2</sup> maxim.m.sergeev@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-2854-9954

<sup>3</sup> addolgopolov@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-9548-791X

<sup>4</sup> sokuraliliy@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9725-5912

<sup>5</sup> grigoryev egeniy@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0614-6695

#### Abstract

ZnO:Ag films are used as photoabsorbing layers in plasmonic photodetectors. The use of laser radiation in the manufacture of photodetectors allows one to control the parameters of the plasmon resonance peak and change the range of spectral sensitivity of the device. Known studies on laser action on similar photoabsorbing films with nanoparticles pay little attention to the dichroism effect arising as a result of laser action. In the presence of dichroism, the efficiency of a plasmonic photodetector depends on the polarization of the detected radiation. The aim of this work is to study the dichroism effect arising in ZnO:Ag films under the action of femtosecond laser radiation with wavelengths near the plasmon resonance of nanoparticles and far from it. To obtain the dichroism effect in the films, laser pulses with a wavelength near the plasmon resonance of nanoparticles ( $515 \pm 5$  nm) and far from it ( $1030 \pm 5$  nm) were used. Linearly polarized pulses of  $224 \pm 15$  fs duration and 200 kHz repetition rate were used. Transmission spectra of linearly polarized light by areas of ZnO:Ag films modified by laser radiation were obtained using a spectrophotometer microscope. The size, concentration, shape and arrangement of nanoparticles in the films, and the surface morphology of zinc oxide (ZnO) films were studied using electron microscopy methods. It was shown that laser radiation with a wavelength near the plasmon resonance of nanoparticles with an energy density in a pulse higher than  $43 \pm 0.5$  mJ/cm<sup>2</sup> leads to the appearance of a dichroism effect in the films. The occurrence of this effect is associated with the reorientation of nanoparticles. Laser action leads to a reorientation of the initially chaotic arrangement of nanoparticles in the direction parallel to the polarization vector of the laser radiation. The highest value of the linear dichroism is achieved in the region of plasmon resonance wavelengths of  $515 \pm 5$  nm at a radiation energy density of  $66 \pm 0.5$  mJ/cm<sup>2</sup>. A further increase in the energy density leads to a decrease in dichroism due to the return of chaotic orientation. The effect of radiation with a wavelength far from the plasmon resonance of  $1030 \pm 5$  nm with equivalent energy densities does not lead to a reorientation of nanoparticles and, as a consequence, the change in the linear dichroism value is significantly lower. According to the proposed hypothesis, the differences between the results of laser exposure are associated with different mechanisms of radiation absorption in the material. Radiation with a wavelength of  $515 \pm 5$  nm is absorbed by nanoparticles. In the case of linear polarization of radiation, ionization of nanoparticles and their reorientation parallel to the polarization vector occur. At a wavelength of  $1030 \pm 5$  nm, radiation is absorbed by the ZnO matrix. This leads to heating of the film, heat transfer to the nanoparticles, as a result of which the process of reorientation of nanoparticles parallel to the polarization vector is complicated, and the dichroism effect is much less pronounced. The results of the study can be used in the design and manufacture of photodetectors due to the identified possibility of shifting the peak of plasmon resonance of nanoparticles in the photoabsorbing layer of the photodetector. Control of the dichroism effect allows controlling the sensitivity range of detectors.

#### Keywords

femtosecond laser pulses, dichroism, sol-gel films, zinc oxide films, silver nanoparticles, plasmon resonance, laser modification

#### Acknowledgements

This work was funding supported by the Russian Science Foundation (24-29-00180).

The investigation of the structure by means of scanning electron microscopy was carried out at the IRC for Nanotechnology of the Science Park of St. Petersburg State University within the framework of project No. 118201839.

For citation: Gresko V.R., Sergeev M.M., Dolgopolov A.D., Sokura L.A., Grigoryev E.A. Study of the influence of laser wavelength on the dichroism effect in ZnO:Ag films. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 1, pp. 9–22 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-9-22

#### Введение

Полупроводниковые пленки оксида цинка (ZnO) с наночастицами (НЧ) благородных (Ag, Au, Cu) и других металлов широко применяются в качестве фотопоглощающих слоев в плазмонных фотодетекторах [1]. Наличие НЧ в фоточувствительных материалах влияет на рост поглощения в определенных диапазонах оптического спектра [2], а также способствует улучшению электронного транспорта в полупроводниках [3]. Лазерное воздействие на оптически прозрачные пленки с НЧ позволяет быстро и локально изменять как плазмонные свойства НЧ, так и свойства самой матрицы, что является основой для коррекции фоточувствительности будущих детекторов [4]. Важным для успешной модификации структуры и свойств пленок с НЧ при лазерном воздействии является выбор длины волны излучения. Например, воздействие лазерным излучением с длинами волн 355 нм и 266 нм при плотности энергии выше 100 мДж/см<sup>2</sup> приводит к значительному улучшению кристалличности пленок ZnO, так как эти длины волн находятся в области собственного поглощения материала. В то же время воздействие с длинами волн 532 нм и 1064 нм оказывает гораздо меньший эффект [5]. Наличие НЧ в полупроводниковой пленке, прозрачной в оптически видимом спектре, приводит к появлению пика поглощения в окне прозрачности матрицы пленки, что характерно для плазмонного резонанса НЧ. Лазерное воздействие с длиной волны, близкой к плазмонному резонансу НЧ, также способно оказывать значительное влияние на оптические и морфологические свойства подобных полупроводниковых пленок с металлическими НЧ [6, 7]. В этом случае поглощение излучения происходит непосредственно на НЧ, которые затем передают тепло в окружающую полупроводниковую матрицу. При этом влияние лазерного излучения на анизотропию свойств НЧ в полупроводниковых пленках практически не исследовалось. Известно, что лазерно-индуцированная анизотропия формы НЧ в стеклянной матрице является причиной возникновения дихроизма [8, 9]. Такой эффект присутствует в случае воздействия фемтосекундных лазерных импульсов на серебряные НЧ в силикатной матрице. Наличие дихроизма в светопоглощающем слое фотодетектора приводит к зависимости его оптических и электрических характеристик от ориентации вектора поляризации регистрируемого излучения. Такую особенность требуется учитывать в процессе изготовления фотодетекторов.

Таким образом, для эффективного использования лазерного излучения при создании фотодетекторов важной задачей является определение условий облучения, при которых возникает дихроизм. В работе [10] обнаружено, что для возникновения дихроизма в ZnO пленках с HЧ серебра требовалось использование фемтосекундного лазерного излучения с длиной волны, близкой к пику плазмонного резонанса образца. В результате воздействия лазерными импульсами с линейной поляризацией излучения и плотностью энергии  $(31-131) \pm 0,5$  мДж/см<sup>2</sup> у пленок возникал эффект дихроизма, который связан с появлением анизотропии

формы НЧ. Однако не исследовалось возникновение дихроизма при лазерном воздействии линейно-поляризованного излучения с длиной волны, расположенной вдали от пика плазмонного резонанса.

Целью настоящего исследования стало определение влияния длины волны фемтосекундных лазерных импульсов с линейной поляризацией излучения на эффект дихроизма в золь-гель пленках ZnO с HЧ серебра. Для воздействия на пленки использовалось излучение с длиной волны вдали ( $\lambda_1 = 1030 \pm 5$  нм) и вблизи ( $\lambda_2 = 515 \pm 5$  нм) плазмонного резонанса HЧ. Предположим, что длина волны излучения  $\lambda_i$  находится вблизи длины волны плазмонного резонанса  $\lambda_{pe3}$ , при условии, что разность длин волн  $\Delta\lambda = |\lambda_i - \lambda_{pe3}| < FWHM/2$ , где FWHM (Full Width At Half Maximum) — ширина плазмонного пика на полувысоте.

#### Материалы и методы исследований

Лазерное воздействие на золь-гель пленки ZnO:Ag происходило на установке на базе волоконного фемтосекундного Yb-лазера ANTAUS-20W-20u (рис. 1, a) вместе с генератором гармоник. Частота следования импульсов составляла 200 кГц, длина волны излучения основной гармоники (ОГ) — 1030 ± 5 нм. Длительность импульса равна  $224 \pm 15$  фс по уровню 0,5 от максимальной интенсивности. Излучение с фемтосекундной длительностью импульсов позволяло наиболее эффективно индуцировать процессы, приводящие к анизотропному изменению формы НЧ и к эффекту дихроизма. Это связано с высокой интенсивностью излучения, и малой тепловой диффузией в ходе воздействия [9]. С помощью асферической линзы с фокусным расстоянием f = 8 мм происходила фокусировка пучка на поверхность образца. Диаметр лазерного пучка по уровню 1/е в зоне воздействия определялся методом Лиу [11]. Перемещение образца вдоль оси oy (рис. 1, b) осуществлялось при помощи трехкоординатного стола со скоростью сканирования v = 1 мм/с. Плотность энергии лазерных импульсов F на поверхности образца, варьировалась в диапазоне  $(18-307) \pm 0.5$  мДж/см<sup>2</sup> при воздействии излучения ОГ и  $(31-131) \pm 0.5$  мДж/см<sup>2</sup> при воздействии излучения второй гармоники (ВГ). Для изучения влияния поляризации лазерного излучения, перед линзой устанавливалась фазовая полуволновая пластинка ( $\lambda/2$ ). Вращением  $\lambda/2$  пластинки линейная поляризация излучения ориентировалась вдоль направления сканирования, когда угол между вектором поляризации и направлением сканирования составлял  $0^{\circ}$  (s-поляризация на рис. 1, b), и поперек него —  $90^{\circ}$ (р-поляризация). В результате на пленках ZnO: Ад были записаны треки длиной 400 мкм с различной ориентацией линейной поляризации излучения относительно направления сканирования при разных значениях плотности энергии лазерных импульсов и длинах волн излучения.

Образцы представляли собой золь-гельные пленки ZnO:Ag, изготовленные таким же способом, как и в работе [10]. В ходе экспериментов использовались два одинаковых образца ZnO:Ag. На каждом из образцов были записаны по три серии треков. Первая серия была записана излучением ОГ при *s*-поляризации, а вторая и третья серии при помощи излучения ВГ для s- и p-поляризаций. В исходных образцах НЧ располагались тонким слоем в середине пленки, их средний диаметр равнялся  $40 \pm 5$  нм, а концентрация —  $(9 \pm 1) \cdot 10^9$  см<sup>-2</sup>. Среднее расстояние между центрами НЧ составляло  $100 \pm 30$  нм. Спектральное пропускание  $T(\lambda)$  и отражение  $R(\lambda)$  естественно-поляризованного света полученной пленки ZnO: Ад в диапазоне 350-1100 нм измерялось с помощью спектрофотометра СФ-56, после чего оценивалось поглощение пленки  $A(\lambda) = 1 - T(\lambda) - R(\lambda)$ (рис. 1, с). Также приведен спектр поглощения золь-гель пленки ZnO без HЧ. Длина волны плазмонного резонанса НЧ составляла  $\lambda_{pe3} = 540$  нм, ширина плазмонного пика на полувысоте — *FWHM* = 140 нм. Таким образом, длина волны ВГ находилась вблизи  $(\Delta \lambda = 25 \text{ нм})$ , а ОГ ( $\Delta \lambda = 490 \text{ нм}$ ) вдали от длины волны плазмонного резонанса.

Традиционно считается, что пик плазмонного резонанса серебряных НЧ находится вблизи 400 нм [12]. Его положение зависит как от параметров НЧ (размера, формы, материала), так и от показателя преломления окружающего материала. Увеличение показателя преломления обеспечивалось за счет термического отжига и рекристаллизации пленки. Кроме того, смещение плазмонного пика в область больших длин волн связывалось с коллективными эффектами между НЧ [13]. Толщина полученной пленки составляла  $h = 120 \pm 5$  нм.

Оптическая микроскопия пленок выполнена с помощью оптического микроскопа Zeiss Axio Imager в светлом поле проходящего света в режиме линейно-поляризованного света. Морфология поверхности пленок исследовалась с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Zeiss Merlin. Диаметр фотометрического участка при этом составлял 3 мм. Спектральное пропускание  $T(\lambda)$  треков на пленке в диапазоне длин волн 400–800 нм и с диаметром фотометрического участка 30 мкм при нормальном падении излучения спектрофотометра регистрировалось с помощью микроскопа-спектрофотометра МСФУ-К. Спектральные характеристики измерялись по три раза в различных участках треков. Сначала усреднялись значения для



*Рис. 1.* Экспериментальная установка (*a*); ориентация вектора поляризации фемтосекундного излучения относительно направления сканирования (красная стрелка) (*b*); спектральные характеристики ZnO:Ag (*c*).

Е — вектор напряженности излучения; ГГ — генератор гармоник; Т — пропускание; А — поглощение; v — скорость

*Fig. 1.* Experimental setup (*a*); orientation of the polarization vector of femtosecond radiation relative to the scanning direction. The red arrow indicates the scanning direction (*b*); spectral characteristics of ZnO:Ag (*c*)

каждого из треков, затем усреднялись значения, измеренные на каждом из образцов. При исследовании треков на оптическом микроскопе в режиме поляризованного проходящего света и при измерении спектров пропускания линейно-поляризованного света поляризатор ориентировался под углами  $\beta$ , относительно направления сканирования. При угле  $\beta = 0^\circ$ , ось поляризатора была параллельна направлению сканирования, при  $\beta = 90^\circ$  они были перпендикулярны.

#### Результаты и обсуждение

Оптическая микроскопия и спектроскопия модифицированных областей. Сформированные лазерным излучением треки на образце исследовались с помощью оптической микроскопии в линейно-поляризованном свете (рис. 2). В случае воздействия излучения ВГ (рис. 2, *a*, *b*) значения плотности энергии варьировались в диапазоне (30–131) ± 0,5 мДж/см<sup>2</sup>. При оптической микроскопии этих областей ось поляризатора, установленного перед образцом, располагалась перпендикулярно (рис. 2, *a*) и параллельно (рис. 2, b) трекам. В первом случае угол между осью поляризации и направлением сканирования составлял  $\beta = 90^\circ$ , во втором —  $\beta = 0^\circ$ . При помощи оптического микроскопа была измерена RGB цветность снимков треков в проходящем свете. У трека, записанного с *s*-поляризацией при  $F = 66 \pm 0.5$  мДж/см<sup>2</sup> (рис. 2, *a*) отношение интенсивности синей ( $I_{\rm B}$ ) компоненты к красной  $(I_R)$  в центральной части составляло  $I_B/I_R = 0,74$ . Интенсивность I<sub>R</sub> была выше, чем I<sub>B</sub>. У трека, записанного с р-поляризацией это отношение составило  $I_{\rm B}/I_{\rm R}$  = 1,38. При повороте треков на 90° отношение I<sub>B</sub>/I<sub>R</sub> для *p*-поляризации равнялось 1,32 и 0,62 для *s*-поляризации (рис. 2, *b*). Отношение  $I_{\rm B}/I_{\rm R}$  для исходной пленки не изменялось при повороте треков. Описанные изменения RGB цветности проходящего света при повороте образца указывало на эффект дихроизма,





*Fig. 2.* Optical microscopy of modified ZnO:Ag regions in transmitted linearly polarized light; radiation with wavelength SG (a, b) and radiation with wavelength FG (c, d). The angle  $\beta$  between the scanning direction and the polarization axis of the light from the microscope lamp (red arrow) corresponds to 90° (a, c) and 0° (b, d)

возникающий в модифицированных областях. При плотности энергии фемтосекундных импульсов выше  $74 \pm 0.5$  мДж/см<sup>2</sup> для центральной части модифицированных областей характерно исчезновение эффекта дихроизма. Это выражалось в отсутствии изменения I<sub>B</sub>/I<sub>R</sub> при повороте треков. В случае воздействия излучения ОГ (рис. 2, c, d) значения плотности энергии находились в диапазоне (18-307) ± 0,5 мДж/см<sup>2</sup>. При плотности энергии, меньше указанного диапазона, формирование треков не наблюдалось, превышение максимального значения в этом диапазоне приводило к абляции материала пленки. При исследовании записанных структур в поляризованном свете получено, что I<sub>B</sub>/I<sub>R</sub> при повороте образца изменялось незначительно. Например, для трека, записанного при  $F = 52 \pm 0.5$  мДж/см<sup>2</sup>,  $I_{\rm B}/I_{\rm R}$  менялось с 0,219 до 0,194, что указывало на значительно меньший эффект дихроизма при воздействии излучения ОГ.

Для анализа спектральных характеристик были измерены спектры пропускания  $T(\lambda)$  линейно-поляризованного света, проходящего через образец. На основании измеренных спектров были рассчитаны значения оптической плотности (Optical Density, OD)  $(OD(\lambda) = lg(1/T(\lambda))$ . На рис. 3 приведены спектры OD областей, записанных при помощи излучения с длиной волны  $515 \pm 5$  нм при значениях плотности энергии  $(31-131) \pm 0,5$  мДж/см<sup>2</sup>. Видно, что в результате лазерного воздействия происходило смещение пика плазмонного резонанса и изменение его интенсивности. Спектральное положение этих пиков зависело, в том числе от ориентации вектора поляризации проходящего света при измерении пропускания. Максимум OD у исходной пленки составил 0,35.

В случае, если направление поляризации лазерного излучения и излучения в спектрофотометре совпадали (рис. 3, *a*, *d*), то увеличение плотности энергии до  $49 \pm 0.5$  мДж/см<sup>2</sup> при *p*-поляризации и  $56 \pm 0.5$  мДж/см<sup>2</sup> при *s*-поляризации приводило к росту ОD до 0,5. Дальнейшее увеличение плотности энергии привело к уменьшению OD до 0,15–0,2 и постепенному исчезновению пика. Если направление поляризации было перпендикулярным (рис. 3, *c*, *d*), то интенсивность пика уменьшалась до 0,15–0,20. Также видно (рис. 3, *a*, *d*), что при одинаковых значениях плотности энергии, но различных поляризациях лазерного излучения отличалась интенсивность пиков плазмонного резонанса. Например, при *F* =  $56 \pm 0.5$  мДж/см<sup>2</sup> значения OD на рис. 3, *a*, *d*, составляли 0,45 и 0,53.

На основе измеренных спектров было проанализировано изменение длины волны плазмонного резонанса  $\lambda_{pe3}$  после воздействия излучения с различными плотностями энергии импульсов. В случае, когда направления поляризации лазерного излучения и света в спектрофотометре совпадали (красная кривая на рис. 3, *e*, и черная кривая на рис. 3, *f*), пик плазмонного резонанса перемещался в длинноволновую область спектра. Если в исходной пленке пик находился вблизи 600 нм, то после воздействия излучения ВГ с *F* = 66 ± 0,5 мДж/см<sup>2</sup> для *s*- и *p*-поляризацией пик смещался до 700 нм и 660 нм соответственно. Дальнейшее увеличение плотности энергии приводило к смещению пика обратно к 600 нм. Если вектор поляризации лазерного излучения и вектор поляризации света в спектрофотометре были перпендикулярны (черная кривая на рис. 3, e и черная кривая на рис. 3, f), то пик перемещался в коротковолновую область спектра (до 450 нм).

Таким образом видно, что интенсивность и положение пика плазмонного резонанса отличались при различных поляризациях излучения. Причина данного различия в том, что воздействие на пленки происходило в режиме сканирования. В таком случае при различных взаимных ориентациях направления сканирования и поляризации излучения в зоне воздействия устанавливались различные градиенты температур, что приводило к различному изменению спектральных характеристик [14].

На основании спектров ОD для каждой из поляризаций лазерного излучения были рассчитаны значения линейного дихроизма (Linear Dichroism, LD)  $LD = OD_{90^{\circ}} - OD_{0^{\circ}}$ , где  $OD_{90^{\circ}}$  — значения OD при угле  $\beta = 90^{\circ}$  и  $OD_{0^{\circ}}$ , значения OD при угле  $\beta = 0^{\circ}$ . Аналогично были измерены спектры OD треков после воздействия излучения OГ и рассчитан LD (рис. 4).

По полученным спектральным кривым были определены значения LD на длинах волн 500 нм ( $LD_{500}$ ) и 700 нм (LD<sub>700</sub>). В случае воздействия излучения ВГ (рис. 4, a, b) с  $F = 66 \pm 0.5$  мДж/см<sup>2</sup> значения LD были следующими: *LD*<sub>500</sub> = 0,12 и *LD*<sub>700</sub> = -0,25 при *s*-поляризации и LD<sub>500</sub> = -0,12 и LD<sub>700</sub> = 0,25 при *р*-поляризации. Дальнейший рост плотности энергии приводил к уменьшению LD, форма кривой  $LD(\lambda)$  приближалась к форме кривой для исходного образца, т. е. эффект дихроизма пропадал. В случае воздействия излучения с длиной волны 1030 ± 5 нм с *s*-поляризацией и плотностью энергии  $F = 69 \pm 0.5$  мДж/см<sup>2</sup> значения LD составляли *LD*<sub>500</sub> = 0,05 и *LD*<sub>700</sub> = 0,02 (рис. 4, *c*). Рост плотности энергии до  $F = 188 \pm 0.5$  мДж/см<sup>2</sup> приводил к росту LD до  $LD_{500} = 0,08$  и  $LD_{700} = 0,05$ . Таким образом видно, что величина LD в пленке ZnO:Ag при использовании излучения с длиной волны вдали от положения пика плазмонного резонанса НЧ была ниже, чем при использовании излучения с длиной волны вблизи его положения.

Электронная микроскопия. При помощи СЭМизображений (рис. 5, а) были исследованы параметры серебряных НЧ в пленке, такие как размеры большой и малой осей частиц  $d_a$  и  $d_b$ , их концентрация и угол ориентации α<sub>x</sub>, а также изменение морфологии матрицы ZnO. Угол а<sub>х</sub> соответствовал углу между большой осью и осью ох, направление которой совпадало с направлением р-поляризации на рис. 1, b. Исходная пленка имела поликристаллическую структуру, НЧ находились внутри нее (рис. 5, b). Размеры осей НЧ в исходной пленке составляли  $d_a = 41 \pm 5$  нм и  $d_b = 37 \pm 5$  нм (рис. 5, *i*, *j*). При этом в распределении присутствовало около 15 % НЧ с размером d<sub>a</sub> больше 60 нм (рис. 5, *i*). Такие НЧ имели ярко выраженную эллипсоидную форму. Повышение плотности энергии до  $74 \pm 0.5$  мДж/см<sup>2</sup> существенно не изменяло морфологию пленки (рис. 5, d). Начиная с плотности энергии выше  $74 \pm 0.5$  мДж/см<sup>2</sup> происходил выход НЧ на поверхность пленки (рис. 5, е). Аналогичный эффект наблюдался после отжига в печи при 650 °С и был



*Puc. 3.* Спектры оптической плотности областей пленки ZnO:Ag, модифицированных при помощи лазерного излучения с *p*-поляризацией (*a*, *b*) и *s*-поляризацией (*c*, *d*); углы между направлением трека и осью поляризатора составляли β = 90° (*a*, *c*) и β = 0° (*c*, *d*); зависимости длины волны плазмонного резонанса наночастиц от плотности энергии лазерных импульсов при *s*-поляризации (*e*) и *p*-поляризации (*f*) лазерного излучения

*Fig. 3.* Optical density spectra of ZnO:Ag film regions modified using laser radiation with *p*-polarization (*a*, *b*) and *s*-polarization (*c*, *d*); the angles between the track direction and the polarizer axis were  $\beta = 90^{\circ}$  (*a*, *c*) and  $\beta = 0^{\circ}$  (*b*, *d*); dependences of the plasmon resonance wavelength of nanoparticles on the energy density of laser pulses with *s*-polarization (*e*) and *p*-polarization (*f*) vs. laser radiation



*Puc. 4.* Спектры линейного дихроизма в случае воздействия излучения с длинами волн: 515 нм (*a*, *b*) и 1030 нм (*c*) *Fig. 4.* Linear dichroism spectra in the case of exposure to radiation with a wavelength of 515 nm (*a*, *b*) and radiation with a wavelength of 1030 nm (*c*)

связан с уплотнением матрицы ZnO вокруг НЧ [15]. С помощью метода EDX (Energy Dispersive X-ray) было показано, что лазерное воздействие слабо влияло на химический состав пленки (рис. 5, f). Кроме того, уменьшалась концентрация НЧ, и происходило их объединение в более крупные частицы. При плотности энергии выше  $74 \pm 0.5$  мДж/см<sup>2</sup> в пределах треков наблюдались нерегулярные трещины продолговатой формы, ориентированные перпендикулярно линиям поляризации излучения (рис. 5, g, h). Формирование таких трещин зависит от интерференционных эффектов, возникающих при взаимодействии падающей и поверхностной электромагнитных волн [16]. При этом для формирования таких структур материал должен был нагреваться как минимум до температуры плавления [17]. Дальнейшее повышение плотности энергии приводило к увеличению количества таких трещин. Процессы, наблюдаемые при F более 74 мДж/см<sup>2</sup>, приводили к тому, что эффект дихроизма в пленке начинал ослабевать, что наблюдалось по результатам оптической микроскопии и спектроскопии.

На основании данных об угле ориентации НЧ были построены гистограммы распределения количества НЧ

по углу ориентации (рис. 6, a, b, d, e). В распределениях не учитывались сферические НЧ, у которых аспектное соотношение  $AR = d_q/d_b$  составляло AR = 1. Далее были рассчитаны отношения  $N_{90^{\circ}}/N_{0^{\circ}}$ , где  $N_{90^{\circ}}$  и  $N_{0^{\circ}}$  — количество HЧ, ориентированных с углом  $\alpha_r = 90^\circ$  и  $\alpha_r = 0^\circ$ (рис. 6, c, f). В исходной пленке НЧ были ориентированы хаотично, и отношение  $N_{90^{\circ}}/N_{0^{\circ}}$  было близко к единице (рис. 6, а, красный столбец). В режиме р-поляризации начиная с  $F = 49 \pm 0.5$  мДж/см<sup>2</sup> росло число НЧ, ориентированных под углами близкими к 0° и 180° (рис. 6, а). Это свидетельствовало о том, что часть НЧ ориентировалась параллельно вектору поляризации лазерного излучения. При этих режимах воздействия также начинал проявляться эффект дихроизма (рис. 3). С увеличением плотности энергии до  $66 \pm 0.5$  мДж/см<sup>2</sup> росла доля НЧ, ориентированных параллельно вектору поляризации, и отношение  $N_{90^{\circ}}/N_{0^{\circ}}$  уменьшалось (рис. 6, с). При дальнейшем увеличении плотности энергии до 131 ± 0,5 мДж/см<sup>2</sup> происходило постепенное снижение концентрации НЧ, отношение  $N_{90^\circ}/N_{0^\circ}$ увеличивалось до 1, а ориентация вновь становилась хаотичной (рис. 6, *b*). Эффект дихроизма при данных режимах лазерного воздействия становился все менее



*Рис. 5.* СЭМ-снимки пленки ZnO:Ag до лазерного воздействия в режимах: обратно рассеянных электронов AsB (*a*); вторичных электронов InLens (*b*); исходная пленка с большим увеличением (*c*); после облучения при плотностях энергии 66 ± 0,5 мДж/см<sup>2</sup> (*d*) и 99 ± 0,5 мДж/см<sup>2</sup> (*e*). EDX измерения состава области пленки ZnO:Ag, облученной при плотностях энергии: 131 ± 0,5 мДж/см<sup>2</sup> (*f*) и 131 ± 0,5 мДж/см<sup>2</sup> (*e*). EDX измерения состава области пленки ZnO:Ag, облученной при плотностях энергии: 131 ± 0,5 мДж/см<sup>2</sup> (*f*) и 131 ± 0,5 мДж/см<sup>2</sup> в режиме *s*-поляризации (*g*); 131 ± 0,5 мДж/см<sup>2</sup> в режиме *p*-поляризации (*h*). Гистограммы с размерами большой *d<sub>a</sub>* (*i*) и малой *d<sub>b</sub>* (*j*) осей наночастиц в исходной пленке *Fig. 5.* SEM images of the ZnO:Ag film before laser irradiation in the mode of: backscattered electrons AsB (*a*); secondary electrons InLens (*b*); the original film with high magnification (*c*); after irradiation at an energy density of 66 ± 0.5 mJ/cm<sup>2</sup> (*d*); 99 ± 0.5 mJ/cm<sup>2</sup> (*f*); 131 ± 0.5 mJ/cm<sup>2</sup> in the *s*-polarization mode (*g*); 131 ± 0.5 mJ/cm<sup>2</sup> in the *p*-polarization mode (*h*). Histograms with the sizes of the large *d<sub>a</sub>* (*i*) and small *d<sub>b</sub>* (*j*) ахея of nanoparticles in the original film

выраженным. Вероятно, что при высокой плотности энергии на процесс изменения формы НЧ также начи-

нал оказывать влияние процесс модификации самой матрицы пленки. Нагретая под действием лазерного



Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2025, том 25, № 1 Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2025, vol. 25, no 1 излучения с высокой плотностью энергии импульсов пленка начинала передавать тепло НЧ [6]. Подобная переориентация НЧ наблюдалась и при s-поляризации лазерного излучения. Начиная с  $F = 43 \pm 0.5$  мДж/см<sup>2</sup> росла доля НЧ, ориентированных под углом 90°, что приводило к увеличению отношения до 4 (рис. 6, *f*). Этот процесс продолжался до  $F = 56 \pm 0.5$  мДж/см<sup>2</sup> (рис. 6, *d*), после чего отношение  $N_{90^\circ}/N_{0^\circ}$  также умень-

шалось до 1. Как в режиме *р*-поляризации, так и в режиме *s*-поляризации фемтосекундного излучения ориентация НЧ происходила вдоль вектора поляризации лазерного излучения.

На основании представленных данных можно заключить, что изменение спектральных характеристик на рис. 4 было связано с изменением доли НЧ, ориентированных параллельно вектору поляризации ла-



*Puc.* 7. СЭМ-изображения пленки ZnO:Ag модифицированной излучением с длиной волны 1030 нм с плотностями энергии: 18 ± 0,5 мДж/см<sup>2</sup> (*a*); 69 ± 0,5 мДж/см<sup>2</sup> (*b*); 137 ± 0,5 мДж/см<sup>2</sup> (*c*); 307 ± 0,5 мДж/см<sup>2</sup> (*d*). Измерение состава методом EDX (*e*) *Fig.* 7. SEM images of ZnO:Ag film modified with 1030 nm radiation: 18 ± 0.5 mJ/cm<sup>2</sup> (*a*), 69 ± 0.5 mJ/cm<sup>2</sup> (*b*), 137 ± 0.5 mJ/cm<sup>2</sup> (*c*), 307 ± 0.5 mJ/cm<sup>2</sup> (*d*). Composition measurement was done by EDX method (*e*)

зерного излучения. При этом больший вклад должны были вносить эллипсоидные НЧ, присутствующее в распределении изначально. В исходной пленке, а также при низкой плотности энергии (до 43–49 мДж/см<sup>2</sup>) эллипсоидные НЧ ориентированы хаотично. В этом случае отсутствовал LD, и пик плазмонного резонанса находился вблизи 600 нм. Увеличение плотности энергии лазерного излучения приводило к ориентации части эллипсоидных НЧ параллельно вектору поляризации лазерного излучения. За счет этого расстояние между НЧ уменьшалось в одном направлении и увеличивалось в другом. При измерении спектров пропускания линейно-поляризованного излучения, если вектор поляризации света в спектрофотометре, был ориентирован параллельно вектору поляризации лазерного излучения, то расстояние между НЧ в этом направлении было меньшим. Между НЧ с большей вероятностью могли возникать коллективные плазмонные эффекты [18]. За счет этого происходило смещение пика плазмонного резонанса в длинноволновую область спектра и увеличение значения OD (рис. 3). При значениях плотности энергии выше  $66 \pm 0.5$  мДж/см<sup>2</sup> ориентация НЧ нарушалась вследствие их частичного разрушения и агрегации в более крупные. Из-за этого пик плазмонного резонанса смещался в область меньших длин волн, а его интенсивность уменьшалась. СЭМ-изображения пленки, модифицированной излучением ОГ представлены на рис. 7. Выход НЧ на поверхность начинался уже при  $F = 18 \pm 0.5$  мДж/см<sup>2</sup>, при этом число НЧ на поверхности росло с увеличением плотности энергии. При плотности энергии выше  $69 \pm 0.5$  мДж/см<sup>2</sup> (рис. 7, b) происходило формирование протяженных структур, перпендикулярных направлению поляризации. Их длина росла с увеличением плотности энергии. После значения  $F = 137 \pm 0.5$  мДж/см<sup>2</sup> (рис. 7, *c*) в центре трека начиналась абляция пленки, ширина аблированного участка росла вплоть до  $F = 307 \pm 0.5 \text{ мДж/см}^2$ . EDX измерения области, модифицированной с максимальной плотностью энергии, показали значительное уменьшение концентрации Zn в пределах трека (рис. 7, d). Анализ угла ориентации НЧ показал, что в отличие от случая воздействия излучения ВГ, НЧ продолжали сохранять хаотическую ориентацию и после лазерного воздействия (рис. 7, е). Предположительно, это связано с различием в механизмах поглощения лазерного излучения.

В случае воздействия излучения ВГ поглощательная способность пленки ZnO:Ag составляла  $A_{515}(\text{ZnO:Ag}) = 0,54$ , а пленки ZnO без HЧ на длине волны ВГ—  $A_{515}(\text{ZnO}) = 0,07$ . Из этого можно сделать вывод, что лазерное излучение поглощалось преимущественно НЧ серебра. Под действием фемтосекудных лазерных импульсов с плотностью энергии выше  $43 \pm 0,5$  мДж/см<sup>2</sup> происходила эмиссия электронов из НЧ [19]. Предположительно, эти электроны рекомбинировали с ионами серебра в окружении НЧ. Если расстояние от НЧ до области рекомбинации было не велико, то новые атомы серебра диффундировали обратно к НЧ. Поскольку эти процессы индуцировались под действием линейно-поляризованного лазерного излучения, то наиболее активно они происходили в направлении, параллельном вектору поляризации. За счет этого осуществлялась переориентация НЧ, и наблюдался эффект дихроизма. Можно утверждать, что при плотности энергии выше  $66 \pm 0,5$  мДж/см<sup>2</sup> электроны из НЧ удалялись на более значительное расстояние чем при значениях плотности энергии в диапазоне 43–66 мДж/см<sup>2</sup>. Атомы серебра уже были не способны диффундировать к исходной НЧ. Однако, при наличии в окружении достаточно крупных частиц, компоненты разрушенной НЧ могли участвовать в процессе объединения, что и наблюдалось при плотности энергии выше  $66 \pm 0,5$  мДж/см<sup>2</sup> (рис. 5, *e*).

В случае лазерного воздействия излучением ОГ поглощательная способность пленки ZnO:Ag составляла  $A_{1030}$ (ZnO:Ag) = 0,14, что было незначительно выше для пленки ZnO без HЧ:  $A_{1030}(ZnO) = 0.06$ . Отметим, что в таком случае доля лазерного излучения, поглощенная на НЧ и доля лазерного излучения, поглощенная на матрице ZnO, были соизмеримы. НЧ поглощала излучение, и в ней начинали происходить процессы, описанные для случая воздействия излучения ВГ. За счет низкого поглощения интенсивность этих процессов была не велика. В то же время под действием излучения нагревалась матрица ZnO, и часть тепла за счет теплопроводности передавалась из матрицы к НЧ. При этом тепло передавалось к НЧ со всех сторон, т. е. этот процесс не имел выраженного направления. Эти тепловые процессы в матрице препятствовали переориентации НЧ и появлению эффекта дихроизма.

#### Заключение

В ходе проведенного исследования установлено, что фемтосекундное лазерное воздействие на пленки ZnO с наночастицами серебра может вызывать значительные изменения их структуры и оптических свойств, приводящие к возникновению эффекта дихроизма. Воздействие на длине волны вблизи плазмонного резонанса наночастиц ( $\lambda = 515 \pm 5$  нм) оказалось наиболее эффективным для создания эффекта дихроизма. При воздействии излучения с плотностью энергии  $66 \pm 0,5$  мДж/см<sup>2</sup> величина линейного дихроизма на длине волны 700 нм составляла -0,25 и 0,25 при s- и p-поляризациях лазерного излучения соответственно. Появление эффекта дихроизма связывалось с переориентацией наночастиц в поле лазерного излучения. В исходной пленке наночастицы были ориентированы хаотично, но с увеличением плотности энергии до 66 мДж/см<sup>2</sup> росла доля частиц, ориентированных параллельно поляризации лазерного излучения. Воздействие с длиной волны вдали от длины волны плазмонного резонанса наночастиц ( $\lambda = 1030 \pm 5$  нм) оказало значительно меньшее влияние на анизотропию формы наночастиц и изменение оптических характеристик пленок ZnO:Ag, даже при более широком диапазоне плотностей энергии  $(18-307) \pm 0.5$  мДж/см<sup>2</sup>. Максимум в спектрах линейного дихроизма при таком воздействии находился вблизи 500 нм, величина линейного дихроизма составляла 0,05 при  $69 \pm 0,5$  мДж/см<sup>2</sup>. Наночастицы при этом все так же имели хаотическую ориентацию. Лазерное воздействие с режимами, которые были определены в данной работе, позволяет управлять положением пика плазмонного резонанса наночастиц в фотопоглощающем слое фотодетектора,

#### Литература

- Klochko N.P., Klepikova K.S., Khrypunova I.V., Kopach V.R., Tyukhov I.I., Petrushenko, S.I., Dukarov S.V., Sukhov V.M., Kirichenko M.V., Khrypunova A.L. Solution-processed flexible broadband ZnO photodetector modified by Ag nanoparticles // Solar Energy. 2022. V. 232. P. 1–11. https://doi.org/10.1016/j. solener.2021.12.051
- Tang H., Chen C.J., Huang Z., Bright J., Meng G., Liu R.S., Wu N. Plasmonic hot electrons for sensing, photodetection, and solar energy applications: A perspective // The Journal of Chemical Physics. 2020. V. 152. N 22. https://doi.org/10.1063/5.0005334
- Alharbi A.M., Ahmed N.M., Rahman A.A., Azman N.Z.N., Algburi S., Wadi I.A., Binzowaimil A.M., Aldaghri O., Ibnaouf K.H. Development of ZnO and Si semiconductor-based ultraviolet photodetectors enhanced by laser-ablated silver nanoparticles // Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications. 2024. V. 58. P. 101228. https://doi.org/10.1016/j.photonics.2024.101228
- Koleva M.E., Nedyalkov N.N., Nikov Ru., Nikov Ro., Atanasova G., Karashanova D., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Rogov A.M., Stepanov A.L. Fabrication of Ag/ZnO nanostructures for SERS applications // Applied Surface Science. 2020. V. 508. P. 145227. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.145227
- Jain S., Medlin W., Uprety S., Isaacs-Smith T., Olsson T., Davis J., Burrows S., Chumley S., Park M., Laurent G.M. Nanosecond-laser annealing of zinc oxide thin-films: The effect of the laser wavelength and fluence // Thin Solid Films. 2024. V. 791. P. 140236. https://doi. org/10.1016/j.tsf.2024.140236
- Varlamov P.V., Sergeev M.M., Zakoldaev R.A., Grigoryev E.A. Femtosecond wavelength influence on TiO<sub>2</sub>: Ag film spectral changes: Comparative study // Materials Letters. 2022. V. 323. P. 132605. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132605
- Andreeva Y., Sharma N., Rudenko A., Mikhailova J., Sergeev M., Veiko V.P., Vocanson F., Lefkir Y., Destouches N., Itina T.E. Insights into ultrashort laser-driven Au: TiO<sub>2</sub> nanocomposite formation // The Journal of Physical Chemistry C. 2020. V. 124. N 18. P. 10209–10219. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c01092
- Miranda M.H.G., Falcão-Filho E.L., Rodrigues Jr. J.J., de Araújo C.B., Acioli L.H. Ultrafast light-induced dichroism in silver nanoparticles // Physical Review B. 2004. V. 70. N 16. P. 161401. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.70.161401
- Stalmashonak A., Seifert G., Graener H. Spectral range extension of laser-induced dichroism in composite glass with silver nanoparticles // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. 2009. V. 11. N 6. P. 065001. https://doi.org/10.1088/1464-4258/11/6/065001
- Гресько В.Р., Сергеев М.М., Смирнова В.В., Долгополов А.Д., Сокура Л.А., Костюк Г.К., Григорьев Е.А. Фемтосекундная лазерная модификация золь-гель пленок ZnO:Ag с проявлением дихроизма // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24. № 3. С. 384–398. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2024-24-3-384-398
- Liu J.M. Simple technique for measurements of pulsed Gaussianbeam spot sizes // Optics letters. 1982. V. 7. N 5. P. 196–198. https:// doi.org/10.1364/OL.7.000196
- Yeshchenko O.A., Dmitruk I.M., Alexeenko A.A., Kotko A.V., Verdal J., Pinchuk A.O. Size and temperature effects on the surface plasmon resonance in silver nanoparticles // Plasmonics. 2012. V. 7. P. 685–694. https://doi.org/10.1007/s11468-012-9359-z
- Shirshneva-Vaschenko E.V., Sokura L.A., Baidakova M.V., Yagovkina M.A., Snezhnaia Z.G., Shirshnev P.S., Romanov A.E. Study of the influence of the ZnO: Al polycrystalline film morphology on the silver nanoparticles formation // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1400. N 5. P. 055026. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1400/5/055026
- Kuptsova A.O., Kuptsov G.V., Petrov V.A., Atuchin V.V., Petrov V.V. Laser scanning method for time-resolved measurements of wavefront distortion introduced by active elements in high-power laser

а также создавать на этом слое области с эффектом дихроизма. За счет этого расширяются возможности по модификации диапазона спектральной чувствительности устройства.

#### References

- Klochko N.P., Klepikova K.S., Khrypunova I.V., Kopach V.R., Tyukhov I.I., Petrushenko, S.I., Dukarov S.V., Sukhov V.M., Kirichenko M.V., Khrypunova A.L. Solution-processed flexible broadband ZnO photodetector modified by Ag nanoparticles. *Solar Energy*, 2022, vol. 232, pp. 1–11. https://doi.org/10.1016/j. solener.2021.12.051
- Tang H., Chen C.J., Huang Z., Bright J., Meng G., Liu R.S., Wu N. Plasmonic hot electrons for sensing, photodetection, and solar energy applications: A perspective. *The Journal of Chemical Physics*, 2020, vol. 152, no. 22. https://doi.org/10.1063/5.0005334
- Alharbi A.M., Ahmed N.M., Rahman A.A., Azman N.Z.N., Algburi S., Wadi I.A., Binzowaimil A.M., Aldaghri O., Ibnaouf K.H. Development of ZnO and Si semiconductor-based ultraviolet photodetectors enhanced by laser-ablated silver nanoparticles. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 2024, vol. 58, pp. 101228. https://doi.org/10.1016/j.photonics.2024.101228
- Koleva M.E., Nedyalkov N.N., Nikov Ru, Nikov Ro., Atanasova G., Karashanova D., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Rogov A.M., Stepanov A.L. Fabrication of Ag/ZnO nanostructures for SERS applications. *Applied Surface Science*, 2020, vol. 508, pp. 145227. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.145227
- Jain S., Medlin W., Uprety S., Isaacs-Smith T., Olsson T., Davis J., Burrows S., Chumley S., Park M., Laurent G.M. Nanosecond-laser annealing of zinc oxide thin-films: The effect of the laser wavelength and fluence. *Thin Solid Films*, 2024, vol. 791, pp. 140236. https://doi. org/10.1016/j.tsf.2024.140236
- Varlamov P.V., Sergeev M.M., Zakoldaev R.A., Grigoryev E.A. Femtosecond wavelength influence on TiO<sub>2</sub>: Ag film spectral changes: Comparative study. *Materials Letters*, 2022, vol. 323, pp. 132605. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132605
- Andreeva Y., Sharma N., Rudenko A., Mikhailova J., Sergeev M., Veiko V.P., Vocanson F., Lefkir Y., Destouches N., Itina T.E. Insights into ultrashort laser-driven Au: TiO<sub>2</sub> nanocomposite formation. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2020, vol. 124, no. 18, pp. 10209– 10219. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c01092
- Miranda M.H.G., Falcão-Filho E.L., Rodrigues Jr. J.J., de Araújo C.B., Acioli L.H. Ultrafast light-induced dichroism in silver nanoparticles. *Physical Review B*, 2004, vol. 70, no. 16, pp. 161401. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.70.161401
- Stalmashonak A., Seifert G., Graener H. Spectral range extension of laser-induced dichroism in composite glass with silver nanoparticles. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2009, vol. 11, no. 6, pp. 065001. https://doi.org/10.1088/1464-4258/11/6/065001
- Gresko V.R., Šergeev M.M., Smirnova V.V., Dolgopolov A.D., Sokura L.A., Kostyuk G.K., Grigoryev E.A. Femtosecond laser modification of the ZnO:Ag sol-gel films within dichroism emergence. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 3, pp. 384– 398. (in Russian). https://doi.org/10.17586/2226-1494-2024-24-3-384-398
- Liu J.M. Simple technique for measurements of pulsed Gaussianbeam spot sizes. *Optics letters*, 1982, vol. 7, no. 5, pp. 196–198. https://doi.org/10.1364/OL.7.000196
- Yeshchenko O.A., Dmitruk I.M., Alexeenko A.A., Kotko A.V., Verdal J., Pinchuk A.O. Size and temperature effects on the surface plasmon resonance in silver nanoparticles. *Plasmonics*, 2012, vol. 7, pp. 685–694. https://doi.org/10.1007/s11468-012-9359-z
- Shirshneva-Vaschenko E.V., Sokura L.A., Baidakova M.V., Yagovkina M.A., Snezhnaia Z.G., Shirshnev P.S., Romanov A.E. Study of the influence of the ZnO: Al polycrystalline film morphology on the silver nanoparticles formation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1400, no. 5, pp. 055026. https://doi. org/10.1088/1742-6596/1400/5/055026
- Kuptsova A.O., Kuptsov G.V., Petrov V.A., Atuchin V.V., Petrov V.V. Laser scanning method for time-resolved measurements of wavefront distortion introduced by active elements in high-power laser

amplifiers // Photonics. 2024. V. 11. N 8. P. 748. https://doi.org/10.3390/photonics11080748

- Shirshneva-Vaschenko E.V., Sokura L.A., Shirshnev P.S., Kirilenko D.A., Snezhnaia Z.G., Bauman D.A., Bougrov V.E., Romanov A.E. Preparation of transparent N-Zno: Al/P-Cualcro2 Heterojunction Diode by Sol-Gel technology // Reviews on Advanced Materials Science. 2018. V. 57. N 2. P. 167–174. https://doi. org/10.1515/rams-2018-0061
- Buividas R., Mikutis M., Juodkazis S. Surface and bulk structuring of materials by ripples with long and short laser pulses: Recent advances // Progress in Quantum Electronics. 2014. V. 38. N 3. P. 119–156. https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2014.03.002
- Zamfirescu M., Dinescu A., Danila M., Socol G., Radu C. The role of the substrate material type in formation of laser induced periodical surface structures on ZnO thin films // Applied surface science. 2012.
   V. 258. N 23. P. 9385–9388. https://doi.org/10.1016/j. apsusc.2012.01.089
- Sokura L.A., Snezhnaia Zh.G., Nevedomskiy V.N., Shirshneva-Vaschenko E.V., Romanov A.E. Ordering mechanism of silver nanoparticles synthesized in a ZnO: Al polycrystalline film by sol gel method // Journal of Physics: Conference Series. 2020. V. 1695. P. 012034. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1695/1/012034
- Kaempfe M., Seifert G., Berg K.-J., Hofmeister H., Graener H. Polarization dependence of the permanent deformation of silver nanoparticles in glass by ultrashort laser pulses // The European Physical Journal D-Atomic, Molecular, Optical and Plasma Physics. 2001. V. 16. P. 237–240. https://doi.org/10.1007/s100530170100

#### Авторы

**Гресько Владислав Романович** — младший научный сотрудник, ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, **вс** 57211848411, https://orcid.org/0000-0003-3308-6034, gresko.97@mail.ru

Сергеев Максим Михайлович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, so 55624732300, https:// orcid.org/0000-0003-2854-9954, maxim.m.sergeev@gmail.com

Долгополов Артур Джуракулович — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, https:// orcid.org/0000-0002-9548-791X, addolgopolov@itmo.ru

Сокура Лилия Александровна — научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, sc 56662497100, https:// orcid.org/0000-0001-9725-5912, sokuraliliy@mail.ru

Григорьев Евгений Анатольевич — специалист по сканирующей электронной микроскопии, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация, то 6603077950, https://orcid.org/0000-0003-0614-6695, grigoryev\_egeniy@mail.ru

Статья поступила в редакцию 26.11.2024 Одобрена после рецензирования 25.12.2024 Принята к печати 25.01.2025

> CC O S BY NC

Работа доступна по лицензии Creative Commons «Attribution-NonCommercial»

Approved after reviewing 25.12.2024

Received 26.11.2024

Accepted 25.01.2025

amplifiers. *Photonics*, 2024, vol. 11, no. 8, pp. 748. https://doi. org/10.3390/photonics11080748

- Shirshneva-Vaschenko E.V., Sokura L.A., Shirshnev P.S., Kirilenko D.A., Snezhnaia Z.G., Bauman D.A., Bougrov V.E., Romanov A.E. Preparation of transparent N-Zno: Al/P-Cualcro2 Heterojunction Diode by Sol-Gel technology. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2018, vol. 57, no. 2, pp. 167–174. https://doi. org/10.1515/rams-2018-0061
- Buividas R., Mikutis M., Juodkazis S. Surface and bulk structuring of materials by ripples with long and short laser pulses: Recent advances. *Progress in Quantum Electronics*, 2014, vol. 38, no. 3, pp. 119–156. https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2014.03.002
- Zamfirescu M., Dinescu A., Danila M., Socol G., Radu C. The role of the substrate material type in formation of laser induced periodical surface structures on ZnO thin films. *Applied surface science*, 2012, vol. 258, no. 23, pp. 9385–9388. https://doi.org/10.1016/j. apsusc.2012.01.089
- Sokura L.A., Snezhnaia Zh.G., Nevedomskiy V.N., Shirshneva-Vaschenko E.V., Romanov A.E. Ordering mechanism of silver nanoparticles synthesized in a ZnO: Al polycrystalline film by sol gel method. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1695, pp. 012034. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1695/1/012034
- Kaempfe M., Seifert G., Berg K.-J., Hofmeister H., Graener H. Polarization dependence of the permanent deformation of silver nanoparticles in glass by ultrashort laser pulses. *The European Physical Journal D-Atomic, Molecular, Optical and Plasma Physics*, 2001, vol. 16, pp. 237–240. https://doi.org/10.1007/s100530170100

#### Authors

Vladislav R. Gresko — Junior Researcher, Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, sc 57211848411, https://orcid.org/0000-0003-3308-6034, gresko.97@mail.ru

Maksim M. Sergeev — PhD, Senior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 55624732300, https://orcid. org/0000-0003-2854-9954, maxim.m.sergeev@gmail.com

Arthur D. Dolgopolov — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0002-9548-791X, addolgopolov@itmo.ru

Liliia A. Sokura — Scientific Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Scientific Researcher, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, Sci 56662497100, https://orcid.org/0000-0001-9725-5912, sokuraliliy@mail.ru

**Evgeniy A. Grigoryev** — Scanning Electron Microscopy Specialist, St. Petersburg State University (SPbSU), Saint Petersburg, 199034, Russian Federation, sc 6603077950, https://orcid.org/0000-0003-0614-6695, grigoryev\_egeniy@mail.ru

**I/İTMO** 

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ январь-февраль 2025 Том 25 № 1 http://ntv.ifmo.ru/ SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS January-February 2025 Vol. 25 No 1 http://ntv.ifmo.ru/en/ ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКІ

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-23-32 УДК 535.211, 535.217, 544.032.65

# Прямая лазерная термохимическая запись на пленках титана для создания растрированных изображений

#### Артем Дмитриевич Пивоваров<sup>1</sup>, Екатерина Викторовна Усынина<sup>2</sup>, Дмитрий Андреевич Синев<sup>3</sup>⊠

1,2,3 Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

<sup>1</sup> vvwvwv@bk.ru, https://orcid.org/0009-0006-7911-7085

<sup>2</sup> kattyuus@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-3642-2913

<sup>3</sup> sinev@itmo.ru<sup>\top</sup>, https://orcid.org/0000-0002-6274-1491

#### Аннотация

Введение. Формирование полутоновых фотошаблонов является сложной технической задачей, которая в ряде случаев может быть решена за счет растрирования. Существующие работы в области прямой лазерной термохимической записи показывают возможности формирования локальных областей прозрачности в результате окисления тонких пленок металлов, но итоговый контраст коэффициента пропускания получаемой структуры оказывается сложно прогнозируемым в связи с комплексностью влияющих факторов. В настоящей работе предлагается экспериментальный подход к объединению методов полутоновой термохимической записи и фоторастрирования для создания структур с управляемой прозрачностью на пленках титана, которые могут составить основу для записи топологий растрированных фотошаблонов. Метод. В качестве образцов использованы тонкие (20-40 нм) пленки титана, воздействие на которые осуществлялось с помощью технологического комплекса «МиниМаркер-2» на базе волоконного иттербиевого лазера. Прямая запись сканирующим сфокусированным пучком выполнена с использованием встроенной системы гальванометрических сканаторов. Анализ оптических и геометрических характеристик записанных структур проведен с применением оптического микроскопа. Экспериментально определенные режимы записи подтверждены проведенным численно-аналитическим моделированием температурных режимов. Основные результаты. Показано, что формирование контрастных структур происходит в диапазонах плотностей мощности 15-140 МВт/м<sup>2</sup> при сканировании со скоростями от 0,1 до 1 мм/с, а изменение контрастности структур достигается при плотностях мощности 50-90 МВт/м<sup>2</sup>. Контраст коэффициента пропускания записанных структур относительно исходного значения прозрачности пленки управляемо варьируется от 1 до 40 %. В ряде режимов выявлено формирование периодических структур с периодом порядка 0,71 мкм, приводящих к дифракционным эффектам, наблюдаемым в отраженном свете. Обсуждение. Получены теоретически смоделированные и экспериментально подтвержденные режимы записи структур при воздействии излучения наносекундной длительности. Показано, что варьирование параметров воздействия позволяет локализовать области окисления, что приводит к изменению контраста интенсивности проходящего света и позволяет создавать полутоновые растрированные изображения с заданными значениями градации серого в проходящем свете. Практическая значимость полученных результатов показана на примере записи оптического элемента типа полутонового растрированного фотошаблона с заданной геометрией и значениями контраста.

#### Ключевые слова

растрированные фотошаблоны, тонкие пленки титана, лазерная термохимическая запись, дифракционная оптика, лазерная литография, лазерно-индуцированное окисление, лазерно-индуцированные поверхностные периодические структуры

#### Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-10230, https://rscf.ru/project/24-79-10230/.

Авторы благодарят аспиранта Института лазерных технологий Университета ИТМО Ибрахима Косая за помощь в проведении экспериментов.

Ссылка для цитирования: Пивоваров А.Д., Усынина Е.В., Синев Д.А. Прямая лазерная термохимическая запись на пленках титана для создания растрированных изображений // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 1. С. 23–32. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-23-32

© Пивоваров А.Д., Усынина Е.В., Синев Д.А., 2025

# Direct laser thermochemical writing on titanium films for rasterized images creation

#### Artem D. Pivovarov<sup>1</sup>, Ekaterina V. Usynina<sup>2</sup>, Dmitry A. Sinev<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

<sup>1</sup> vvwvwv@bk.ru, https://orcid.org/0009-0006-7911-7085

<sup>2</sup> kattyuus@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-3642-2913

<sup>3</sup> sinev@itmo.ru<sup>\Box</sup>, https://orcid.org/0000-0002-6274-1491

#### Abstract

Creating greyscale photomasks is an uncommon technical problem which in some cases can be solved by rasterization. At the same time, existing works on the direct laser thermochemical recording show the possibility of forming local areas of transparency as a result of oxidation of thin metal films, but the final contrast of the transmittance coefficient of the resulting structure turns out to be difficult to predict due to the complexity of the web of influencing factors. In the present work, we propose an experimental approach to combining the methods of greyscale thermochemical recording and rasterizing by creating structures with controlled transparency on titanium films which can form the basis for recording topologies of rasterized photomasks. The samples used in this study were thin (20-40 nm) titanium films which were treated using the Minimarker-2 technological complex based on a fiber ytterbium laser. Direct recording with a scanning focused beam was performed using a built-in system of galvanometric scanners. The optical and geometric characteristics of the recorded structures were analyzed using an optical microscope. The experimentally determined recording modes were confirmed by semi-analytical temperature modeling. It is shown that the formation of contrast structures occurs in the ranges of power densities about 15-140 MW/m<sup>2</sup> when scanning at speeds from 0.1 to 1 mm/s, and the change in the contrast of the structures is achieved at power densities of about 50-90 MW/m<sup>2</sup>. The contrast of the transmission coefficient of the recorded structures relative to the initial value of the film transparency is controlled to vary from 1 to 40 %. In a number of regimes, the formation of periodic structures with a period of about 0.71 µm was revealed, leading to diffraction effects observed in reflected light. The paper presents theoretically modeled and experimentally confirmed modes of recording structures under the influence of nanosecond radiation. It is shown that varying the parameters of the effect allows localizing oxidation regions, which leads to a change in the contrast of the transmitted light and allows creating halftone rasterized images with specified values of grayscale in the transmitted light. The practical significance of the obtained results is demonstrated by the example of recording an optical element such as a halftone rasterized photomask with a specified geometry and contrast values.

#### Keywords

rasterized photomasks, thin titanium films, laser thermochemical recording, diffractive optics, laser lithography, laserinduced oxidation, laser-induced periodic surface structures

#### Acknowledgements

Research was financially supported by the Russian Science Foundation, project No. 24-79-10230, https://rscf.ru/en/project/24-79-10230/.

Authors thank ILT PhD student Ibrahim Qosai for helping with experiments.

For citation: Pivovarov A.D., Usynina E.V., Sinev D.A. Direct laser thermochemical writing on titanium films for rasterized images creation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 1, pp. 23–32 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-23-32

#### Введение

Современные исследования в области создания тонких рельефно-фазовых структур представляют особый интерес для записи фотошаблонов и элементов дифракционной (компьютерной) оптики. Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) широко используются в системах фотоники, сенсорики и оптоэлектроники, в качестве корректоров и преобразователей волновых фронтов, аналогов рефракционных элементов и т. д. [1-3]. Кроме того, фотошаблоны применяют по прямому назначению в проекционных и теневых литографических схемах формирования ДОЭ [4, 5]. Задачи формирования фазово-амплитудных ДОЭ с заданным профилем зачастую решают с применением полутоновых фотошаблонов с заданной пространственной функцией пропускания [5]. В настоящее время предъявляются высокие требования к технологическим комплексам (устройствам и технологиям) для решения задач дифракционной оптики. Необходимо обеспечивать произвольную и асимметричную конфигурации топологии, минимальные размеры элементов порядка 100 нм, поле обработки 200–300 мм и более, точность до 1/20 от размера наименьшей дифракционной зоны [6]. Данные требования требуют разработки новых технологий высокоточного и производительного синтеза фотошаблонов и ДОЭ [6].

Известные методы изготовления подобных планарных элементов включают фотолитографию [7, 8], цифровую голографию [9], алмазное точение [10, 11], а также сравнительно новые методы типа наноразмерной 3D-печати [12] и термокапиллярного формования (thermocapillary shaping) [13]. В связи с комплексностью каждого из перечисленных методов сохраняется интерес к простым подходам, позволяющим формировать требуемую топологию прямым сканирующим воздействием сфокусированных пучков излучения. Существенные результаты в области изготовления полутоновых элементов прямой лазерной записью были достигнуты с применением прямой записи на тонкослойных халькогенидных материалах [14–17], а также на тонких пленках кремния Si [3, 18, 19], фоточувствительных стеклах [6, 20–23], и других акцепторных материалах [9, 24, 25], которые требуют специальных подходов к осуществлению записи.

Интерес вызывают работы по лазерному термохимическому воздействию на тонкие пленки металлов, окисляющихся на воздухе с образованием оксидов, прозрачных и оптически нейтральных во всем видимом спектральном диапазоне. Использование в качестве таких исходных материалов металлических пленок, достаточно тонких для лазерно-индуцированного окисления с формированием сквозного контрастного изображения, позволяет сократить количество этапов изготовления фотошаблонов до необходимого минимума (напыление пленки и прямая запись) и смягчить требования к температурным режимам записи. Нелинейные физико-химические обратные связи, проявляющиеся при просветлении пленки в процессе воздействия, усложняют моделирование динамики и предсказание режимов [26-28], но открывают возможность к их использованию для локализации записи. В качестве основных приоритетных материалов для исследований в этой области можно отметить пленки титана [17, 26, 29–37], хрома [38], циркония [39], олова [40-43], индия [16, 44], а также — в отдельных исследованиях — ванадия, цинка, гафния, тантала и др. [45-47]. Заметим, что формирование полутонового фотошаблона с непрерывной функцией пропускания является неординарной технической задачей [18], которая может быть решена за счет его растрирования (преобразования пространственного полутонового распределения интенсивности в двухуровневое, бинарное изображение) и использования проекционной оптической системы, осуществляющей некогерентную пространственную фильтрацию растрированного изображения. Этот метод, получивший название фоторастрового, позволяет изготавливать высокоэффективные ДОЭ с непрерывным фазовым профилем [5, 45]. Простота фоторастрового метода снижает технические требования, предъявляемые к технологии изготовления фотошаблонов, и дает возможность получить высокое качество изготавливаемых элементов, что делает его из наиболее удачных методов изготовления ДОЭ [5]. При этом существующие работы в области прямой лазерной термохимической записи показывают возможности формирования локальных областей прозрачности в результате окисления тонких пленок металлов [28, 29], которые могли бы быть использованы для фоторастрирования. Однако итоговый контраст коэффициента пропускания получаемой структуры оказывается сложно прогнозируемым в связи с комплексностью влияющих факторов (оптических, химических, теплофизических параметров пленки, динамически изменяющихся непосредственно в процессе записи).

В настоящей работе предлагается экспериментальный подход к объединению методов полутоновой термохимической записи и фоторастрирования за счет создания структур с управляемой прозрачностью на пленках титана, которые могут составить основу для записи топологий растрированных фотошаблонов.

#### Материалы и методы

Для исследования прямой лазерной термохимической записи структур был использован технологический комплекс «МиниМаркер-2» на базе волоконного иттербиевого лазера с максимальной средней мощностью 20 Вт. Выбор лазерного источника связан с высоким поглощением излучения образцами (пленками титана) на длине волны λ = 1,07 мкм, удобной системой управления и развертки пучка (сканирование осуществлялось постоянно в процессе воздействия с заданной скоростью И с помощью встроенной системы гальванометрических сканаторов) и необходимым диапазоном мощностей. В настоящей работе диапазон мощностей Р выбран от 60 до 700 мВт при длительности импульса  $\tau = 4$  нс, частоте следования импульсов f = 40 кГц и диаметрах сфокусированного пучка  $d_1 = 50 \pm 1$  мкм и  $d_2 = 70 \pm 1$  мкм по уровню  $e^{-1}$  [48] в зависимости от положения образца относительно плоскости острой фокусировки. Контроль среднего значения мощности лазерного пучка производился с применением измерителя мощности Gentec-EO SOLO2.

В качестве образцов были использованы пленки титана с толщинами h = 20, 30 и 40 нм, нанесенные на кварцевое стекло марки КУ-1 (ООО «Алкор Текнолоджиз», Санкт-Петербург, Россия) методом термического распыления в вакууме. Анализ оптических и геометрических характеристик структур был проведен с применением оптического микроскопа Carl Zeiss Axio Imager A1m.

Обработка данных, полученных при помощи оптического микроскопа, проводилась методом 2D быстрого преобразования Фурье (2D-БПФ) в свободно распространяемом программном обеспечении Gwyddion. На основании 2D-БПФ анализа микрофотографий были получены значения периода  $\Lambda$  и упорядоченности  $\Delta\Lambda$  периодических структур, зарегистрированных в ряде режимов. Численно-аналитическое моделирование температурных режимов лазерной записи на тонких пленках титана было проведено в системе компьютерной алгебры Mathcad 15.

#### Результаты

Фотографии массивов рабочих режимов и микрофотографии структур, записанных на пленках титана на кварцевых подложках, приведены на рис. 1. Запись была осуществлена с варьированием значения средней мощности P = 63-532 мВт (средней плотности мощности q = 16-139 МВт/м<sup>2</sup> при диаметре пучка  $d_2 \approx 70$  мкм) и скоростях сканирования V от 0,1 до 1 мм/с.

На основании анализа структур методом оптической микроскопии удалось визуально выявить основные рабочие режимы (рис. 1):

режим I — структуры характеризуются отсутствием видимого термохимического воздействия излучения на материал без заметного (сквозного) окисления;

режим II — структуры характеризуются частичным окислением пленки с образованием локальных «окон» прозрачности, видимых в проходящем свете;



Рис. 1. Карта рабочих режимов термохимической записи для пленки титана толщинами 20 нм (a, b), 30 нм (c, d) и 40 нм (e, f) в режимах проходящего (a, c, e) и отраженного (b, d, f) света. На вставках показаны оптические микрофотографии с увеличением 100<sup>×</sup> для характерных структур, записанных при V = 0,1 мм/с и q = 50, 89 и 139 МВт/м<sup>2</sup>. Пунктирами отмечены режимы I (зеленый), II (желтый) и III (оранжевый)

*Fig. 1.* Technological map for thermochemical recording on thin titanium films with thicknesses of 20 nm (a, b), 30 nm (c, d), 40 nm (e, f) as viewed in transmitted (a, c, e) and reflected (b, d, f) light. Insets show the optical microphotos (magnification 100<sup>×</sup>) of the characteristic structures recorded at V = 0.1 mm/s and q = 50, 89, and 139 MW/m<sup>2</sup>. Dashed lines show the borders of the regimes I (green), II (yellow), and III (orange)

режим III — соответствующий полному сквозному окислению пленки по всей поверхности облученной области;

режим IV — соответствующий визуально отличимой абляции пленки.

Экспериментально определенные границы режимов записи (значения P и q при воздействии лазерными пучками с  $d_1 = 50$  мкм и  $d_2 = 70$  мкм) приведены в табл. 1. Для всех пленок наблюдаются примерно одинаковые границы рабочих режимов записи. Например, режим II, характеризующийся частичным локальным

окислением пленки и появлением контрастных (при рассмотрении в проходящем свете) структур, ограничен снизу значениями q порядка 40 МВт/м<sup>2</sup>. При этом структуры, записанные в режиме II, локализованы на пленке и представляют собой чередующиеся полосы переменной прозрачности (рис. 2, *а-с*). Запись при параметрах воздействия в режиме II позволяет осуществить управление контрастом коэффициента пропускания К формируемой области на заданное значение от 0 до 40 % (рис. 2, *d*) за счет варьирования коэффициента заполнения D (отношения ширины насквозь окисленной прозрачной области к пространственному периоду записанных треков) от 25 до 85 %, а фактически за счет растрирования изображения. При q свыше 90 MBт/м<sup>2</sup> области с высокой прозрачностью полностью заполняют облученную зону, и все структуры, записанные в режиме III, обладают одинаковым значением контраста  $K \approx 40$  % по отношению к исходной пленке.

Отметим, что цвет образца, наблюдаемый при рассмотрении структур в отраженном свете (рис. 1, b, d, f) связан с дифракцией белого света на образовавшемся субмикронном периодическом рельефе (лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур) [33], выступающим в роли дифракционной решетки. Формируемые в пределах лазерного трека рельефы характеризуются пространственным периодом  $\Lambda = 0.71 \pm 0.02$  мкм (рис. 3), что хорошо согласуется с результатами работ [33, 37]. Существенной зависимости периода  $\Lambda$  и упорядоченности  $\Delta\Lambda$  от толщины исходной пленки выявлено не было. Отметим, что  $\Delta\Lambda$ структур повышается при увеличении интенсивности лазерного воздействия в пределах границ режима III. Формирование структур устойчивого периода может составить основу для записи более сложных элементов дифракционной оптики [49].

#### Обсуждение результатов

Для описания экспериментально выявленных режимов формирования структур было проведено численно-аналитическое моделирование температурных диапазонов записи. Температура пленки к моменту окончания была определена по классической формуле [50]:

$$T = \frac{q_{\text{HMIR}}A\sqrt{a_2\tau}}{k_2} \left\{ \frac{2}{\sqrt{\pi}} + \psi[\exp(\psi^{-2})\operatorname{erfc}(\psi^{-1}) - 1] \right\} + T_H, \quad (1)$$

где  $\psi = \frac{\rho_1 c_1 h}{\rho_2 c_2 \sqrt{a_2 \tau}}$  — коэффициент, определяющий интенсивность теплоотвода из пленки в подложку;  $q_{\rm имп} = \frac{q}{f \tau}$  — импульсная плотность мощности падающего излучения, f — частота следования импульсов;  $\tau$  — длительность импульса;  $\rho$  — плотность; c — теплоемкость; a — температуропроводность; k — теплопроводность;  $T_H$  — начальная температура;  ${\rm erfc}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{z}^{\infty} e^{-u^2} du$  — дополнительный интеграл вероятности; индекс «1» относится к пленке, «2» — к подложке.

| Режим записи | Мощность Р, мВт                    | Плотность мощности <i>q</i> ,<br>МВт/м <sup>2</sup> | Мощность Р, мВт                    | Плотность мощности <i>q</i> ,<br>МВт/м <sup>2</sup> |
|--------------|------------------------------------|---|------------------------------------|---|
|              | диаметр пучка $d_1 = 50 \pm 1$ мкм |   | диаметр пучка $d_2 = 70 \pm 1$ мкм |   |
| Режим I      | _                                  | _   | 63 ± 0,2                           | $16 \pm 1$  |
|              |                                    | _   | 91 ± 0,2                           | $24 \pm 1$  |
|              | 81 ± 0,2                           | 42 ± 1  | $142 \pm 0,4$                      | 37 ± 1  |
| Режим II     | _                                  | _   | $190 \pm 0,5$                      | 50 ± 2  |
|              | 120 ± 0,3                          | 63 ± 2  | 248 ± 1                            | 65 ± 2  |
|              |                                    | _   | 291 ± 1                            | $76 \pm 2$  |
|              | 170 ± 0,4                          | 89 ± 3  | 339 ± 1                            | 89 ± 3  |
| Режим III    | _                                  | _   | 392 ± 1                            | 102 ± 3   |
|              | 230 ± 1                            | 121 ± 4   | 477 ± 1                            | 125 ± 4   |
|              |                                    | _   | 532 ± 1                            | $139 \pm 4$   |
|              | 330 ± 1                            | 173 ± 5   | _                                  | _   |
|              | 390 ± 1                            | 204 ± 6   | _                                  | _   |
|              | 450 ± 1                            | $236 \pm 7$   |                                    |   |
| Режим IV     | 520 ± 1                            | 272 ± 8   | _                                  | _   |
|              | 590 ± 2                            | 309 ± 9   | _                                  | _   |
|              | $670 \pm 2$                        | 351 ± 11  | _                                  | _   |

# *Таблица 1.* Экспериментально определенные значения рабочих режимов записи структур *Table 1.* Experimentally verified regimes for structures recording



*Рис. 2.* Микрофотографии структур, записанных при выбранных параметрах воздействия в режиме II (*a–c*). Контурные графики коэффициента заполнения записанных структур *D*(*d*) и значений контраста коэффициента пропускания *К* в зависимости от параметров записи (*e*), полученные в результате анализа оптических микрофотографий

*Fig. 2.* Optical microphotos of the structures recorded with the selected lasing parameters within the Regime II (a-c). Contour graphs for the duty factor *D* of the recorded structures (*d*) and transmission coefficient contrast *K* depending on the recording parameters found by the optical microphotos analysis (*e*)

Поглощательная способность материала пленки *А* определена для двух крайних случаев (исходной металлической и полностью окисленной пленок), определяющих верхние и нижние пределы точности расчетных оценок. Справочные сведения об оптических и тепло-

физических характеристиках материалов, использовавшихся в расчетах, приведены в табл. 2.

Сопоставление границ режимов записи, полученных экспериментально и рассчитанных по формуле (1), приведено на рис. 4. Нижние и верхние границы



*Рис. 3.* Микрофотографии структур, записанных на образцах пленок толщинами 20 нм (*a*, *d*), 30 нм (*b*, *e*) и 40 нм (*c*, *f*) при плотностях мощности 89 МВт/м<sup>2</sup> (*a*–*c*) и 139 МВт/м<sup>2</sup> (*d*–*f*) и при скорости сканирования лазерного пучка 1 мм/с. Масштаб одинаковый на всех микрофотографиях. На вставках приведены изображения, полученные методом 2D быстрого преобразования Фурье соответствующих микрофотографий. Границы вставок соответствуют пространственной частоте ±1,5 мкм<sup>-1</sup>

*Fig. 3.* Microphotos of structures recorded on film samples with thicknesses of 20 nm, 30 nm, and 40 nm with power densities of 89 MW/m<sup>2</sup> (*a–c*) and 139 MW/m<sup>2</sup> (*d–f*) and scanning speed 1 mm/s. Scale bar is the same for all the microphotos. 2D-FFT analysis images for each microphoto are shown in the insets. Insets borders correspond to spatial frequency of ±1.5 µm<sup>-1</sup>

Таблица 2. Теплофизические и оптические характеристики материалов [27, 28]

*Table 2*. Thermal and optical parameters of the materials [27, 28]

| Материал  |  |  |
|---|--|--|
| пленка  | подложка   |  |
| титан<br>(при нормальных<br>условиях, <i>h</i> = 40 нм) | кварц КУ-1   |  |
| 19  | 1,4  |  |
| 4505  | 2600   |  |
| 523   | 750  |  |
| 8   | 0,7  |  |
| 1941  | _  |  |
| 3560  | —  |  |
| 0,4   |  |  |
|   | Материал<br>пленка<br>титан<br>(при нормальных<br>условиях, <i>h</i> = 40 нм)<br>19<br>4505<br>523<br>8<br>1941<br>3560<br>0,4 |  |

окрашенных областей соответствуют пороговым значениям, определенным при значениях поглощательной способности *A* для металлической и оксидной пленок. Экспериментальные и расчетные значения хорошо коррелируют между собой для пленок всех изученных толщин.

В ходе проведенного эксперимента были определены режимы формирования структур, которые позволили сформировать прототип защитных элементов, каждый фрагмент которого записан в различных режимах на пленке титана толщиной 30 нм. На рис. 5, d, e, представлен образец в отраженном и проходящем свете, записанный по подобранным режимам (рис. 5, b, c). Визуально образец имеет некоторые отклонения от ожидаемого результата, что предположительно связано с локальной дефектностью пленки при напылении или не точным позиционированием плоскости фокусировки при записи, что может быть устранено на более поздних уровнях готовности технологии.



Рис. 4. График зависимости плотности мощности лазерного излучения, необходимой для нагревания пленки титана до *T*<sub>пл</sub> (синяя область) и *T*<sub>кип</sub> (розовая область), от исходной толщины пленки *h*. Пунктирами отмечены режимы I (зеленый), II (желтый), III (оранжевый) и IV (красный)

*Fig. 4.* Dependence of the laser power density, required to heat the titanium film of various thickness to melting (blue region) and boiling (pink region) points. Dashed lines show the borders of the regimes I (green), II (yellow), III (orange), and IV (red)

#### Заключение

Представлен подход к созданию структур управляемыми значениями контраста коэффициента пропускания (в проходящем свете) и с дифракционными эффектами (в отраженном свете) за счет прямой лазерной термохимической записи на тонких пленках титана.

Теоретически смоделированы и экспериментально подтверждены режимы записи структур при воздействии импульсов наносекундной длительности. Формирование контрастных структур происходит в диапазонах плотности мощности около 15–140 МВт/м<sup>2</sup> при сканировании со скоростями от 0,1 до 1 мм/с. Режимы формирования структур (частичного окисления, сквозного окисления, абляции) выявлены при двух различных положениях фокусировки, при этом основные закономерности совпали как качественно, так и количественно.

Определены значения плотности мощности, позволяющие управляемо изменять значение контраста

#### Литература

- 1. Иванов С.А., Доан Ван Бак, Игнатьев А.И., Никоноров Н.В. Особенности записи наложенных голограмм в фото-термо-рефрактивном стекле // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 3. С. 428–435. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2016-16-3-428-435
- Rathsack B.M., Tabery C.E., Scheer S.A., Pochkowski M., Philbin C., Kalk F., Henderson C.L., Buck P.D., Willson C.G. Optical lithography simulation and photoresist optimization for photomask fabrication // Proceedings of SPIE. 1999. V. 3678. P. 1215–1226. https://doi. org/10.1117/12.350173
- Koronkevich V.P., Kiryanov V.P., Korol'kov V.P., Poleshchuk A.G., Cherkashin V.V., Churin E.G., Kharisov A.A. Fabrication of diffractive optical elements by direct laser-writing with circular scanning //



Рис. 5. Схема логотипа Института лазерных технологий Университета ИТМО: общий вид схемы, состоящей из одинаковых элементов равного размера (*a*), логотип в отраженном (*b*) и проходящем (*c*) свете, каждый элемент которого записан в своем рабочем режиме. Фотографии образца в отраженном (*d*) и проходящем (*e*) свете при заданных режимах (рис. 1)

*Fig.* 5. The Institute of Laser Technologies logo sketch: general view of the sketch consisting of identical elements of equal size (*a*), the logo in reflected (*b*) and transmitted (*c*) light, each element of which recorded in its own processing regime (*b*, *c*). Photo of the sample in reflected (*d*) and in transmitted light (*e*) at the previously specified regimes (Fig. 1)

коэффициента пропускания структур (порядка 50– 90 МВт/м<sup>2</sup>, режим II). За счет формирования структур с различным значением пространственного разрешения записи (растрирования) показана возможность записи структур с заданными характеристиками прозрачности. Контраст коэффициента пропускания таких структур относительно исходного значения прозрачности пленки управляемо варьируется от 1 до 40 %. При этом на пленках формируется субмикронный рельеф, картина дифракции белого света на котором, наблюдаемая при рассмотрении в отраженном свете, во многом зависит от взаимного положения образца и источника облучения, что совпадает с ранее полученными результатами [37].

Применение выявленных режимов было продемонстрировано на примере записи оптического элемента типа полутонового растрированного фотошаблона с заданной геометрий и значениями контраста.

#### References

- Ivanov S.A., Doan Van Bac, Ignatiev A.I., Nikonorov N.V. Features of multiplexed holograms recording in photo-thermo-refractive glass. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 428–435. (in Russian). https://doi.org/10.17586/2226-1494-2016-16-3-428-435
- Rathsack B.M., Tabery C.E., Scheer S.A., Pochkowski M., Philbin C., Kalk F., Henderson C.L., Buck P.D., Willson C.G. Optical lithography simulation and photoresist optimization for photomask fabrication. *Proceedings of SPIE*, 1999, vol. 3678, pp. 1215–1226. https://doi. org/10.1117/12.350173
- Koronkevich V.P., Kiryanov V.P., Korol'kov V.P., Poleshchuk A.G., Cherkashin V.V., Churin E.G., Kharisov A.A. Fabrication of diffractive optical elements by direct laser-writing with circular

Proceedings of SPIE. 1995. V. 2363. P. 290–297. https://doi. org/10.1117/12.199647

- Зорич Н.Д., Лившиц И.Л., Соколова Е.А. Преимущества использования дифракционных оптических элементов в простых оптических изображающих системах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 1. С. 6–13. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2015-15-1-6-13
- Полещук А.Г. Методы формирования профиля поверхности дифракционных оптических элементов // Компьютерная оптика. 1996. № 16. С. 54–61.
- Veiko V.P., Korolkov V.P., Poleshchuk A.G., Sinev D.A., Shakhno E.A. Laser technologies in micro-optics. Part 1. Fabrication of diffractive optical elements and photomasks with amplitude transmission // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2017. V. 53. N 5. P. 474–483. https://doi.org/10.3103/S8756699017050077
- Knoblich M., Uwurukundo X., Stumpf D., Kraus M., Hillmer H., Brunner R. Annular gray tone lithography for the fabrication of rotationally symmetric continuous relief meso- and microscale optical elements // Photonics. 2023. V. 10. N 9. P. 1000. https://doi. org/10.3390/photonics10091000
- Li J., Ge S., Liu W. High-efficiency and high-precision replication manufacturing of large-aperture multi-level diffractive lenses // Proceedings of SPIE. 2023. V. 12963. P. 129631I. https://doi. org/10.1117/12.3007883
- Oscurato S., Reda F., Salvatore M., Borbone F., Maddalena P., Ambrosio A. Shapeshifting dif-fractive optical devices // Laser & Photonics Reviews. 2021. V. 16. N 4. P. 2100514. https://doi. org/10.1002/lpor.202100514
- Медунецкий В.М., Солк С.В. Опыт применения и перспективы технологии алмазного микроточения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 1(89). С. 165–170.
- Zhang J., Li X., Fu Y., Zheng Y., Mo H., Chen X., Xiao J., Xu J. Improved machinability of single crystal silicon by applying in-situ laser-vibration hybrid assisted diamond cutting // Journal of Materials Processing Technology. 2024. V. 326. P. 118343. https://doi. org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118343
- Wang H., Wang H., Zhang W., Yang, J. Toward Near-Perfect Diffractive Optical Elements via Nanoscale 3D Printing // ACS Nano. 2020. V. 14. N 8. P. 10452–10461. https://doi.org/10.1021/ acsnano.0c04313
- Eshe R., Frumkin V., Nice M., Luria O., Ferdman B., Opatovski N., Gommed K., Shusteff M., Shechtman Y., Bercovici M. Programmable thermocapillary shaping of thin liquid films // Flow. 2022. V. 2. P. E27. https://doi.org/10.1017/flo.2022.17
- 14. Елисеев Н.Н., Невзоров А.А., Михалевский В.А., Киселев А.В., Бурцев А.А., Ионин В.В., Лотин А.А. Переключение электрических свойств тонкопленочных мемристивных элементов на основе GeTe последовательностями сверхкоротких лазерных импульсов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23. № 5. С. 911–919. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-5-911-919
- Koreshev S.N., Ratushnyi V.P. Short-wave boundary of applicability of relief-phase reflecting holograms on a thin film of a chalcogenide glassy semiconductor // Proceedings of SPIE. 2013. V. 8644. P. 86440W. https://doi.org/10.1117/12.981446
- Dykes J.M., Plesa C., Chapman G.H. Enhancing direct-write laser control techniques for bimetallic grayscale photomasks // Proceedings of SPIE. 2008. V. 6883. P. 688312. https://doi. org/10.1117/12.765006
- Wang R., Wei J., Fan Y. Chalcogenide phase-change thin films used as grayscale photolithography materials // Optics express. 2014. V. 22. N 5. P. 4973–4984. https://doi.org/10.1364/OE.22.004973
- Gotchiyaev V.Z., Korolkov V.P., Šokolov A.P., Chernukhin V.P. High resolution optical recording on a-Si films // Journal of Non-Crystalline Solids. 1991. V. 137–138. Part. 2. P. 1297–1300. https://doi. org/10.1016/S0022-3093(05)80361-8
- Гочияев В.З., Корольков В.П., Соколов А.П., Чернухин В.П. Полутоновая оптическая запись на пленках а-Si // Квантовая электроника. 1989. Т. 16. № 11. С. 2343–2348.
- Акишина Е.Ю., Лазарева К.Е., Никоноров Н.В., Сидоров А.И., Цехомский В.А. Влияние галогенов на спектральные и фоточувствительные свойства фото-термо-рефрактивных стекол // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2009. № 2(60). С. 5–16.

scanning. Proceedings of SPIE, 1995, vol. 2363, pp. 290–297. https://doi.org/10.1117/12.199647

- Zoric N.Dj., Livshits I.L., Sokolova E.A. Advantages of diffractive optical elements application in simple optical imaging systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 6–13. (in Russian). https://doi.org/10.17586/2226-1494-2015-15-1-6-13
- Poleshchuk A.G. Methods of fabricating the surface profile of diffractive optical elements. *Computer Optics*, 1996, no. 16, pp. 54– 61. (in Russian)
- Veiko V.P., Korolkov V.P., Poleshchuk A.G., Sinev D.A., Shakhno E.A. Laser technologies in micro-optics. Part 1. Fabrication of diffractive optical elements and photomasks with amplitude transmission. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2017, vol. 53, no. 5, pp. 474–483. https://doi.org/10.3103/ S8756699017050077
- Knoblich M., Uwurukundo X., Stumpf D., Kraus M., Hillmer H., Brunner R. Annular gray tone lithography for the fabrication of rotationally symmetric continuous relief meso- and microscale optical elements. *Photonics*, 2023, vol. 10, no. 9, pp. 1000. https://doi. org/10.3390/photonics10091000
- Li J., Ge S., Liu W. High-efficiency and high-precision replication manufacturing of large-aperture multi-level diffractive lenses. *Proceedings of SPIE*, 2023, vol. 12963, pp. 129631I. https://doi. org/10.1117/12.3007883
- Oscurato S., Reda F., Salvatore M., Borbone F., Maddalena P., Ambrosio A. Shapeshifting diffractive optical devices. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, vol. 16, no. 4, pp. 2100514. https://doi. org/10.1002/lpor.202100514
- Medunetskiy V., Solk S. Application experience and prospects of diamond micro-turning technology // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2014, no. 1(89), pp. 165–170. (in Russian)
- Zhang J., Li X., Fu Y., Zheng Y., Mo H., Chen X., Xiao J., Xu J. Improved machinability of single crystal silicon by applying in-situ laser-vibration hybrid assisted diamond cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, 2024, vol. 326, pp. 118343. https://doi. org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118343
- Wang H., Wang H., Zhang W., Yang, J. Toward Near-Perfect Diffractive Optical Elements via Nanoscale 3D Printing. ACS Nano, 2020, vol. 14, no. 8, pp. 10452–10461. https://doi.org/10.1021/ acsnano.0c04313
- Eshe R., Frumkin V., Nice M., Luria O., Ferdman B., Opatovski N., Gommed K., Shusteff M., Shechtman Y., Bercovici M. Programmable thermocapillary shaping of thin liquid films. *Flow*, 2022, vol. 2, pp. E27. https://doi.org/10.1017/flo.2022.17
- Eliseev N.N., Nevzorov A.A., Mikhalevsky V.A., Kiselev A.V., Burtsev A.A., Ionin V.V., Lotin A.A. Switching the electrical properties of thin-film memristive elements based on GeTe by sequences of ultrashort laser pulses. *Scientific and Technical Journal* of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2023, vol. 23, no. 5, pp. 911–919. (in Russian). https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-5-911-919
- Koreshev S.N., Ratushnyi V.P. Short-wave boundary of applicability of relief-phase reflecting holograms on a thin film of a chalcogenide glassy semiconductor. *Proceedings of SPIE*, 2013, vol. 8644, pp. 86440W. https://doi.org/10.1117/12.981446
- Dykes J.M., Plesa C., Chapman G.H. Enhancing direct-write laser control techniques for bimetallic grayscale photomasks. *Proceedings* of SPIE, 2008, vol. 6883, pp. 688312. https://doi.org/10.1117/12.765006
- Wang R., Wei J., Fan Y. Chalcogenide phase-change thin films used as grayscale photolithography materials. *Optics express*, 2014, vol. 22, no. 5, pp. 4973–4984. https://doi.org/10.1364/OE.22.004973
- Gotchiyaev V.Z., Korolkov V.P., Sokolov A.P., Chernukhin V.P. High resolution optical recording on a-Si films. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1991, vol. 137–138, part. 2, pp. 1297–1300. https://doi. org/10.1016/S0022-3093(05)80361-8
- Gochiyaev V.Z., Korol'kov V.P., Sokolov A.P., Chernukhin V.P. Halftone optical storage in a-Si films. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1989, vol. 19, no. 11, pp. 1506–1509. https://doi. org/10.1070/QE1989v019n11ABEH009597
- Akishina E., Lazareva K., Nikonorov N.V., Sidorov A.I., Tsekhomsky V. Effect of halogens on spectral and photosensitive properties of photo-thermo-refractive glasses. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2009, no. 2(60). pp. 5–16. (in Russian)

- Korolkov V.P., Malyshev A.I., Nikitin V.G., Poleshchuk A.G., Kharissov A.A., Cherkashin V.V. Application of gray-scale LDWglass masks for fabrication of high-efficiency does // Proceedings of SPIE. 1999. V. 3633. P. 129–138. https://doi.org/10.1117/12.349316
- Korolkov V. P., Malyshev A.I., Poleshchuk A.G., Cherkashin V.V., Tiziani H.J., Pruss C., Schoder T., Westhauser J., Wu C. Fabrication of gray-scale masks and diffractive optical elements with LDWglass // Proceedings of SPIE. 2001. V. 4440. P. 73–84. https://doi. org/10.1117/12.448026
- Корольков В.П., Малышев А.И., Никитин В.Г., Полещук А.Г., Харисов А.А., Черкашин В.В., Ву Ч. Полутоновые фотошаблоны на основе LDW-стекол // Автометрия. 1998. № 6. С. 27–37.
- 24. Zhestkij N.A., Efimova A.S., Kenzhebayeva Y., Povarov S.A., Alekseevskiy P.V., Rzhevskiy S.S., Shipilovskikh S.A., Milichko V.A. Grayscale to multicolor laser writing inside a Label-Free Metal-Organic frameworks // Advanced Functional Materials. 2024. V. 34. N 30. P. 2311235. https://doi.org/10.1002/adfm.202311235
- Low M., Lee H., Lim C., Sandeep C., Murukeshan V., Kim S., Kim Y. Laser-induced reduced-graphene-oxide micro-optics patterned by femtosecond laser direct writing // Applied Surface Science. 2020. V. 526. P. 146647. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146647
- Gorbunov A.A., Eichler H., Pompe W., Huey B. Lateral self-limitation in the laser-induced oxidation of ultrathin metal films // Applied Physics Letters. 1996. V. 69. N 19. P. 2816–2818. https://doi.org/10.1063/1.116853
- Shakhno E.A., Nguyen Q.D., Sinev D., Veiko V.P. Lateral proximity effect in direct laser thermochemical recording on thin titanium films // Optical and Quantum Electronics. 2023. V. 55. N 6. P. 502. https://doi.org/10.1007/s11082-023-04801-0
- Shakhno E.A., Nguyen Q., Sinev D.A., Veiko V.P. Proximity-effectrelated reduction of the minimum element size in thermochemical laser writing // Journal of Optical Technology. 2022. V. 89. N 6. P. 312–319. https://doi.org/10.1364/JOT.89.000312
- Shakhno E.A., Sinev D.A., Kulazhkin A.M. Features of laser oxidation of thin films of titanium // Journal of Optical Technology. 2014. V. 81. N 5. P. 298–302. https://doi.org/10.1364/JOT.81.000298
- Veiko V.P., Shakhno E.A., Sinev D.A. Laser thermochemical writing: pursuing the resolution // Optical and Quantum Electronics. 2016. V. 48. N 6. P. 322. https://doi.org/10.1007/s11082-016-0594-y
- Veiko V.P., Nguyen Q., Shakhno E.A., Sinev D.A., Lebedeva E.V. Physical similarity of the processes of laser thermochemical recording on thin metal films and modeling the recording of submicron structures // Optical and Quantum Electronics. 2019. V. 51. N 11. P. 348. https://doi.org/10.1007/s11082-019-2073-8
- 32. Veiko V.P., Zakoldaev R.A., Shakhno E.A., Sinev D.A., Nguyen Z.K., Baranov A.V., Bogdanov K.V., Gedvilas M., Raciukaitis G., Vishnevskaya L.V., Degtyareva E.N. Thermochemical writing with high spatial resolution on Ti films utilising picosecond laser // Optical Materials Express. 2019. V. 9. N 6. P. 2729–2737. https://doi. org/10.1364/OME.9.002729
- Sinev D.A., Yuzhakova D.S., Moskvin M.K., Veiko V.P. Formation of the submicron oxidative LIPSS on thin titanium films during nanosecond laser recording // Nanomaterials. 2020. V. 10. N 11. P. 2161. https://doi.org/10.3390/nano10112161
- 34. Nguyen Q., Shakhno E.A., Sinev D.A., Zakoldaev R.A., Veiko V.P. Forming microstructures of certain transparency on thin titanium films by laser thermochemical method // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 1822. N 1. P. 012006. https://doi. org/10.1088/1742-6596/1822/1/012006
- 35. Shakhno E.A., Nguyen Q., Sinev D.A., Matvienko E., Zakoldaev R.A., Veiko V.P. Laser thermochemical high-contrast recording on thin metal films // Nanomaterials. 2021. V. 11. N 1. P. 67. https://doi.org/10.3390/nano11010067
- 36. Xia F., Jiao L.P., Wu D., Li S., Zhang K., Kong W., Yun M., Liu Q., Zhang X. Mechanism of pulsed-laser-induced oxidation of titanium films // Optical Materials Express. 2019. V. 9. N 10. P. 4097–4103. https://doi.org/10.1364/OME.9.004097
- Ibrahim Q., Andreeva Y., Suvorov A., Khmelenin D., Grigoryev E., Shcherbakov A.A., Sinev D. Laser fabrication of 1D and 2D periodic subwavelength gratings on titanium films // Optics and Laser Technology. 2024. V. 174. P. 110642. https://doi.org/10.1016/j. optlastec.2024.110642
- Poleshchuk A.G., Korolkov V.P., Sedukhin A.G., Sametov A.R., Shimanskii R.V. Direct laser writing of gray-scale microimages with a large dynamic range in chromium films // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2015. V. 51. N 3. P. 287–292. https://doi.org/10.3103/S8756699015030115

- Korolkov V.P., Malyshev A.I., Nikitin V.G., Poleshchuk A.G., Kharissov A.A., Cherkashin V.V. Application of gray-scale LDW-glass masks for fabrication of high-efficiency does. *Proceedings of SPIE*, 1999, vol. 3633, pp. 129–138. https://doi.org/10.1117/12.349316
- Korolkov V. P., Malyshev A.I., Poleshchuk A.G., Cherkashin V.V., Tiziani H.J., Pruss C., Schoder T., Westhauser J., Wu C. Fabrication of gray-scale masks and diffractive optical elements with LDW-glass. *Proceedings of SPIE*, 2001, vol. 4440, pp. 73–84. https://doi.org/ 10.1117/12.448026
- Korolkov V.P., Malyshev A.I., Nikitin V.G., Poleshchuk A.G., Kharisov A.A., Cherkashin V.V., Wu Ch. Gray-scale masks based on LDW glasses. *Avtometrija*, 1998, no. 6, pp. 27–37. (in Russian)
- 24. Zhestkij N.A., Efimova A.S., Kenzhebayeva Y., Povarov S.A., Alekseevskiy P.V., Rzhevskiy S.S., Shipilovskikh S.A., Milichko V.A. Grayscale to multicolor laser writing inside a Label-Free Metal-Organic frameworks. *Advanced Functional Materials*, 2024, vol. 34, no. 30, pp. 2311235. https://doi.org/10.1002/adfm.202311235
- Low M., Lee H., Lim C., Sandeep C., Murukeshan V., Kim S., Kim Y. Laser-induced reduced-graphene-oxide micro-optics patterned by femtosecond laser direct writing. *Applied Surface Science*, 2020, vol. 526, pp. 146647. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146647
- Gorbunov A.A., Eichler H., Pompe W., Huey B. Lateral self-limitation in the laser-induced oxidation of ultrathin metal films. *Applied Physics Letters*. 1996. vol. 69, no. 19, pp. 2816–2818. https://doi. org/10.1063/1.116853
- Shakhno E.A., Nguyen Q.D., Sinev D., Veiko V.P. Lateral proximity effect in direct laser thermochemical recording on thin titanium films. *Optical and Quantum Electronics*, 2023, vol. 55, no. 6, pp. 502. https://doi.org/10.1007/s11082-023-04801-0
- Shakhno E.A., Nguyen Q., Sinev D.A., Veiko V.P. Proximity-effectrelated reduction of the minimum element size in thermochemical laser writing. *Journal of Optical Technology*, 2022, vol. 89, no. 6, pp. 312–319. https://doi.org/10.1364/JOT.89.000312
- Shakhno E.A., Sinev D.A., Kulazhkin A.M. Features of laser oxidation of thin films of titanium. *Journal of Optical Technology*, 2014, vol. 81, no. 5, pp. 298–302. https://doi.org/10.1364/JOT.81.000298
- Veiko V.P., Shakhno E.A., Sinev D.A. Laser thermochemical writing: pursuing the resolution. *Optical and Quantum Electronics*, 2016, vol. 48, no. 6, pp. 322. https://doi.org/10.1007/s11082-016-0594-y
- Veiko V.P., Nguyen Q., Shakhno E.A., Sinev D.A., Lebedeva E.V. Physical similarity of the processes of laser thermochemical recording on thin metal films and modeling the recording of submicron structures. *Optical and Quantum Electronics*, 2019, vol. 51, no. 11, pp. 348. https://doi.org/10.1007/s11082-019-2073-8
- 32. Veiko V.P., Zakoldaev R.A., Shakhno E.A., Sinev D.A., Nguyen Z.K., Baranov A.V., Bogdanov K.V., Gedvilas M., Raciukaitis G., Vishnevskaya L.V., Degtyareva E.N. Thermochemical writing with high spatial resolution on Ti films utilising picosecond laser. *Optical Materials Express*, 2019, vol. 9, no. 6, pp. 2729–2737. https://doi. org/10.1364/OME.9.002729
- Sinev D.A., Yuzhakova D.S., Moskvin M.K., Veiko V.P. Formation of the submicron oxidative LIPSS on thin titanium films during nanosecond laser recording. *Nanomaterials*, 2020, vol. 10, no. 11, pp. 2161. https://doi.org/10.3390/nano10112161
- 34. Nguyen Q., Shakhno E.A., Sinev D.A., Zakoldaev R.A., Veiko V.P. Forming microstructures of certain transparency on thin titanium films by laser thermochemical method. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021. vol. 1822, no. 1, pp. 012006. https://doi. org/10.1088/1742-6596/1822/1/012006
- Shakhno E.A., Nguyen Q., Sinev D.A., Matvienko E., Zakoldaev R.A., Veiko V.P. Laser thermochemical high-contrast recording on thin metal films. *Nanomaterials*, 2021, vol. 11, no. 1, pp. 67. https://doi.org/10.3390/nano11010067
- Xia F., Jiao L.P., Wu D., Li S., Zhang K., Kong W., Yun M., Liu Q., Zhang X. Mechanism of pulsed-laser-induced oxidation of titanium films. *Optical Materials Express*, 2019, vol. 9, no. 10, pp. 4097–4103. https://doi.org/10.1364/OME.9.004097
- Ibrahim Q., Andreeva Y., Suvorov A., Khmelenin D., Grigoryev E., Shcherbakov A.A., Sinev D. Laser fabrication of 1D and 2D periodic subwavelength gratings on titanium films. *Optics and Laser Technology*, 2024, vol. 174, pp. 110642. https://doi.org/10.1016/j. optlastec.2024.110642
- Poleshchuk A.G., Korolkov V.P., Sedukhin A.G., Sametov A.R., Shimanskii R.V. Direct laser writing of gray-scale microimages with a large dynamic range in chromium films. *Optoelectronics*,

- 39. Korolkov V.P., Sedukhin A.G., Mikerin, S.L. Technological and optical methods for increasing the spatial resolution of thermochemical laser writing on thin metal films // Optical and Quantum Electronics. 2019. V. 51. N 12. P. 389. https://doi. org/10.1007/s11082-019-2111-6
- Guo C.F., Cao S., Jiang P., Fang Y., Zhang J., Fan Y., Wang Y., Xu W., Zhao Z., Liu Q. Grayscale photomask fabricated by laser direct writing in metallic nano-films // Optics Express. 2009. V. 17. N 22. P. 19981–19987. https://doi.org/10.1364/OE.17.019981
- Guo C.F., Zhang J.M., Miao J.J., Fan Y.T., Liu Q. MTMO grayscale photomask // Optics Express. 2010. V. 18. N 3. P. 2621–2631. https:// doi.org/10.1364/OE.18.002621
- 42. Xia F., Zhang X., Wang M., Yi S.M., Liu Q., Xu J.J. Numerical analysis of the sub-wavelength fabrication of MTMO grayscale photomasks by direct laser writing // Optics Express. 2014. V. 22. N 14. P. 16889–16896. https://doi.org/10.1364/OE.22.016889
- 43. Xia F., Zhang K., Li S., Yun M., Kong W., Zhang X., Liu Q. Simulation of the laser-induced oxidation process in fabricated Sn-MTMO grayscale photomasks // OSA Continuum. 2021. V. 4. N 1. P. 65–71. https://doi.org/10.1364/OSAC.411797
- 44. Xia F., Zhang X., Wang M., Liu Q., Xu J.J. Analysis of the laser oxidation kinetics process of In-In2O3 MTMO photomasks by laser direct writing // Optics Express. 2015. V. 23. N 22. P. 29193–29201. https://doi.org/10.1364/OE.23.029193
- 45. Korolkov V.P., Nasyrov R.K., Sametov A.R., Malyshev A.I., Belousov D.A., Mikerin S.L., Kuts R.I. Direct laser writing of high-NA computer-generated holograms on metal films of the titanium group and chromium // Proceedings of SPIE. 2019. V. 11188. P. 111880R. https://doi.org/10.1117/12.2537269
- 46. Belousov D.A., Bronnikov K.A., Okotrub K.A., Mikerin S.L., Korolkov V.P., Terentyev V.S., Dostovalov A.V. Thermochemical Laser-Induced Periodic Surface Structures formation by femtosecond laser on Hf thin films in air and vacuum // Materials. 2021. V. 14. N 21. P. 6714. https://doi.org/10.3390/ma14216714
- Korolkov V.P., Sedukhin A.G., Belousov D.A., Shimansky R.V., Khomutov V.N., Mikerin S.L., Spesivtsev E.V., Kutz, R.I. Increasing the spatial resolution of direct laser writing of diffractive structures on thin films of titanium group metals // Proceedings of SPIE. 2019. V. 11030. P. 110300A. https://doi.org/10.1117/12.2520978
- Ponkratova E.Y., Kuzmichev A.M., Rud D.A., Khubezhov S.A., Dolgintsev D.M., Ageev E.I., Veiko V.P., Sinev D.A., Zuev D.A. Nanosecond Laser-Assisted Fabrication of photocatalytically active TIO<sub>2</sub> nanocoatings: Implication in organic dyes degradation // ACS Applied Nano Materi-als. 2024. V. 7. N 16. P. 19268–19278. https:// doi.org/10.1021/acsanm.4c03155
- Kozlova E., Kotlyar V. Ultrashort laser pulse focusing by amplitude and phase zone plates // Photonics. 2022. V. 9. N 9. P. 662. https://doi. org/10.3390/photonics9090662
- 50. Либенсон М.Н. Нагрев и разрушение тонких пленок излучением ОКГ // Физика и химия обработки материалов. 1968. № 2. С. 3–11.

#### Авторы

**Пивоваров Артем Дмитриевич** — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, https://orcid. org/0009-0006-7911-7085, vvwvwv@bk.ru

Усынина Екатерина Викторовна — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, https://orcid. org/0009-0001-3642-2913, kattyuus@gmail.com

Синев Дмитрий Андреевич — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, sc 55547026700, Российская Федерация, https://orcid.org/0000-0002-6274-1491, sinev@ itmo.ru

Статья поступила в редакцию 27.08.2024 Одобрена после рецензирования 17.12.2024 Принята к печати 23.01.2025



Instrumentation and Data Processing, 2015, vol. 51, no. 3, pp. 287–292. https://doi.org/10.3103/S8756699015030115

- 39. Korolkov V.P., Sedukhin A.G., Mikerin, S.L. Technological and optical methods for increasing the spatial resolution of thermochemical laser writing on thin metal films. *Optical and Quantum Electronics*. 2019, vol. 51, no. 12, pp. 389. https://doi. org/10.1007/s11082-019-2111-6
- Guo C.F., Cao S., Jiang P., Fang Y., Zhang J., Fan Y., Wang Y., Xu W., Zhao Z., Liu Q. Grayscale photomask fabricated by laser direct writing in metallic nano-films. *Optics Express*, 2009, vol. 17, no. 22, pp. 19981–19987. https://doi.org/10.1364/OE.17.019981
- Guo C.F., Zhang J.M., Miao J.J., Fan Y.T., Liu Q. MTMO grayscale photomask. *Optics Express*, 2010, vol. 18, no. 3, pp. 2621–2631. https://doi.org/10.1364/OE.18.002621
- 42. Xia F., Zhang X., Wang M., Yi S.M., Liu Q., Xu J.J. Numerical analysis of the sub-wavelength fabrication of MTMO grayscale photomasks by direct laser writing. *Optics Express*, 2014, vol. 22, no. 14, pp. 16889–16896. https://doi.org/10.1364/OE.22.016889
- Xia F., Zhang K., Li S., Yun M., Kong W., Zhang X., Liu Q. Simulation of the laser-induced oxidation process in fabricated Sn-MTMO grayscale photomasks. *OSA Continuum*, 2021, vol. 4, no. 1, pp. 65–71. https://doi.org/10.1364/OSAC.411797
- 44. Xia F., Zhang X., Wang M., Liu Q., Xu J.J. Analysis of the laser oxidation kinetics process of In-In2O3 MTMO photomasks by laser direct writing. *Optics Express*, 2015, vol. 23, no. 22, pp. 29193– 29201. https://doi.org/10.1364/OE.23.029193
- 45. Korolkov V.P., Nasyrov R.K., Sametov A.R., Malyshev A.I., Belousov D.A., Mikerin S.L., Kuts R.I. Direct laser writing of high-NA computer-generated holograms on metal films of the titanium group and chromium. *Proceedings of SPIE*, 2019, vol. 11188, pp. 111880R. https://doi.org/10.1117/12.2537269
- 46. Belousov D.A., Bronnikov K.A., Okotrub K.A., Mikerin S.L., Korolkov V.P., Terentyev V.S., Dostovalov A.V. Thermochemical Laser-Induced Periodic Surface Structures formation by femtosecond laser on Hf thin films in air and vacuum. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 21, pp. 6714. https://doi.org/10.3390/ma14216714
- 47. Korolkov V.P., Sedukhin A.G., Belousov D.A., Shimansky R.V., Khomutov V.N., Mikerin S.L., Spesivtsev E.V., Kutz, R.I. Increasing the spatial resolution of direct laser writing of diffractive structures on thin films of titanium group metals. *Proceedings of SPIE*, 2019, vol. 11030, pp. 110300A. https://doi.org/10.1117/12.2520978
- Ponkratova E.Y., Kuzmichev A.M., Rud D.A., Khubezhov S.A., Dolgintsev D.M., Ageev E.I., Veiko V.P., Sinev D.A., Zuev D.A. Nanosecond Laser-Assisted Fabrication of photocatalytically active TIO<sub>2</sub> nanocoatings: Implication in organic dyes degradation. ACS Applied Nano Materials, 2024, vol. 7, no. 16, pp. 19268–19278. https://doi.org/10.1021/acsanm.4c03155
- Kozlova E., Kotlyar V. Ultrashort laser pulse focusing by amplitude and phase zone plates. *Photonics*, 2022, vol. 9, no. 9, pp. 662. https:// doi.org/10.3390/photonics9090662
- Libenson M.N. Heating and destruction of thin films by quantum optical generator. *Fizika i himija obrabotki materialov*, 1968, no. 2, pp. 3–11. (in Russian)

#### Authors

Artem D. Pivovarov — Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, https://orcid.org/0009-0006-7911-7085, vvwvwv@bk.ru

Ekaterina V. Usynina — Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, https://orcid.org/0009-0001-3642-2913, kattyuus@gmail.com

**Dmitry A. Sinev** — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, **SC** 55547026700, https://orcid. org/0000-0002-6274-1491, sinev@itmo.ru

Received 27.08.2024 Approved after reviewing 17.12.2024 Accepted 23.01.2025

Работа доступна по лицензии Creative Commons «Attribution-NonCommercial»

Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2025, том 25, № 1 Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2025, vol. 25, no 1 **I/İTMO** 

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ январь-февраль 2025 Том 25 № 1 http://ntv.ifmo.ru/ SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS January-February 2025 Vol. 25 No 1 http://ntv.ifmo.ru/en/ ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКІ

# АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ И РОБОТОТЕХНИКА AUTOMATIC CONTROL AND ROBOTICS

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-33-41 УДК 519.71

# Алгоритмы прямого адаптивного управления линейной системой по выходу с конечным временем настройки Дмитрий Николаевич Герасимов<sup>1</sup>, Дмитрий Леонидович Подошкин<sup>2</sup>,

#### Владимир Олегович Никифоров<sup>3</sup>

1,2,3 Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

<sup>1</sup> dngerasimov@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0001-8306-4138

<sup>2</sup> dpodoshkin@itmo.ru<sup>,</sup>, https://orcid.org/0009-0000-5189-7696

<sup>3</sup> nikiforov\_vo@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0003-4860-5407

#### Аннотация

Введение. Рассмотрена задача прямого адаптивного управления с эталонной моделью линейными параметрически неопределенными системами с недоступным измерению вектором состояния. В целях адаптивной настройки параметров регулятора предлагается модификация градиентного алгоритма адаптации со сходимостью за конечное время. Модификация осуществляется путем периодического пересчета значений настраиваемых параметров с последующей подстановкой в качестве начальных условий на интеграторах стандартного градиентного алгоритма адаптации. Пересчет выполняется при обеспечении условия интервального возбуждения на основе предсказания динамики алгоритма адаптации, в результате точно идентифицируются параметры регулятора. Метод. Задача управления решается с помощью метода расширенной ошибки и метода непосредственной компенсации. Анализ замкнутой системы проводится на основе метода функций Ляпунова. Основные результаты. Предложена модификация градиентного алгоритма адаптации с ускоренной параметрической сходимостью за конечное время. Обсуждение. Модификация обеспечивает сходимость параметров при условии интервального возбуждения, которое является более слабым по отношению к условию неисчезающего возбуждения. Представленный алгоритм обладает чувствительностью к вариациям неизвестных параметров объекта и не требует в отличии от множества аналогичных решений повышения динамического порядка регулятора. Дополнительной особенностью нового алгоритма является возможность его использования в схемах как непрямого, так и прямого адаптивного управления.

#### Ключевые слова

адаптивное управление с эталонной моделью, алгоритм адаптации с конечным временем сходимости

Ссылка для цитирования: Герасимов Д.Н., Подошкин Д.Л., Никифоров В.О. Алгоритмы прямого адаптивного управления линейной системой по выходу с конечным временем настройки // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 1. С. 33–41. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-33-41

# Algorithms of direct output-feedback adaptive control of a linear system with finite time tuning

#### Dmitry N. Gerasimov<sup>1</sup>, Dmitry L. Podoshkin<sup>2⊠</sup>, Vladimir O. Nikiforov<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

<sup>1</sup> dngerasimov@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0001-8306-4138

<sup>2</sup> dpodoshkin@itmo.ru<sup>\[\]</sup>, https://orcid.org/0009-0000-5189-7696

<sup>3</sup> nikiforov vo@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0003-4860-5407

#### Abstract

A problem of direct model reference adaptive control of parametrically uncertain systems with inaccessible for measurement state is considered in this paper. With the purpose of adaptive tuning of the controller parameters, a modification of the gradient adaptation algorithm with finite time convergence is proposed. The modification is

© Герасимов Д.Н., Подошкин Д.Л., Никифоров В.О., 2025

implemented by periodic recalculation of the adjustable parameters and further their replacement in the integrators of the gradient adaptation algorithm. Preliminary calculation is accomplished under condition of interval excitation based on prediction of the adaptation algorithm dynamics; hence the controller parameters are identified precisely. The control problem is solved with the use of augmented error approach and certainty equivalence principle. Analysis of the closed-loop system is made using the Lyapunov functions method. The modification ensures parametric convergence under interval excitation condition which is weaker than the persistent excitation one, sensitive to variations of the unknown parameters, and, in comparison with the variety of analogous solutions, does not require the dynamic order increasing. The other distinguishing feature of the algorithm is opportunity of its use in schemes of both indirect and direct adaptation.

#### Keywords

model reference adaptive control, adaptation algorithm with finite time convergence

**For citation:** Gerasimov D.N., Podoshkin D.L., Nikiforov V.O. Algorithms of direct output-feedback adaptive control of a linear system with finite time tuning. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 1, pp. 33–41 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-33-41

#### Введение

Несмотря на то, что за последние десятилетия теория адаптивного управления получила существенное развитие, ряд вопросов, связанных с практической реализацией, остается открытым. В частности, существует необходимость в повышении быстродействия адаптивных систем за счет ускорения параметрической настройки закона управления. Как известно, основной проблемой большинства схем адаптации является зависимость скорости настройки параметров от условия неисчезающего возбуждения, которое на практике далеко не всегда выполнимо (особенно в задачах стабилизации). При этом для базового градиентного алгоритма адаптации (AA) вида  $\hat{\psi} = \gamma \phi \varepsilon [1, 2]$  даже при выполнении условия неисчезающего возбуждения скорость сходимости может быть произвольно медленной. С 60-х годов прошлого века предлагалось множество решений, основанных преимущественно на ускоренной идентификации параметров объекта с последующей подстановкой оценок параметров в закон управления. Например, Лайоном в работе [3] предложено решение, основанное на множественной фильтрации модели объекта с целью получения матрицы регрессора расширенной размерности, что позволило ускорить сходимость оценок параметров путем увеличения коэффициента адаптации. В [4] описан подход, в котором вместо множества фильтров использован один, позволяющий накапливать информацию о прошлом поведении регрессора и, как следствие, обеспечить ускорение сходимости. Альтернативные походы к обеспечению экспоненциальной параметрической сходимости в задачах адаптивного управления при выполнении условия неисчезающего возбуждения и основанные на использовании алгоритмов настройки, построенных по методу наименьших квадратов, приведены в [5-7].

Схема Лайона получила свое развитие в методе множественных моделей [8] (ее применение к рассматриваемой задаче адаптивного управления линейным объектом по выходу приведено в [9]) и в методе динамического расширения регрессора и смешивания (ДРРС) [10]. В методе ДРРС показано, что за счет множественной фильтрации и с последующим домножением на сопряженную матрицу регрессора можно получить ускоренную и поэлементную монотонную сходимость оценок при условии непринадлежности

регрессора пространству *L*<sub>2</sub> — условии более слабом, чем условие неисчезающего возбуждения.

Логическим развитием перечисленных методов стало появление алгоритмов адаптации, обладающих сходимостью за конечное и фиксированное (предписанное) время [11–18]. В [11–13] сходимость алгоритма за конечное время обеспечивается за счет физически реализуемой с помощью SVD-разложения (регуляризованной) инверсии грамиана регрессора

$$\int_{0}^{I} \phi(\tau) \phi^{T}(\tau) d\tau.$$

Одной из проблем рассмотренных подходов является возможное вырождение грамиана, особенно при невыполнении условия неисчезающего возбуждения. В [14, 15] предложен подход к построению АА с конечным и фиксированным временем сходимости на базе свойства однородности систем и использованием в алгоритмах дробных степеней и функций переключения. В работе [16] описан подход, позволяющий обеспечить фиксированное время сходимости алгоритма за счет растущего в бесконечность коэффициента адаптации, что с одной стороны позволяет говорить о качестве замкнутой системы, но с другой — ограничивает практическую применимость метода. В [17, 18], применительно к задаче адаптивного управления по выходу предложена модификация метода ДРРС, сходящаяся за конечное время при выполнении условия интервального возбуждения, также более слабого чем условие неисчезающего возбуждения. При этом в случае невыполнения условия интервального возбуждения алгоритм управления не способен выполнить предписанную цель. Особый класс алгоритмов настройки представляют так называемые конечно-сходящиеся и конечно-решающие алгоритмы решения рекуррентных неравенств, обеспечивающие достижение за конечное время заданных целевых условий (но, в общем случае, не параметрической сходимости) [19].

В настоящей работе в рамках решения задачи адаптивного управления линейным параметрически неопределенным объектом по выходу предлагается новый алгоритм адаптации простой структуры, лишенный указанных недостатков и инспирированный работами [17, 18]. В основе решения лежит градиентный алгоритм адаптации с обновлением начальных условий, которые пересчитываются на основе предсказания динамики этого алгоритма. Доказано, что новый алгоритм обеспечивает сходимость за конечное время как при выполнении условия неисчезающего возбуждения, так и более слабого условия интервального возбуждения. Если оба условия не выполняются, то алгоритм работает как градиентный и в задаче адаптивного управления сохраняет гарантированное свойство сходимости ошибки управления к нулю.

Введем следующие определения [1, 2].

Определение 1. Ограниченная вектор-функция  $\varphi(t)$ удовлетворяет условию неисчезающего возбуждения ( $\varphi \in PE$ ), если существуют константы  $\alpha$ , T > 0 что выполняется неравенство

$$\int_{t}^{t+T} \boldsymbol{\phi}(\tau) \boldsymbol{\phi}^{T}(\tau) d\tau \ge \alpha \mathbf{I} > 0 \text{ для всех } t > 0, \tag{1}$$

где I — единичная матрица.

Определение 2. Ограниченная вектор-функция  $\varphi(t)$  удовлетворяет условию интервального возбуждения ( $\varphi \in IE$ ), если существуют константы  $\alpha$ ,  $t_0$ , T > 0, что выполняется неравенство

$$\int_{t_0}^{t_0+T} \boldsymbol{\phi}(\tau) \boldsymbol{\phi}^T(\tau) d\tau \ge \alpha \mathbf{I} > 0, \qquad (2)$$

где I — единичная матрица.

Замечание 1. Согласно определениям 1 и 2

$$\alpha \in (0, T^2 || \mathbf{\varphi}(t) ||_{\infty}^2].$$

Постановка задачи

Рассмотрим объект управления

$$y = \frac{b(s)}{a(s)}[u] = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{s^n + a_{n-1} s^{n-1} + a_{n-2} s^{n-2} + \dots + a_0}[u], \quad (3)$$

где  $y \in \mathbb{R}$  — регулируемая переменная;  $u \in \mathbb{R}$  — сигнал управления;  $a_i, b_j \in (i \in 0, 1, ..., n - 1, j \in 0, 1, ..., m)$  — неизвестные постоянные коэффициенты полиномов a(s) и b(s).

Примем следующее допущение.

Допущение 1. Класс объектов (3) ограничен следующими условиями:

- Д1.1. Полиномы a(s) и b(s) не имеют общих корней;
- Д1.2. Значения *n* и *m* известны;
- Д1.3. Полином b(s) гурвицев;

Д1.4. Знак коэффициента  $b_m$  известен. Без потери общности будем полагать, что  $b_m \in \mathbb{R}_+$ . Известна величина  $\overline{b}_m : b_m \ge \overline{b}_m$ .

Допущение является стандартным в задачах адаптивного управления по выходу [1, 2].

Сформулируем цель поставленной задачи:

 выполнение синтеза алгоритма адаптивного управления, который обеспечивает ограниченность всех сигналов в замкнутой системе и выполнение целевого равенства

$$\lim_{t \to \infty} \varepsilon(t) = \lim_{t \to \infty} (y_m(t) - y(t)) = 0,$$

где <br/>  $\varepsilon(t)$  — ошибка управления;  $y_m(t)$  — выход эталонной модели

$$y_m = \frac{a_{m0}}{a_m(s)}[g] = \frac{a_{m0}}{s^p + a_{mp-1}s^{p-1} + a_{mp-1}s^{p-2} + \dots + a_{m0}}[g]$$

с гурвицевым полиномом  $a_m(s)$  порядка  $\rho = n - m$ , непрерывным и ограниченным сигналом задания *g*;

 обеспечение возможности ускорения параметрической настройки регулятора и, как следствие, ускорения сходимости ошибки управления к нулю.

#### Предварительные результаты

Для построения настраиваемого регулятора осуществим параметризацию объекта управления.

**Лемма 1 [1, 2, 20].** Введем в рассмотрение вспомогательные фильтры:

$$\dot{\mathbf{v}}_1 = \mathbf{\Lambda} \mathbf{v}_1 + \boldsymbol{\varsigma}_{n-1} u, \dot{\mathbf{v}}_2 = \mathbf{\Lambda} \mathbf{v}_2 + \boldsymbol{\varsigma}_{n-1} y,$$
(4)

где  $\mathbf{v}_1$ ,  $\mathbf{v}_2$  — векторы состояния фильтров;  $\boldsymbol{\varsigma}_{n-1} = [0 \cdots 0 \ 1]^T$ ;  $\boldsymbol{\Lambda}$  — произвольная гурвицева матрица, которая имеет вид

 $\boldsymbol{\Lambda} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 \\ -\lambda_0 & -\lambda_1 & \cdots & \cdots & -\lambda_{n-2} \end{bmatrix}.$ 

Тогда для ошибки управления є справедлива следующая параметризованная модель

$$\varepsilon = \frac{1}{a_m(s)} [a_{m0}g + \mathbf{\Theta}^T \mathbf{\omega} - b_m u] + \epsilon, \qquad (5)$$

где  $\boldsymbol{\omega} = [y, \mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2]^T - 2n - 1$ -мерный вектор, включающий векторы  $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$  состояния фильтров;  $\boldsymbol{\theta} \in R^{2n-1}$  — вектор неизвестных параметров;  $\epsilon(t)$  — экспоненциально затухающая функция, вызванная ненулевыми начальными условиями.

Замечание 2. Наличие экспоненциально затухающего сигнала  $\epsilon(t)$  не влияет на устойчивость замкнутой адаптивной системы [1, 2, 21], однако влияет на скорость настройки параметров. Для упрощения изложения основного результата настоящей работы, гарантирующего сходимость параметров регулятора за конечное время, предположим, что  $\epsilon(t) \equiv 0$  (что справедливо, например, после момента времени, когда  $\epsilon(t)$  примет пренебрежимо малое в сравнении с вычислительной точностью системы управления значение).

На основе выражения (5) выберем настраиваемый закон управления

$$u = \frac{1}{\hat{b}_m} (\hat{\mathbf{\theta}}^T \mathbf{\omega} + a_{m0} g), \tag{6}$$

где  $\hat{\mathbf{\theta}} \in \mathbb{R}^{2n-1}$  и  $\hat{b}_m \in \mathbb{R}$  — настраиваемые параметры, соответствующие вектору  $\mathbf{\theta}$  и постоянной  $b_m$ .

Подставляя (6) в (5) (исключая  $\epsilon$  согласно замечанию 2), после простейших преобразований, получим модель ошибки управления

$$\varepsilon = \frac{1}{a_m(s)} [\tilde{\mathbf{\Theta}}^T \boldsymbol{\omega} - \tilde{b}_m \boldsymbol{u}], \tag{7}$$

где  $\tilde{\mathbf{\theta}} = \mathbf{\theta} - \hat{\mathbf{\theta}} - 2n-1$ -мерный вектор параметрических ошибок;  $\tilde{b}_m = b_m - \hat{b}_m$  — параметрическая ошибка.

Введем в рассмотрение расширенную ошибку [1, 2, 20]

$$\hat{\mathbf{\varepsilon}} = \boldsymbol{\varepsilon} - \hat{\mathbf{\theta}}^T \overline{\mathbf{\omega}} + \hat{b}_m \overline{u}$$

или

$$\hat{\varepsilon} = \varepsilon - \hat{\psi}^T \overline{\phi}, \qquad (8)$$

где  $\hat{\psi} = [\hat{\theta}^T, \hat{b}_m]^T$  — агрегированный 2*n*-мерный вектор настраиваемых параметров, соответствующих вектору  $\psi = [\theta^T, b_m]^T; \, \overline{\phi} = [\overline{\omega}, -\overline{u}]$  — расширенный регрессор, состоящий из элементов

$$\overline{\boldsymbol{\omega}} = \frac{1}{a_m(s)} [\boldsymbol{\omega}], \ \overline{\boldsymbol{u}} = \frac{1}{a_m(s)} [\boldsymbol{u}].$$

После подстановки (6) в (7) получаем статическую модель ошибки

$$\hat{\varepsilon} = \tilde{\Psi}^T \overline{\varphi},\tag{9}$$

где  $\tilde{\psi} = \psi - \hat{\psi}$  — вектор параметрических ошибок. Модель (8) позволяет синтезировать широкий спектр физически реализуемых алгоритмов адаптации, допускающих представление [20, 21]

$$\dot{\hat{\Psi}} = \gamma \mathbf{F}(\varepsilon, \hat{\Psi}, t) \tilde{\Psi}, \tag{10}$$

где  $\gamma \in \mathbb{R}_+$  — коэффициент адаптации;  $\mathbf{F}(\varepsilon, \hat{\mathbf{\psi}}, t) \in \mathbb{R}^{2n \times 2n}$  — физически реализуемая ограниченная по *t* положительно полуопределенная матричная функция, структура которой задает свойства алгоритму адаптации. Так функции  $\mathbf{F}(t) = \overline{\mathbf{\phi}}(t)\overline{\mathbf{\phi}}^T/(1 + \overline{\mathbf{\phi}}^T(t) \overline{\mathbf{\phi}}(t))$  соответствует градиентный алгоритм адаптации с нормированием

$$\dot{\hat{\Psi}} = \gamma \frac{\overline{\varphi}}{1 + \overline{\varphi}^T \overline{\varphi}} \hat{\varepsilon}, \ \hat{\Psi}(0) \ (\hat{\Psi}_{2n}(0) \ge \overline{b}_m), \tag{11}$$

где коэффициент адаптации у определяется с учетом оператора проекции [1, 18] как

$$\gamma = \begin{cases} \gamma_0 \mathbf{I}_{2n}, & \text{если } \hat{b}_m \ge \overline{b}_m, \\ \gamma_0 (\mathbf{I}_{2n} - \varsigma_{2n} \varsigma_{2n}^T), & \text{если } \hat{b}_m < \overline{b}_m, \end{cases}$$
(12)

где  $\gamma_0 \in \mathbb{R}_+$  — константа;  $\varsigma_{2n} = [0, 0, ..., 0, 1]^T$  — координатный вектор размерности 2n;  $\mathbf{I}_{2n}$  — единичная матрица размерности 2n.

Замечание 3. Форма записи выражения (10) охватывает широкий спектр алгоритмов адаптации, в том числе алгоритмов с ускоренной параметрической сходимостью [3, 4, 22].

Оператор проекции необходим для предотвращения деления на нуль в выражении (6) и в соответствии со вторым выражением системы уравнений (12) «предотвращает» попадание  $\hat{\psi}_{2n} = \hat{b}_m$  в область  $\hat{\psi}_{2n}(t) < \langle \hat{b}_m$ . После подстановки (9) в (11) с учетом равенства  $\dot{\tilde{\psi}} = -\dot{\tilde{\psi}}$  формируется модель параметрических ошибок

$$\dot{\tilde{\Psi}} = -\gamma \frac{\overline{\Phi} \,\overline{\Phi}^T}{1 + \overline{\Phi}^T \overline{\Phi}} \tilde{\Psi},\tag{13}$$

которая позволяет проанализировать свойства алгоритма.

Для адаптивной системы управления, замкнутой AA (11), (12) справедливо следующее утверждение.

Утверждение 1 [1, 2]. Алгоритм управления (6) совместно с фильтрами (4), расширенной ошибкой (8) и алгоритмом адаптации (11), (12) обеспечивает следующие свойства замкнутой системы:

Y1.1. y, u, ε, ε̂, ψ, ψ̂ ∈ L<sub>∞</sub>;

У1.2.  $\varepsilon(t) \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow \infty$ ;

У1.3. Если  $\overline{\boldsymbol{\omega}} \in PE$ , то  $\tilde{\boldsymbol{\theta}}(t) = \boldsymbol{\theta} - \hat{\boldsymbol{\theta}}(t) \rightarrow 0$  экспоненциально при  $t \rightarrow \infty$ , и существует оптимальное значение коэффициента  $\gamma_0$ , при котором скорость сходимости  $\tilde{\boldsymbol{\theta}}(t) \rightarrow 0$  максимальна.

Свойство У1.3 отражает существенный недостаток алгоритма адаптации (11), (12), который заключается в том, что даже при экспоненциальной сходимости скорость автонастройки параметров регулятора может быть произвольно медленной и не может быть увеличена за счет повышения коэффициента адаптации. Выполним модификацию алгоритма (11), (12), обеспечивающую за счет предсказания динамики модели параметрических ошибок (13) настройку параметров регулятора за конечное время. Новый алгоритм позволит обеспечить и ускорить сходимость  $\tilde{\Psi}(t) \rightarrow 0$  (отметим, что свойство У1.3 исходного алгоритма адаптации предполагает настройку только по  $\hat{\theta}(t)$ ) и ослабить условие неисчезающего возбуждения (1) до условия интервального возбуждения (2).

#### Основной результат

Решение дифференциального уравнения (13) может быть представлено в виде:

$$\dot{\boldsymbol{\psi}}(t) = \boldsymbol{\Phi}(t) \boldsymbol{\psi}(0), \tag{14}$$

где  $\Phi(t) \in \mathbb{R}^{2n \times 2n}$  — фундаментальная матрица, которая является решением дифференциального уравнения

$$\dot{\mathbf{\Phi}} = -\gamma \frac{\overline{\mathbf{\phi}} \,\overline{\mathbf{\phi}}^T}{1 + \overline{\mathbf{\phi}}^T \overline{\mathbf{\phi}}} \mathbf{\Phi}, \, \mathbf{\Phi}(0) = \mathbf{I}_{2n}.$$

Если ( $I_{2n} - \Phi(t)$ )<sup>-1</sup>  $\neq 0$ , выражение (14) позволяет рассчитать точное значение вектора  $\psi$  в виде:

$$\boldsymbol{\Psi} = (\mathbf{I}_{2n} - \boldsymbol{\Phi}(t))^{-1}(\hat{\boldsymbol{\Psi}}(t) - \boldsymbol{\Phi}(t)\hat{\boldsymbol{\Psi}}(0)), \quad (15)$$

где оценка  $\hat{\psi}$  генерируется алгоритмом адаптации (10).

Матричная функция  $(\mathbf{I}_{2n} - \mathbf{\Phi}(t))^{-1}$  является вырожденной в начальный момент времени t = 0, когда  $\mathbf{\Phi}(0) = \mathbf{I}_{2n}$ , а ее дальнейшее поведение зависит от частотного богатства сигнала  $\overline{\mathbf{\phi}}(t)$ . Для получения физически реализуемого АА с конечной сходимостью предлагается производить сброс и перерасчет начальных условий в соответствии с (15) на интеграторе алгоритма адаптации (11) в моменты времени, когда детерминант матрицы  $\mathbf{I}_{2n} - \mathbf{\Phi}(t)$  превышает предварительно
заданный порог. В этом случае форма алгоритма (11) принимает вид

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{\psi}}}(t_i) = \gamma(t_i) \frac{\boldsymbol{\varphi}(t_i)}{1 + \overline{\boldsymbol{\varphi}}^T(t_i)\overline{\boldsymbol{\varphi}}(t_i)} \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}(t_i), 
t_i \in [\tau_{i-1}, \tau_i), i = 1, 2, 3, ...,$$
(16)

$$\dot{\mathbf{\Phi}}(t_i) = -\gamma(t_i) \frac{\overline{\mathbf{\phi}}(t_i) \overline{\mathbf{\phi}}^T(t_i)}{1 + \overline{\mathbf{\phi}}^T(t_i) \overline{\mathbf{\phi}}(t_i)} \mathbf{\Phi}(t_i),$$
(17)

в котором начальные условия обновляются согласно выражениям

$$\hat{\boldsymbol{\psi}}(\tau_{i+}) = (\mathbf{I}_{2n} - \boldsymbol{\Phi}(\tau_{i-}))^{-1} (\hat{\boldsymbol{\psi}}(\tau_{i-}) - \boldsymbol{\Phi}(\tau_{i-}) \hat{\boldsymbol{\psi}}(\tau_{i-1+})), (18)$$

$$\Phi(\tau_{i+}) = \mathbf{I}_{2n},\tag{19}$$

где

$$\tau_i : \delta(\tau_{i-}) = \mu, \tag{20}$$

 $\delta(t) = \det(\mathbf{I}_{2n} - \mathbf{\Phi}(t)); \mu \in (0, 1)$  — постоянный параметр, предварительно заданное пороговое значение  $\delta(t); f(\tau_{i-})$  и  $f(\tau_{i+})$  — значения функции f(t), определяемые левосторонним и правосторонним пределами

$$f(\tau_{i-}) = \lim_{t \to \tau_{i-}} f(t), f(\tau_{i+}) = \lim_{t \to \tau_{i+}} f(t).$$

Отметим, что в момент времени (20) обновления начальных условий в алгоритме адаптации (16), матрица  $(\mathbf{I}_{2n} - \mathbf{\Phi}(\tau_{i-}))^{-1}$  не является вырожденной, что говорит о физической реализуемости алгоритма адаптации.

В целях анализа свойств замкнутой системы и определения момента времени (20) сформулируем техническую лемму.

Лемма 2. Функция  $\delta(t)$  обладает следующими свойствами:

Л2.1. Если  $\exists t_0 \ge 0$ :  $\overline{\mathbf{\varphi}} \in PE$  и  $\hat{b}_m(t) \ge b_m$  при  $t \in [t_0, \infty)$ , то  $\forall \widetilde{\mathbf{\psi}}(t_0) \| \widetilde{\mathbf{\psi}}(t) \| \to 0$  и  $\delta(t) \to 1$  при  $t \to \infty$ ;

Л2.2. Если  $\exists t_0 \ge 0$ :  $\overline{\mathbf{\phi}} \in IE$  и  $\hat{b}_m(t) \ge \overline{b}_m$  при  $t \in [t_0, t_0 + T]$ , то  $\forall \tilde{\mathbf{\psi}}(t_0) \| \tilde{\mathbf{\psi}}(t) \| < \| \tilde{\mathbf{\psi}}(t_0) \|$ , и существует такая (возможно сколь угодно малая) константа  $\mu \in (0, 1)$ , что  $\delta(t) \ge \mu$ .

Доказательство. Так как  $\hat{b}_m(t) \ge \bar{b}_m$ , то коэффициент адаптации согласно (12) определяется константой  $\gamma_0$ . В этом случае согласно доказательству, приведенному в [2, теорема 2.16] можно показать, что для функции Ляпунова  $V = \tilde{\psi}^T \tilde{\psi}/2\gamma_0$  справедливо неравенство

где

$$V(t+T) \le \kappa V(t), \tag{21}$$

$$\kappa = 1 - \frac{2\gamma_0 \alpha}{1 + \gamma_0^2 T^4 ||\overline{\varphi}_n(t)||_{\infty}^4},$$
$$||\overline{\varphi}_n(t)||_{\infty} = \left\| \frac{\overline{\varphi}(t)}{\sqrt{1 + \overline{\varphi}^T(t)\overline{\varphi}(t)}} \right\|_{\infty} = 1$$

константы T > 0,  $\alpha \in (0, T^2)$  (согласно замечанию 1 с учетом новых обозначений) характеризуют условие неисчезающего возбуждения (см. Определение 1). Так как  $\kappa \in (0, 1)$ , то из (21) следует, что  $\|\tilde{\Psi}(t)\| \to 0$ ,  $\|\Phi(t)\| \to 0, \, \delta(t) \to 1$  экспоненциально при  $t \to \infty$ , если  $\overline{\varphi} \in PE$ . Свойство Л2.1 доказано.

Для доказательства свойства Л2.2 используем (21), в котором время *t* фиксировано константой  $t_0$  из определения 2. Тогда, если  $\overline{\mathbf{\varphi}} \in PE$ , то справедливо неравенство

$$V(t_0 + T) \le \kappa V(t_0) < V(t_0).$$
 (22)

Из неравенств (21) и (22) с учетом определения Vимеем

$$\|\widetilde{\boldsymbol{\psi}}(t+T)\|^{2} \leq \|\widetilde{\boldsymbol{\psi}}(t_{0}+T)\|^{2} \leq \kappa \|\widetilde{\boldsymbol{\psi}}(t_{0})\|^{2} \leq \|\widetilde{\boldsymbol{\psi}}(t_{0})\|^{2},$$
$$t \geq t_{0}, \, \overline{\boldsymbol{\varphi}} \in IE.$$
(23)

Далее проанализируем с учетом (23) следующую квадратичную форму:

$$\begin{split} \tilde{\Psi}^{T}(t_{0})(\mathbf{I}_{2n} - \Phi(t+T))\tilde{\Psi}(t_{0}) &= \\ &= \|\tilde{\Psi}(t_{0})\|^{2} - \tilde{\Psi}^{T}(t_{0})\tilde{\Psi}(t+T) \geq \\ &\geq \|\tilde{\Psi}(t_{0})\|^{2} - \|\tilde{\Psi}(t+T)\| \|\tilde{\Psi}(t_{0})\| \geq (1 - \sqrt{\kappa})\|\tilde{\Psi}(t_{0})\|^{2}. \end{split}$$
(24)

Из неравенства (24) следует, что так как к  $\in$  (0, 1), то при  $t \ge t_0 + T$  и  $\overline{\phi} \in IE$  матрица  $\mathbf{I}_{2n} - \Phi(t)$  положительно определена. Свойство Л2.2 и лемма доказаны.

Условия леммы 2 позволяют найти точные оценки неизвестных параметров  $\psi$  с помощью (15) и впоследствии производить обновление начальных условий на интеграторе алгоритма адаптации.

Сформулируем основной результат настоящей работы.

Утверждение 2. Алгоритм управления (6) совместно с фильтрами (4), расширенной ошибкой (8) и алгоритмом адаптации (16)–(20) с коэффициентом адаптации (12) обеспечивает свойства У1.1–У1.3 и дополнительно:

У2.1. Если  $\hat{b}_m(t) \ge \overline{b}_m$  и  $\overline{\varphi} \in PE$  при  $t \in [t_0, \infty)$ , то  $\forall \mu \in (0, 1)$ , где  $\mu$ — пороговое значение (20),  $\exists t_f \ge t_0$ :  $\delta(t) = \det(\mathbf{I}_{2n} - \mathbf{\Phi}(t)) \ge \mu$ ,  $\tilde{\psi}(t) \to 0$  за конечное время  $t_f$ , и существует оптимальное значение коэффициента  $\gamma_0$ , при котором  $t_f$  принимает наименьшее значение;

У2.2. Если  $\hat{b}_m(t) \ge b_m$  и  $\overline{\mathbf{\phi}} \in IE$  при  $t \in [t_0, t_0 + T]$ , то  $\exists t_f \ge t_0, \mu \in (0, 1): \delta(t) = \det(\mathbf{I}_{2n} - \mathbf{\Phi}(t)) \ge \mu, \tilde{\mathbf{\psi}}(t) \to 0$  за конечное время  $t_f$ , и существует оптимальное значение коэффициента  $\gamma_0$ , при котором  $t_f$  принимает наименьшее значение.

Доказательство. Доказательство утверждения 2 базируется на результатах леммы 2. Из свойства Л2.1 следует, что, так как  $\delta(t) \rightarrow 1$  при  $t \rightarrow \infty$ , то согласно свойству У2.1  $\forall \mu \in (0, 1)$  функция  $\delta(t)$ , меняясь от нуля до единицы, преодолеет порог  $\mu$  в указанном диапазоне в некоторый момент времени  $t_f$ . Из свойства Л2.2 и неравенства (24) следует, что  $\delta(t)$  меняется от нуля до некоторого (возможно сколь угодно малого) постоянного положительного значения. Отсюда следует существование порога  $\mu \in (0, 1) : \delta(t_f) = \mu$ .

Доказательство наличия оптимального значения коэффициента  $\gamma_0$  следует напрямую из свойств алгоритма адаптации (11), (12) [2, 3] (на базе которого построен алгоритм адаптации (16)–(20)) и анализа функции  $\kappa(\gamma_0) = \frac{2\gamma_0 \alpha}{\alpha}$ 

$$= 1 - \frac{1}{1 + \gamma_0^2 T^4}.$$

Замечание 4. Важно отметить, что свойство У2.2 гарантирует параметрическую сходимость градиентного алгоритма при более слабом условии интервального возбуждения (2). При этом факт существования порога µ дает возможность эмпирически определить это значение из диапазона (0, 1).

# Моделирование

Рассмотрим задачу управления объектом второго порядка

$$y = \frac{b_0}{s^2 + a_1 s + a_0} [u]$$

с неизвестными параметрами  $b_0$ ,  $a_0$ ,  $a_1$  и эталонной моделью

$$y_m = \frac{6}{s^2 + 5s + 6}[g]$$

с сигналом задания

$$g(t) = \sin(t) + 2.$$

В соответствии с динамическим порядком объекта количество настраиваемых параметров регулятора (размерность вектора  $\hat{\psi}$ ) равно 2n = 4. Для обеспечения сходимости  $\tilde{\psi}(t) = \psi - \hat{\psi}(t) \rightarrow 0$  и выполнения условия неисчезающего возбуждения средствами стандартного градиентного АА требуется частотно богатый сигнал задания, содержащий как минимум две гармоники. Очевидно, что ввиду выбранного g(t) условие неисчезающего возбуждения не выполняется, но за счет наличия переходных процессов в системе гарантировано более слабое условие интервального возбуждения, которое позволяет обеспечить параметрическую сходимость регулятора согласно свойству Л2.2. Выполнение условия неисчезающего возбуждения показано на рис. 1 для  $\mu = 10^{-5}$ , выбранного согласно замечанию 4.

В целях моделирования объекта используем параметры  $b_0 = 5$ ,  $a_0 = 0$ ,  $a_1 = 3$ . Для реализации закона управления (6) с фильтрами (4), расширенной ошибкой (8) и алгоритмом адаптации (16)–(20) с коэффициентом адаптации (12) выберем следующие параметры:  $\Lambda = -1$ ,  $\overline{b}_0 = 0,01$ ,  $\gamma_0 = 1000$ ,  $\hat{\psi}(0) = [0, 0, 0, 1]^T$ . Все начальные условия на интеграторах (кроме  $\hat{\psi}(0)$ ) приняты нулевыми.











*Рис. 3.* Переходные процессы в системе, замкнутой градиентным алгоритмом адаптации (16)–(20), (12) с конечным временем настройки регулятора

*Fig. 3.* Transient processes in system with gradient-based adaptation law (16)–(20), (12) and finite-time convergence rate of the controller parameters

На рис. 2 и 3 приведены результаты моделирования систем, замкнутых базовым алгоритмом адаптации (11), (12) без обновления параметров и алгоритм адаптации (16)–(20), (12) с обновлением параметров и сходимостью за конечное время. Из результатов видно, что в отличии от алгоритма (11), (12) алгоритм (16)–(20), (12) обеспечивает в замкнутой системе точную и быструю настройку параметров регулятора за счет своевременного обновления начальных условий на интеграторе.

Из рис. 1 и 3 виден момент времени обновления параметров  $\hat{\psi}(t)$ , равный  $\tau_1 = 1,66$  с, после которого алгоритм управления обеспечил ускоренную сходимость ошибки  $\varepsilon(t)$  к нулю. Как показало моделирование, в системе управления происходит еще одно обновление параметров в момент  $\tau_2 = 56,9$  с (рис. 1), после которого обновлений не происходит, что объясняется невыполнением условия интервального возбуждения (2) при  $t_0 > \tau_2$  и вырождением матрицы  $I_4 - \Phi(t)$ .

## Литература

- 1. Ioannou P.A., Sun J. Robust Adaptive Control. NJ: Prentice-Hall, 1996. 825 p.
- Narendra K.S., Annaswamy A.M. Stable Adaptive Systems. NJ: Prentice Hall, 1989. 494 p.
- Lion P. M. Rapid identification of linear and nonlinear systems // AIAA Journal. 1967. V. 5. N 10. P. 1835–1842. https://doi. org/10.2514/3.4313
- Kreisselmeier G. Adaptive observers with exponential rate of convergence // IEEE Transactions on Automatic Control. 1977. V. 22. N 1. P. 2–8. https://doi.org/10.1109/TAC.1977.1101401

## Заключение

В работе предложен алгоритм прямого адаптивного управления линейными параметрически неопределенными системами по выходу. Для улучшения качества работы замкнутой системы разработан алгоритм адаптации, обеспечивающий ускоренную настройку параметров регулятора за конечное время без использования в системе больших или бесконечных коэффициентов усиления. Новый алгоритм адаптации синтезирован на базе градиентного алгоритма адаптации, в котором производится своевременное обновление начальных условий, полученных с помощью предсказания динамики градиентного алгоритма, и который может сходиться за конечное время даже при невыполнении условия неисчезающего возбуждения.

#### References

- Ioannou P.A., Sun J. Robust Adaptive Control. NJ: Prentice-Hall, 1996. 825 p.
- Narendra K.S., Annaswamy A.M. Stable Adaptive Systems. NJ: Prentice Hall, 1989. 494 p.
- Lion P. M. Rapid identification of linear and nonlinear systems. *AIAA Journal*, 1967, vol. 5, no. 10, pp. 1835–1842. https://doi.org/10.2514/3.4313
- Kreisselmeier G. Adaptive observers with exponential rate of convergence. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1977, vol. 22. no. 1. pp. 2–8. https://doi.org/10.1109/TAC.1977.1101401

- Andrievsky B.R., Fradkov A.L., Stotsky A.A. Shunt Compensation for Indirect Sliding-Mode Adaptive Control // IFAC Proceedings Volumes. 1996. V. 29. N 1. P. 5132–5137. https://doi.org/10.1016/ S1474-6670(17)58495-5
- Fradkov A., Andrievsky B., Combined adaptive controller for UAV guidance // European Journal of Control. 2005. V. 11. N 1. P. 71–79. https://doi.org/10.3166/ejc.11.71-79
- de Mathelin M., Lozano R. Robust adaptive identification of slowly time-varying parameters with bounded disturbances // Automatica. 1999. V. 35. N 7. P. 1291–1305. https://doi.org/10.1016/ S0005-1098(99)00026-6
- Narendra K.S., Han Z. A new approach to adaptive control using multiple models // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. 2012. V. 26. N 8. P. 778–799. https://doi. org/10.1002/acs.2269
- Герасимов Д.Н., Кошелев К.П., Беляев М.Е., Никифоров В.О. Алгоритм адаптивного управления по выходу линейной системой с улучшенной параметрической сходимостью // Научнотехнический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 5. С. 771–779. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2018-18-5-771-779
- Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkin A. Performance enhancement of parameter estimators via dynamic regressor extension and mixing // IEEE Transactions on Automatic Control. 2017. V. 62. N 7. P. 3546–3550. https://doi.org/10.1109/TAC.2016.2614889
- Krause J., Khargonekar P. Parameter information content of measurable signals in direct adaptive control // IEEE Transactions on Automatic Control. 1987. V. 32. N 9. P. 802–810. https://doi. org/10.1109/TAC.1987.1104722
- Ortega R. An on-line least-squares parameter estimator with finite convergence time // Proceedings of the IEEE. 1988. V. 76. N 7. P. 847–848. https://doi.org/10.1109/5.7153
- Adetola V., Guay M. Finite-time parameter estimation in adaptive control of nonlinear systems // IEEE Transactions on Automatic Control. 2008. V. 53. N 3. P. 807–811. https://doi.org/10.1109/ TAC.2008.919568
- Rios H., Efimov D., Moreno J. A., Perruquetti W., Rueda-Escobedo J. G. Time-Varying Parameter Identification Algorithms: Finite and Fixed-Time Convergence // IEEE Transactions on Automatic Control. 2017. V. 62. N 7. P. 3671–3678. https://doi. org/10.1109/TAC.2017.2673413
- Wang J., Efimov D., Aranovskiy S., Bobtsov A. Fixed-time estimation of parameters for non-persistent excitation // European Journal of Control. 2020. V. 55. P. 24–32. https://doi.org/10.1016/j. ejcon.2019.07.005
- Holloway J., Krstic M. Prescribed-time output feedback for linear systems in controllable canonical form // Automatica. 2019. V. 107. P. 77–85. https://doi.org/10.1016/j.automatica.2019.05.027
- Ortega R., Gerasimov D.N., Barabanov N.E., Nikiforov V.O. Adaptive control of linear multivariable systems using dynamic regressor extension and mixing estimators: removing the high-frequency gain assumptions // Automatica. 2019. V. 110. P. 108589. https://doi. org/10.1016/j.automatica.2019.108589
- Gerasimov D.N., Ortega R., Nikiforov V.O. Adaptive control of multivariable systems with reduced knowledge of high frequency gain: application of dynamic regressor extension and mixing estimators // IFAC-PapersOnLine. 2018. V. 51. N 15. P. 886–890. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.108
- Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Якубович В.А. Адаптивное управление динамическими объектами. М.: Наука, 1981. 447 с.
- Monopoli R. V. Model reference adaptive control with an augmented error signal // IEEE Transactions on Automatic Control. 1974. V. 19. N 5. P. 474–484. https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100670
- Nikiforov V.O., Gerasimov D.N. Adaptive Regulation: Reference Tracking and Disturbance Rejection. Springer-Verlag, 2022. 358 p. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96091-9
- 22. Ortega R., Nikiforov V., Gerasimov D. On modified parameter estimators for identification and adaptive control. A unified framework and some new schemes // Annual Reviews in Control. 2020. V. 50. P. 278–293. https://doi.org/10.1016/j. arcontrol.2020.06.002

- Andrievsky B.R., Fradkov A.L., Stotsky A.A. Shunt Compensation for Indirect Sliding-Mode Adaptive Control. *IFAC Proceedings Volumes*, 1996, vol. 29, no. 1, pp. 5132–5137. https://doi.org/10.1016/ S1474-6670(17)58495-5
- Fradkov A., Andrievsky B., Combined adaptive controller for UAV guidance. *European Journal of Control*, 2005, vol. 11, no. 1, pp. 71– 79. https://doi.org/10.3166/ejc.11.71-79
- de Mathelin M., Lozano R. Robust adaptive identification of slowly time-varying parameters with bounded disturbances. *Automatica*, 1999, vol. 35, no. 7, pp. 1291–1305. https://doi. org/10.1016/S0005-1098(99)00026-6
- Narendra K.S., Han Z. A new approach to adaptive control using multiple models. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2012, vol. 26, no. 8, pp. 778–799. https://doi. org/10.1002/acs.2269
- Gerasimov D.N., Koshelev K.P., Belyaev M.E., Nikiforov V.O. Algorithm of adaptive output control of linear system with improved parametric convergence. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 5, pp. 771–779 (in Russian). https://doi.org/10.17586/2226-1494-2018-18-5-771-779
- Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkin A. Performance enhancement of parameter estimators via dynamic regressor extension and mixing. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, vol. 62, no. 7, pp. 3546–3550. https://doi.org/10.1109/TAC.2016.2614889
- Krause J., Khargonekar P. Parameter information content of measurable signals in direct adaptive control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1987, vol. 32, no. 9, pp. 802–810. https://doi. org/10.1109/TAC.1987.1104722
- Ortega R. An on-line least-squares parameter estimator with finite convergence time. *Proceedings of the IEEE*, 1988, vol. 76, no. 7, pp. 847–848. https://doi.org/10.1109/5.7153
- Adetola V., Guay M. Finite-time parameter estimation in adaptive control of nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, vol. 53, no. 3, pp. 807–811. https://doi.org/10.1109/ TAC.2008.919568
- Rios H., Efimov D., Moreno J. A., Perruquetti W., Rueda-Escobedo J. G. Time-Varying Parameter Identification Algorithms: Finite and Fixed-Time Convergence. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, vol. 62, no. 7, pp. 3671–3678. https://doi.org/10.1109/ TAC.2017.2673413
- Wang J., Efimov D., Aranovskiy S., Bobtsov A. Fixed-time estimation of parameters for non-persistent excitation. *European Journal of Control*, 2020, vol. 55, pp. 24–32. https://doi.org/10.1016/j. ejcon.2019.07.005
- Holloway J., Krstic M. Prescribed-time output feedback for linear systems in controllable canonical form. *Automatica*, 2019, vol. 107, pp. 77–85. https://doi.org/10.1016/j.automatica.2019.05.027
- Ortega R., Gerasimov D.N., Barabanov N.E., Nikiforov V.O. Adaptive control of linear multivariable systems using dynamic regressor extension and mixing estimators: removing the high-frequency gain assumptions. *Automatica*, 2019, vol. 110, pp. 108589. https://doi. org/10.1016/j.automatica.2019.108589
- Gerasimov D.N., Ortega R., Nikiforov V.O. Adaptive control of multivariable systems with reduced knowledge of high frequency gain: application of dynamic regressor extension and mixing estimators. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, vol. 51, no. 15, pp. 886–890. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.108
- Fomin V.N., Fradkov A.L., Iakubovich V.A. Adaptive control of dynamic objects. Moscow, Nauka Publ., 1981, 447 p.
- Monopoli R. V. Model reference adaptive control with an augmented error signal. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1974, vol. 19, no. 5, pp. 474–484. https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100670
- Nikiforov V.O., Gerasimov D.N. Adaptive Regulation: Reference Tracking and Disturbance Rejection. Springer-Verlag, 2022, 358 p. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96091-9
- Ortega R., Nikiforov V., Gerasimov D. On modified parameter estimators for identification and adaptive control. A unified framework and some new schemes. *Annual Reviews in Control*, 2020, vol. 50, pp. 278–293. https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2020.06.002

#### Авторы

**Dmitry N. Gerasimov** — PhD, Associate Professor, Associate Professor, Senior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, sc 36637147000, https://orcid.org/0000-0001-8306-4138, dngerasimov@itmo.ru

Dmitry L. Podoshkin — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, 58853949900, https://orcid.org/0009-0000-5189-7696, dpodoshkin@itmo.ru

Vladimir O. Nikiforov — D.Sc., Professor, Vice-Rector for Scientific Affairs, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 7103218872, https://orcid.org/0000-0003-4860-5407, nikiforov\_vo@ itmo.ru

Статья поступила в редакцию 03.11.2024 Одобрена после рецензирования 09.12.2024 Принята к печати 22.01.2025

# Authors

Герасимов Дмитрий Николаевич — кандидат технических наук, доцент, доцент, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, вс 36637147000, https://orcid.org/0000-0001-8306-4138, dngerasimov@itmo.ru Подошкин Дмитрий Леонидович — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, вс 58853949900, https://orcid.org/0009-0000-5189-7696, dpodoshkin@itmo.ru

Никифоров Владимир Олегович — доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, sc 7103218872, https:// orcid.org/0000-0003-4860-5407, nikiforov\_vo@itmo.ru

Received 03.11.2024 Approved after reviewing 09.12.2024 Accepted 22.01.2025



Работа доступна по лицензии Creative Commons «Attribution-NonCommercial» **I/İTMO** 

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ январь-февраль 2025 Том 25 № 1 http://ntv.ifmo.ru/ SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS January-February 2025 Vol. 25 No 1 http://ntv.ifmo.ru/en/ ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

# КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СОМРИТЕВ SCIENCE

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-42-52 УДК 004.056 университет итмо

# Большие языковые модели в информационной безопасности и тестировании на проникновение: систематический обзор возможностей применения Антон Александрович Конев<sup>1</sup>⊠, Татьяна Игоревна Паюсова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, 634050, Российская Федерация

<sup>2</sup> Тюменский государственный университет, Тюмень, 625003, Российская Федерация

<sup>1</sup> kaa@fb.tusur.ru<sup>\boxdot</sup>, https://orcid.org/0000-0002-3222-9956

<sup>2</sup> t.i.payusova@utmn.ru, https://orcid.org/0000-0003-4923-1689

#### Аннотация

Введение. Развитие технологий искусственного интеллекта, в частности, больших языковых моделей (Large Learning Model, LLM), привело к изменениям во многих сферах жизни и деятельности человека. Информационная безопасность также претерпела существенные изменения. Тестирование на проникновение (пентест) позволяет оценить систему защиты на практике в «боевых» условиях. LLM могут вывести практический анализ защищенности на качественно новый уровень с точки зрения автоматизации и возможности генерации нестандартных шаблонов атаки. Представленный в работе систематический обзор направлен на определение уже известных способов применения LLM в кибербезопасности, а также на выявление «белых пятен» в развитии технологии. Метод. Отбор исследуемых научных работ осуществлялся в соответствии с многоступенчатым руководством PRISMA на основании анализа аннотаций и ключевых слов публикаций. Полученная выборка была дополнена с помощью метода «снежного кома» и ручного поиска статей. Суммарное количество публикаций составило 50 работ с января 2023 г. по март 2024 г. Основные результаты. В работе выполнен анализ способов применения LLM в области информационной безопасности (поддержка целеполагания и принятия решений, автоматизация пентеста, анализ защищенности моделей LLM и программного кода). Определены архитектуры LLM (GPT-4, GPT-3.5, Bard, LLaMA, LLaMA 2, BERT, Mixtral 8×7В Instruct, FLAN, Bloom) и программные решения на базе LLM (GAIL-PT, AutoAttacker, NetSecGame, Cyber Sentinel, Microsoft Counterfit, GARD project, GPTFUZZER, VuRLE), применяемые в области информационной безопасности. Установлены ограничения (конечное «время жизни» данных для обучения LLM, недостаточные когнитивные способности языковых моделей, отсутствие самостоятельного целеполагания и сложности при адаптации LLM к новым параметрам задачи). Выявлены потенциальные точки роста и развития технологии в контексте киберзащиты (исключение «галлюцинаций» моделей и обеспечение защиты LLM от джейлбрейков, осуществление интеграции известных разрозненных решений и программная автоматизация выполнения задач в области информационной безопасности с помощью LLM). Обсуждение. Полученные результаты могут быть полезны при разработке собственных теоретических и практических решений, обучающих и тренировочных наборов данных, программных комплексов и инструментов для проведения тестирования на проникновение. Исследование поможет в реализации новых подходов к построению LLM и повышению их когнитивных способностей, учитывающих аспекты работы с джейлбрейками и «галлюцинациями», а также для самостоятельного дальнейшего многостороннего изучения вопроса.

#### Ключевые слова

обработка естественного языка, компьютерная лингвистика, ChatGPT, пентест, искусственный интеллект, машинное обучение, наступательная безопасность, моделирование атак, автоматизация, Red Teaming, джейлбрейк

#### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках базовой части государственного задания ТУСУРа на 2023–2025 гг. (проект № FEWM-2023-0015).

Ссылка для цитирования: Конев А.А., Паюсова Т.И. Большие языковые модели в информационной безопасности и тестировании на проникновение: систематический обзор возможностей применения // Научнотехнический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 1. С. 42–52. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-42-52

<sup>©</sup> Конев А.А., Паюсова Т.И., 2025

# Large language models in information security and penetration testing: a systematic review of application possibilities

# Anton A. Konev<sup>1</sup><sup>∞</sup>, Tatyana I. Payusova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR), Tomsk, 634050, Russian Federation

<sup>2</sup> Tyumen State University, Tyumen, 625003, Russian Federation

<sup>1</sup> kaa@fb.tusur.ru<sup>⊠</sup>, https://orcid.org/0000-0002-3222-9956

<sup>2</sup> t.i.payusova@utmn.ru, https://orcid.org/0000-0003-4923-1689

## Abstract

The development of artificial intelligence technologies, in particular, large language models (LLM), has led to changes in many areas of human life and activity. Information security (IS) has also undergone significant changes. Penetration testing (pentest) allows evaluating the security system in practice in "combat" conditions. LLMs can take practical security analysis to a qualitatively new level in terms of automation and the ability to generate non-standard attack patterns. The presented systematic review is aimed at determining the already known ways of applying LLM in cybersecurity, as well as identifying "blank spots" in the development of technology. The selection of literature sources was carried out in accordance with the multi-stage PRISMA guidelines based on the analysis of abstracts and keywords of publications. The resulting sample was supplemented using the "snowball" method and manual search of articles. The total number of publications was 50 works from January 2023 to March 2024. The conducted research allowed to analyze the ways of using LLM in the field of information security (goal setting and decision-making support, pentest automation, security analysis of LLM models and program code), determine the LLM architectures (GPT-4, GPT-3.5, Bard, LLaMA, LLaMA 2, BERT, Mixtral 8×7B Instruct, FLAN, Bloom) and software solutions based on LLM used in the field of information security (GAIL-PT, AutoAttacker, NetSecGame, Cyber Sentinel, Microsoft Counterfit, GARD project, GPTFUZZER, VuRLE), to establish limitations (finite "lifetime" of data for LLM training, insufficient cognitive abilities of language models, lack of independent goal setting and difficulties in adapting LLM to new task parameters), identify potential growth points and development of technology in the context of cyber defense (elimination of "hallucinations" of models and ensuring protection of LLM from jailbreaks, implementation of integration of known disparate solutions and software automation of tasks in the field of information security using LLM). The presented results can be useful in developing theoretical and practical solutions, educational and training datasets, software packages and tools for penetration testing, new approaches to building LLM and improving their cognitive abilities, taking into account aspects of working with jailbreaks and "hallucinations", as well as for independent further multilateral study of the issue.

## Keywords

natural language processing, computational linguistics, ChatGPT, artificial intelligence, machine learning, attack modeling, Red Teaming, jailbreaking

# Acknowledgements

This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russia, Government Order for 2023–2025, project no. FEWM-2023-0015 (TUSUR).

**For citation:** Konev A.A., Payusova T.I. Large language models in information security and penetration testing: a systematic review of application possibilities. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 1, pp. 42–52 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-42-52

## Введение

30 ноября 2022 года компания OpenAI показала чат-бот ChatGPT на основе большой языковой модели (Large Learning Model, LLM) GPT-3.5. Данная демонстрация ознаменовала начало нового витка развития и распространения искусственного интеллекта. Только за первый квартал 2024 года на портале «Google Scholar» опубликованы 12 000 научных работ по теме LLM.

С открытием новых возможностей в области генерации текстового контента, поддержки принятия решений и поисковой оптимизации в свою очередь изменилась область информационной безопасности (ИБ). Первые активные действия по применению LLM осуществили злоумышленники для написания вредоносного кода, подготовки фишинговых писем, реализации «разведки по открытым источникам». Система защиты данных только начинает осваивать новые перспективы, устанавливает границы и практические способы применения больших языковых моделей.

Тестирование на проникновение (пентест) объединяет приемы «белых и черных шляп», позволяет моделировать атаки любой сложности и проводить многосторонний анализ защиты, с которым не сравнится «бумажный» подход, основанный на подготовке документов, подтверждающих в большей степени формальное соответствие системы защиты требованиям регуляторов. Усложнение ландшафта угроз, в том числе обусловленное развитием искусственного интеллекта и LLM, привело к ослаблению известных способов обеспечения и проверки безопасности. Рост успешных кибератак по данным Следственного комитета РФ<sup>1</sup>, востребованность услуг по этичному взлому на сайтах вакансий и поиску работы<sup>2</sup>, говорят о важности

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> В СК сообщили о росте количества IT-преступлений в России с 2014 года более чем в 50 раз // Информационное агентство ТАСС. 2023. 22 мая. URL: https://tass.ru/ proisshestviya/17812613 (дата обращения: 01.10.2024).

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Спрос на ИБ-кадры по-прежнему растет // Издательство ComNews. 2023. 1 дек. URL: https://www.comnews.ru/ content/230484/2023-12-01/2023-w48/1008/spros-ib-kadryprezhnemu-rastet?utm\_source=rfinance (дата обращения: 01.10.2024).

изучения аспектов тестирования на проникновение и совершенствования известных подходов с помощью новых инструментов.

В работе [1] отмечено отсутствие качественных всеобъемлющих методологий, способных системно помочь при моделировании и изучении информационных атак. В [2] показана важность комплексного подхода к обеспечению ИБ, в том числе с использованием инновационных методов моделирования. Концептуализация и исследование атак в рамках тестирования на проникновение на основе LLM может объединить в одном контексте факторы и элементы разнообразной природы, описать на естественном языке сценарии любой сложности и структуры. Таким образом, актуальной представляется задача определения возможностей больших языковых моделей в ИБ, в том числе для проведения и автоматизации пентеста, а также выявления пробелов при применении LLM в киберзащите.

В настоящей работе представлен систематический обзор, с помощью которого предпринята попытка ответить на ряд вопросов о роли и применении LLM и методов компьютерной лингвистики для решения задач ИБ.

Вопрос 1. Какие существуют задачи в области ИБ, в которых является актуальным использование LLM и методов компьютерной лингвистики?

Вопрос 2. Выделяют ли авторы работ, представленных в исследовании, определенные архитектуры LLM и готовые программные продукты на базе LLM для решения задач ИБ и автоматизации тестирования на проникновение?

Вопрос 3. Существуют ли границы применения LLM, которые можно выделить при рассмотрении больших языковых моделей в контексте ИБ?

Вопрос 4. Возможно ли выделить аспекты применения LLM и методов компьютерной лингвистики для решения задач ИБ и автоматизации тестирования на проникновение, обладающие «белыми пятнами», восполнить которые могут дальнейшие более детальные исследования?

Полученные ответы позволят определить потенциальные сильные и слабые стороны в применении LLM для защиты информации, частично или полностью автоматизировать тестирование на проникновение, обозначить программные аспекты интеграции языковых моделей с элементами системы защиты, усовершенствовать подходы наступательной и оборонительной безопасности.

### Материалы и методы

Выполнен отбор научных работ в соответствии с руководством PRISMA в поисковой системе https:// scholar.google.com/<sup>1</sup>.

Первоначально были отобраны публикации за последние пять лет (2019–2024 гг.) по запросу «("information security" OR pentest) (NLP OR LLM)». Количество найденных источников составило n = 16500. Первичный обзор аннотаций и ключевых слов найденных источников показал, что многие работы косвенно связаны с обработкой естественного языка, применением языковых моделей и методов компьютерной лингвистики в ИБ и при проведении тестирований на проникновение. Запрос был конкретизирован с точки зрения использования LLM: «("information security" *OR pentest*) LLM» (n = 4940).

В силу относительной новизны темы и последнего проявленного интереса к большим языковым моделям, связанным с презентацией OpenAI ChatGPT 30 ноября 2022 г., поиск был сужен до наиболее актуальных работ, датированных 2023–2024 гг. Количество источников составило n = 1490.

На основе анализа аннотаций и ключевых слов и с учетом исключенных статей (дубликатов, источников в нерецензируемых журналах, работ, не имеющих полного текста) количество работ в выборке составило n = 38. Для расширения анализируемой выборки методом «снежного кома» были найдены и добавлены 8 источников, самая ранняя из найденных публикация датируется 2015 г. (n = 46). Путем ручного поиска в системе https://elibrary.ru/<sup>2</sup> были найдены и добавлены в выборку еще четыре публикации (n = 50).

## Аналогичные обзоры

Аспекты применения LLM в области киберзащиты, в том числе при проведении тестирований на проникновение, нашли отражение в нескольких систематических обзорах. В частности, можно отметить работы [3–6].

Настоящая работа, в отличие от перечисленных исследований, выполнена в соответствии с методикой PRISMA и рассматривает публикации, напрямую связанные с применением LLM в области киберзащиты, в большинстве своем опубликованные в рецензируемых источниках за последний год (с января 2023 г. по март 2024 г.).

В работе [3] не были рассмотрены вопросы наступательной безопасности, сценарного моделирования при пентесте, связь LLM с текстовым контентом существующих баз знаний. В [4] практически не представлено описание известных наборов данных и программных решений на основе больших языковых моделей для решения задач кибербезопасности. В работе [5] поверхностно отмечена возможность применения LLM в контексте ИБ, в основном сосредотачиваясь на общих задачах. В [6] изучены только модели семейства GPT и не охвачено всестороннее применение LLM в ИБ.

Настоящее исследование существенно дополняет аналогичные обзоры. В работе приводятся направления дальнейших исследований LLM, связанные как с концептуальными задачами (повышение когнитивных способностей, осуществление самостоятельного целеполагания), так и с техническими вопросами (исключение «галлюцинаций» или их перенаправление в конструктивное русло, например, для генерации более сложных сценариев пентеста, повышение адаптивных

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Поисковая система Google Scholar. URL: https://scholar. google.com/ (дата обращения: 12.01.2025).

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Научная электронная библиотека Elibrary.ru. URL: https://www.elibrary.ru/ (дата обращения: 12.01.2025).

Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2025, том 25, № 1 Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2025, vol. 25, no 1

способностей с помощью автоматической контекстуализации запросов). Обозначены границы применения LLM и методов компьютерной лингвистики в контексте ИБ. Представлена подборка готовых программных решений на базе больших языковых моделей, а также наборов данных, подготовленных специально для решения задач ИБ.

# Решение задач ИБ с помощью LLM

Обобщенные результаты систематического обзора представлены в табл. 1. Результаты отражают некоторые задачи в области поддержки целеполагания и принятия решений, автоматизации пентеста, анализа защищенности моделей LLM (AI Red Teaming) и программного кода, а также возможные способы их решения и дают ответ на вопрос 1. Настоящая работа выделяет пентест, как одну из наименее изученных тем с точки зрения автоматизации на базе больших языковых моделей, и при этом как наиболее перспективное направление в области наступательной безопасности с учетом стремительно меняющегося цифрового ландшафта.

Результаты проведенного исследования позволяют говорить о востребованности LLM при решении задач ИБ, о чем, в том числе, свидетельствуют созданные таксономии и «дорожные карты» применения больших языковых моделей в кибербезопасности [5, 6]. Можно отметить появление новых методов для повышения адаптационных способностей моделей [10], в частности, методе генерации с расширенным извлечением (Retrieval-Augmented Generation, RAG) [17], предполагающим автоматизированное включение в запрос ключевых слов/фраз/терминов/шаблонов, характери-

*Таблица 1*. Обзор направлений исследований *Table 1*. Review of the research directions

| Раздел и ссылки  | Рассматриваемые задачи  | Предложенные решения  |  |
|--|---|---|--|
| Направление «Поддержка целеполагания и принятия решений» |   |   |  |
| Общие подходы<br>[7–9]                                   | Стратегическое планирование   | Повышение абстрактности вопросов, консолидация данных для достижения синергетического эффекта   |  |
|  | Декомпозиция целей, тактическое пла-<br>нирование                                     | Повышение качества обучающих наборов данных, сни-<br>жение двусмысленности формулировок   |  |
|  | Самостоятельное рассуждение LLM   | Применение графового подхода, деревьев рассуждений для выстраивания логических связей   |  |
| Пентест<br>[10, 11]                                      | Поиск оптимальной последовательно-<br>сти действий                                    | Применение наиболее мощных архитектур LLM, напри-<br>мер, LLaMA, BERT, FLAN, Bloom, Mixtral 8 × 7B Instruct   |  |
|  | Принятие решений  | Повышение контекстуализации запросов  |  |
| Сертификация и сорев-<br>нования<br>[12–15]              | Принятие решений, осуществление<br>рассуждений  | Повышение когнитивных функций LLM, повышение качества обучающих наборов данных  |  |
|  | Направление «Автомати   | изация пентеста»  |  |
| Сценарии атаки<br>[16, 17]                               | Создание нестандартных сценариев  | Реализация «мозгового штурма», участниками которого<br>выступают LLM. Использование в сценариях полученных<br>«галлюцинаций»  |  |
| Уязвимости системы<br>[18–23]                            | Выдвижение гипотез о наличии уязви-<br>мостей в системе                               | Сопоставление результатов сканирования и данных о системе с базами уязвимостей. Автоматизация генерации команд для эксплуатации уязвимостей   |  |
| Социотехнические<br>аспекты<br>[24-26]                   | Проведение социотехнических атак,<br>поддержка диалога, усложнение рас-<br>суждений   | Проведение теста Тьюринга для проверки качества и<br>правдоподобности модели, применение деревьев рас-<br>суждений для выстраивания более точных и логичных<br>причинно-следственных действий |  |
| Интеграция с известны-<br>ми базами знаний<br>[27–30]    | Контекстуализация сценариев атаки с<br>помощью известного текстового кон-<br>тента    | Обращение к MITRE ATT&CK, базам CAPEC, CVE, CWE и NVD. Применение методов компьютерной лингвистики (TF-IDF, word2vec, bag-of-words) для обработки текстовых материалов                        |  |
| Пентест передовых тех-<br>нологий<br>[31, 32]            | Анализ защищенности квантовых тех-<br>нологий и смарт-контрактов на базе<br>блокчейна | «Знакомство» LLM с описанием квантовых протоколов<br>(ВВ84 и квантово-устойчивых криптографических алго-<br>ритмов от NIST). Добавление в наборы данных примеров<br>смарт-контрактов          |  |
| Программные решения для автоматизации пен-               | Объединение разрозненных решений в единый продукт                                     | Применение API, прокси, сериализации данных и других интеграционных решений для объединения модулей   |  |
| теста<br>[33–36]   | Автоматизация выполнения команд   | Выполнение и обработка системных вызовов, осущест-<br>вление межпроцессного взаимодействия  |  |

Таблица 1. Продолжение

| Раздел и ссылки   | Рассматриваемые задачи   | Предложенные решения   |  |  |  |
|---|--|--|--|--|--|
|   |  |  |  |  |  |
| Защита LLM от базовых<br>угроз<br>[37–39]                   | Защита от Prompt Injection, Indirect<br>Prompt Injection, «отравления» данных,<br>кражи модели | Автоматическое написание подсказок, генерация безопас-<br>ных ответов, например, с помощью Microsoft Counterfit и<br>GARD project                  |  |  |  |
| Защита данных<br>[40]                                       | Защита от утечек данных через LLM  | Зашумление данных, распределенное хранение, применение системы меток   |  |  |  |
| Морально-этические аспекты                                  | Исключение некорректных ответов на<br>«чувствительные» темы                                    | Исследование параметров ложного и «токсичного» кон-<br>тентов  |  |  |  |
| [41, 42]  | Исключение бессмысленных ответов и искажения фактов  | Изменение алгоритмов сжатия, поддержка стабильности диалога  |  |  |  |
| Джейлбрейки и пром-<br>пт-инжиниринг<br>[19, 34, 43–46]     | Анализ угроз и перспектив примене-<br>ния джейлбрейков   | Исследование параметров и возможностей джейлбрейков  |  |  |  |
|   | Автоматизация генерации шаблонов<br>джейлбрейков   | Изучение методик промпт-инжиниринга и структуры промптов   |  |  |  |
|   | Направление «Анализ защищенн   | юсти программного кода»  |  |  |  |
| Поиск уязвимостей<br>[47–50]                                | Автоматизация генерации защищен-<br>ного кода, поиск уязвимостей в про-<br>граммах             | Повышение качества обучения модели, усложнение обу-<br>чающей выборки, применение эталонных наборов данных   |  |  |  |
| Форензика, поиск инди-<br>каторов компрометации<br>[51, 52] | Анализ лог-файлов, классификация<br>инцидентов и сигнатур вредоносных<br>программ              | Исследование кода/программы с помощью разных язы-<br>ковых моделей и сравнение результатов с точки зрения<br>совпадающих индикаторов компрометации |  |  |  |

зующих предметную область и уточняющих контекст. В работах [7–15] изучены когнитивные способности LLM [7–15], приведены способы усовершенствования процесса рассуждения с помощью генеалогического древа и общего графа [9].

В настоящей работе выполнен анализ работ, описывающих интеграцию LLM с базами CAPEC, CVE, NVD, MITRE ATT&CK, положениями NIST Cybersecurity Framework. В работах [27-30] представлены результаты применения методов компьютерной лингвистики (TF-IDF, Doc2Vec) для установления семантического сходства и сопоставления баз СVE, САРЕС, СWE. Инновационное направление AI Red Teaming работает в направлении повышения защиты LLM от подделки и кражи данных, генерации безопасных ответов, реализации методов автоматического анализа защищенности языковых моделей [37-46]. LLM находят применение для моделирования кибератак при тестировании защищенности квантовых технологий (протокола BB84 и квантово-устойчивых криптографических алгоритмов от NIST) [31], смарт-контрактов [32].

# Архитектуры и готовые программные продукты на базе LLM

Для ответа на вопрос 2 работы, можно отметить, что применение LLM носит как высокоабстрактный концептуальный уровень применения, так и исключительно прикладной характер. Из примеров языковых моделей чаще всего упоминаются GPT-4 [11–14, 19– 23, 28, 33, 41, 43, 46–48, 50, 52] и GPT-3.5 [23, 50, 52] от OpenAI, Google Bard [14, 41], LLaMA (LLaMA 2) [10, 21], BERT [15], Mixtral 8×7В Instruct (в работе [10] показано применение модели в рамках чат-бота Huggingchat), FLAN [10], Bloom [10]. Наиболее мощной архитектурой по результатам исследования представляется GPT-4, так как большинство разнообразных задач были решены именно на ее основе. LLaMA 2 и BERT отражены в работах как наиболее гибкие решения в силу их меньшей цензурированности и вследствие этого большей адаптивности и способности «встраиваться» в любой контекст. В работе [50] рассмотрены более редкие и экзотические модели, например, PLART, CodeT5, CodeGen, In-Coder, Codex-12B, GPT-Neo, ChatGPT-175B, но их применение носит скорее исследовательский интерес, чем практическую пользу, например, по сравнению с GPT-4.

В табл. 2 представлены примеры типов данных, используемые для обучения LLM. Типы данных систематизированы по частоте их упоминания в перечисленных работах.

Дополнительно, в качестве обучающих материалов упоминаются примеры текстовых описаний сетевых топологий и информационных инфраструктур [10, 35], ложный и «токсичный» контент [41], ранее собранные и накопленные результаты работы LLM [23], наборы данных Defects4J v1.2, Defects4J v2.0, QuixBugs, HumanEval-Java, Many-Bugs, образцы кода с площадки Stack Overflow [50].

В изученных работах представлен ряд готовых программных комплексов на основе LLM и наборов данных для обучения и тестирования качества моделей: программный комплекс GAIL-PT [19], система AutoAttacker [34] и NetSecGame [35] для автоматического взлома, диалоговая система Cyber Sentinel [36], Microsoft Counterfit и GARD project для проведения AI Red Teaming [38], среда GPTFUZZER [46] для автоматизации генерации шаблонов джейлбрейков, система

| Данные для обучения   | Примеры и факты  | Ссылки                           |
|---|--|----------------------------------|
| Описания атак и пентестерские отчеты  | GPT-4 продемонстрировал на 228,6 % большее количество<br>успешных шагов, чем GPT-3.5   | [7, 10, 11, 16–19, 23, 34, 35]   |
| Данные MITRE ATT&CK, CVE, CWE, NVD, NIST Cybersecurity Framework, баз IoC и др. | MITRE ATT&CK содержит более 200 техник, «разложенных» по 14 тактикам. База NVD содержит более 100 000 уязвимо-<br>стей   | [7, 11, 27–30, 36, 51, 52]       |
| Код вредоносных программ и образцы полезной нагрузки                            | Алгоритм word2vec может быть применен для исследования признаков веб-шелла   | [20, 22, 25, 26, 28, 33, 51, 52] |
| Примеры джейлбрейков  | Процент взломов с помощью джейлбрейков может быть снижен при использовании LLM с 67,21 % до 19,34 %  | [19, 34, 43–46]                  |
| Примеры фишинговых писем, спама   | С помощью LLM возможно определение «подозрительных» писем и их параметров  | [16, 20, 21, 25]                 |
| Фрагменты уязвимого программного кода   | Более чем для 60 % примеров GPT-4 удалось правильно опре-<br>делить проблему с исходным кодом. GPT-4 продемонстриро-<br>вал 73 % успешных взломов веб-сайтов. Точность обнаруже-<br>ния логических уязвимостей в смарт-контрактах – более 70 % | [32, 47, 48, 50]                 |
| Задания СТГ-соревнований  | GPT-4 превзошел 88,5 % игроков CTF   | [12, 13, 49]                     |
| Примеры прохождений (writeup) уяз-<br>вимых машин                               | Обращение авторов в исследованиях к машинам Chaos, SteamCloud, GoodGames на площадке HackTheBox  | [18, 19]                         |
| Вопросы к сертификации Certified<br>Ethical Hacking (CEH)                       | ChatGPT продемонстрировал уровень точности ответов 80,8 %, Bard – 82,6 %   | [14]                             |
| Извлечение информации из норматив-<br>ных правовых актов и регламентов          | Для анализа GDPR применялись 107 вопросов и модель<br>BERT. Точность ответов составила 91 %  | [15]                             |
| Словари для брутфорса   | Словарь RockYou содержит 14 млн паролей  | [20]                             |
| Переписка из социальный сетей и дру-<br>гих открытых источников                 | Для обучения LLM использовалось порядка 300 млрд слов в рамках социальной сети Reddit  | [20]                             |
| Конфиденциальная информация   | При тестировании моделей GPT-2 и GPT-3 имел место факт<br>утечки финансовой и медицинской информации   | [40]                             |
| Описания протоколов, спецификаций   | Обучение LLM осуществлялось на основе протокола BB84 и<br>криптографических алгоритмов NIST  | [31]                             |

# *Таблица 2*. Обзор типов данных и факты о них *Table 2*. Overview of data types and facts about them

для автоматического поиска и устранения уязвимостей VuRLE [49]. Представленные решения ответственны за различные грани применения LLM в области ИБ: пентест, джейлбрейки, поиск и устранение уязвимостей, поддержку принятий решений в области управления рисками и др. Каждый продукт показал свою эффективность при проведении экспериментов в рамках исследований: GAIL-PT позволил снизить временные издержки при работе LLM на 55 % по сравнению с популярным продуктом DeepExploit; AutoAttacker может обходить градиентную обфускацию при проведении атаки на LLM, что не представлено ни в одном другом решении; NetSecGame активно поддерживается и развивается разработчиками, в частности планируется создание более сложных сценариев атаки с помощью реализации мультиагентного подхода, в рамках которого каждый элемент отвечает за свой фрагмент сценария, и при их объединении получается кумулятивный эффект сценарных действий; фреймворк VuRLE позволил обнаружить 183 из 279 уязвимостей и исправить 101 из них, в отличие от продукта LASE, который выявил 58 «лазеек» и закрыл только 21 на основе анализа текстовой документации.

# Ограничения и барьеры при применении LLM

Из ограничений и трудностей (табл. 3) при применении LLM (вопрос 3) можно выделить конечное «время жизни» данных для обучения, недостаточные когнитивные способности больших языковых моделей, отсутствие самостоятельного целеполагания и сложности при адаптации к новым условиям задачи [7–19, 21, 22, 24–30, 33, 34, 40, 41, 43, 47, 49, 50].

Актуализация набора данных для обучения LLM. Современные решения оперируют уже обученными на готовых наборах данных большими языковыми моделями. Сформированные обучающие выборки не предполагают обновление информации о ландшафте угроз, новых векторах атак и уязвимостях нулевого дня. Непрерывная актуализация наборов данных предполагает открытую архитектуру. Открытость, в свою очередь, связана с рисками безопасности: с возможными атаками на параметры модели, «отравлением» или умышленной порчей данных, аспектами обработки конфиденциальной информации при обучении языковых моделей [7, 8, 11, 27–30, 33, 34, 40, 41, 47, 49, 50].

Когнитивные способности языковых моделей. Несмотря на возможности, предоставляемые LLM,

| Ограничения  | Методы решения  | Ссылки   |
|--|---|--|
| Конечное «время жиз-<br>ни» данных для обуче-<br>ния LLM       | Программная автоматизация процесса дообучения модели на ак-<br>туальных наборах данных. Возможная автоматизация написания<br>запросов к LLM с помощью другой специально обученной языковой<br>модели. Программная реализация разведки и анализа поступающих<br>данных. Достижение синергетического эффекта при объединении<br>гетерогенных выборок  | [7, 8, 11, 27–30, 33, 34, 40,<br>41, 47, 49, 50] |
| Недостаточные когни-<br>тивные способности<br>языковых моделей | Применение обучения с подкреплением, повышение абстрактности<br>и масштабности вопросов, задействование механизма рассуждений<br>на основании теории графов, деревьев рассуждений для повышения<br>мыслительной функции LLM, увеличение продолжительности тести-<br>рования моделей, организация нескольких LLM в единый кластер для<br>усиления их способностей в формате «мозгового штурма» | [7–9, 12–17]                                     |
| Отсутствие самостоя-<br>тельного целеполагания                 | Повышение качества промптов с помощью уточнения формулиро-<br>вок, снижения двусмысленности, подведение LLM к написанию<br>диалогов и вывода процесса рассуждений с помощью механизма<br>джейлбрейкинга   | [10, 11, 16, 21, 22]                             |
| Сложности при адап-<br>тации                                   | Применение RAG, контекстуализация запросов и обеспечение адап-<br>тационного «люфта» с помощью джейлбрейков и дополнительного<br>включения в обучающую выборку примеров описаний реальных<br>систем   | [10, 17–19, 24–26, 34, 43]                       |

| Таблица 3. Возможные методы преодоления ограничени   | ій LLM |
|--|--------|
| Table 3. Possible methods to overcome LLM limitation | ns     |

пока языковые модели не могут заменить мыслительный процесс, осуществляемый этичным взломщиком. Тест Тьюринга мог бы выступить инструментом для проверки качества работы LLM и разделения процесса имитации от настоящей когнитивной деятельности. Современные языковые модели опираются на готовые решения при выполнении атаки, в них отсутствует творческая составляющая и достаточная мыслительная способность [7–9, 12–17].

Отсутствие самостоятельного целеполагания у LLM. Взаимодействие с LLM выстраивается через пользователя и его открытые вопросы. Весь дальнейший процесс «общения» проходит в рамках запросов пользователей. Движение «за флажки» возможно, но на практике трудновыполнимо: LLM старается найти ответ именно на вопрос пользователя, при этом верное решение может находиться в другой плоскости. Представленные исследования отмечают, что выбор и формулирование открытых вопросов к LLM, требуют отдельной проработки и изучения [10, 11, 16, 21, 22].

Адаптация моделей. LLM могут эффективно работать только с системами, описанными в обучающей выборке. Изменение параметров информационной инфраструктуры требует дообучения или переучивания моделей. Повышение гибкости, изменчивости и адаптационных свойств больших языковых моделей, например, с помощью метода RAG, представляется актуальной задачей [10, 17–19, 24–26, 34, 43].

# Возможные направления дальнейших исследований

Выполненное исследование научных работ [11, 17, 19–30, 33–36, 42–46] позволяет развернуто ответить на вопрос 4 и выделить ряд направлений, требующих дополнительного изучения и более глубокого раскрытия темы: «галлюцинации» моделей, джейлбрейки, интеграция разрозненных решений и программная автоматизация необходимых действий. В табл. 4 представлены возможные задачи, связанные с направлениями дальнейших исследований.

«Галлюцинации» моделей. Многие исследования указывают на проблему ложных или бессмысленных ответов от языковых моделей из-за ограниченной или противоречащей информации в обучающем наборе данных или чрезмерного сжатия данных для обучения. На определенном этапе при продолжительной серии однотипных вопросов к LLM, также может произойти «зацикливание» и компиляция ранее предоставленных ответов, в том числе с искажениями и общими формулировками [17, 19, 35, 42].

Джейлбрейки. С одной стороны, джейлбрейки позволяют обходить цензуру, нарушая нормы морали и этики, с другой — предлагать нестандартное видение вопроса, осуществлять проактивный поиск новых векторов атак и траекторий злоумышленника. Кроме этого, джейлбрейк помогает решить проблему отсутствующего контекста, учитывать предметную область и специфику анализируемой информационной системы [19, 34, 43–46].

**Интеграция разрозненных решений.** Многие исследования рассматривают частные аспекты проведения пентеста. Проведенный обзор показывает, что на данный момент отсутствует системное решение, охватывающее все направления пентеста и возможности их комплексной реализации с помощью LLM и методов компьютерной лингвистики. Потенциальным решением представляется рассмотрение пентеста на базе LLM через призму модели Kill Chain и/или MITRE ATT&CK [11, 19, 27–30].

Программная автоматизация. В основе большинства представленных решений для автоматизации вы-

| Направления                          | Задачи   | Ссылки                 |
|--------------------------------------|--|------------------------|
| «Галлюцинации» мо-<br>делей          | Повышение качества обучающих наборов данных, тестирование<br>алгоритмов преобразования данных, используемых при обучении.<br>Возможное рассмотрение «галлюцинаций» как инструмента, способ-<br>ного привнести нестандартные сценарные элементы в работу LLM                            | [17, 19, 35, 42]       |
| Джейлбрейки                          | Защита от джейлбрейкинга с помощью зашумления данных, распре-<br>деленного хранения без возможности одноэтапной компрометации,<br>меток конфиденциальности. Повышение контекстуализации задачи<br>и выстраивание процесса рассуждений  | [19, 34, 43–46]        |
| Интеграция разрознен-<br>ных решений | Систематизация материалов по проведению тестирования на про-<br>никновение с помощью LLM и методов компьютерной лингвистики,<br>например, с помощью модели Kill Chain, пошагово раскладывающей<br>любую атаку на ряд составляющих базовых элементов, от разведки<br>до сокрытия следов | [11, 19, 27–30]        |
| Программная автомати-<br>зация       | Выбор наиболее подходящей архитектуры LLM для решения по-<br>ставленной задачи. Автоматизация запуска команд, сгенерированных<br>LLM   | [11, 17, 19–26, 33–36] |

| Таблица 4. Основ | ные области далы     | нейшего изучені   | ия и возможные   | задачи |
|------------------|----------------------|-------------------|------------------|--------|
| Table 4. Majo    | or areas for further | study and possibl | e solution metho | ds     |

полнения команд лежит среда Metasploit и оболочка Меterpreter. Наиболее опасные злоумышленники редко применяют стандартные решения на практике, поэтому ценность пентеста, выполненного известными инструментами, может снижаться. Дальнейшим направлением исследования представляется поиск альтернатив для автоматизированного выполнения команд, сгенерированных LLM [11, 17, 19–26, 33–36].

#### Заключение

Область информационной безопасности во многом претерпевает серьезные изменения, связанные с вызовами окружающей среды, новыми угрозами и векторами атаки, а также появлением инновационных технологий, требующих смены подходов к защите. Настоящее исследование позволило определить известные способы применения больших языковых моделей (Large Learning Model, LLM) в области информационной безопасности, а также обозначить ограничения, потенциальные точки роста и развития технологии в контексте киберзащиты. Полученные результаты работы могут быть основой дальнейших теоретических и практических исследований в информационной безопасности

#### Литература

- Konev A., Shelupanov A., Kataev M., Ageeva V., Nabieva A. A survey on threat-modeling techniques: protected objects and classification of threats // Symmetry. 2022. V. 14. N 3. P. 549. https:// doi.org/10.3390/sym14030549
- Shelupanov A., Evsyutin O., Konev A., Kostyuchenko E., Kruchinin D., Nikiforov D. Information security methods–Modern research directions // Symmetry. 2019. V. 11. N 2. P. 150. https://doi. org/10.3390/sym11020150
- Yao Y., Duan J., Xu K., Cai Y., Sun Z., Zhang Y. A survey on large language model (LLM) security and privacy: The Good, the Bad, and the Ugly // High-Confidence Computing. 2024. V. 4. N 2. P. 100211. https://doi.org/10.1016/j.hcc.2024.100211
- da Silva G.J.C., Westphall C.B. A Survey of Large Language Models in Cybersecurity // arXiv. 2024. arXiv:2402.16968. https://doi. org/10.48550/arXiv.2402.16968

и тестировании на проникновение. Представленное исследование позволит усовершенствовать существующие решения, в том числе, связанные с автоматизацией пентеста, собрать целостную методику анализа защищенности, например, соединив этапы Kill Chain и материалы MITRE ATT&CK с возможностями LLM и методами компьютерной лингвистики.

Развитие темы исследования может быть связано с более глубоким изучением каждого этапа тестирования на проникновение через призму больших языковых моделей, формированием понимания, какие шаги требуют улучшений и могут быть усовершенствованы с помощью возможностей LLM. Требуется изучение аспектов актуализации обучающих данных, повышение когнитивных и адаптационных способностей языковых моделей, развитие функции самостоятельного целеполагания. Необходимо устранение «галлюцинаций», исследование возможностей джейлбрейков, «бесшовная» интеграция разрозненных решений для получения целостной методики системного анализа защищенности информационной инфраструктуры. Возможен выбор наиболее подходящих инструментов программной реализации комплексных решений на основе LLM.

#### References

- 1. Konev A., Shelupanov A., Kataev M., Ageeva V., Nabieva A. A survey on threat-modeling techniques: protected objects and classification of threats. *Symmetry*, 2022, vol. 14, no. 3, pp. 549. https://doi.org/10.3390/sym14030549
- Shelupanov A., Evsyutin O., Konev A., Kostyuchenko E., Kruchinin D., Nikiforov D. Information security methods–Modern research directions. *Symmetry*, 2019, vol. 11, no. 2, pp. 150. https:// doi.org/10.3390/sym11020150
- Yao Y., Duan J., Xu K., Cai Y., Sun Z., Zhang Y. A survey on large language model (LLM) security and privacy: The Good, the Bad, and the Ugly. *High-Confidence Computing*, 2024, vol. 4, no. 2, pp. 100211. https://doi.org/10.1016/j.hcc.2024.100211
- da Silva G.J.C., Westphall C.B. A Survey of Large Language Models in Cybersecurity. *arXiv*, 2024, arXiv:2402.16968. https://doi. org/10.48550/arXiv.2402.16968

- Wang L., Ma C., Feng X., Zhang Z., Yang H., Zhang J., Chen Z., Tang J., Chen X., Lin Y., Zhao W., Wei Z., Wen J. A survey on large language model based autonomous agents // Frontiers of Computer Science. 2024. V. 18. N 6. P. 186345. https://doi.org/10.1007/s11704-024-40231-1
- Gupta M., Akiri C., Aryal K., Parker E., Praharaj L. From ChatGPT to ThreatGPT: Impact of generative ai in cybersecurity and privacy // IEEE Access. 2023. V. 11. P. 80218–80245. https://doi.org/10.1109/ ACCESS.2023.3300381
- Happe A., Cito J. Getting pwn'd by ai: Penetration testing with large language models // Proc. of the 31<sup>st</sup> ACM Joint European Software Engineering Conference and Symposium on the Foundations of Software Engineering. 2023. P. 2082–2086. https://doi. org/10.1145/3611643.3613083
- Chang Y., Wang X., Wang J., Wu Y., Yang L., Zhu K., Chen H., Yi X., Wang C., Wang Y., Ye W., Zhang Y., Chang Y., Yu P., Yang Q., Xie X. A survey on evaluation of Large Language Models // ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology. 2024. V. 15. N 3. P. 1–45. https://doi.org/10.1145/3641289
- Li Z., Cao Y., Xu X., Jiang J., Liu X., Teo Y., Lin S., Liu Y. LLMs for Relational Reasoning: How Far are We?//Proc. of the 1st International Workshop on Large Language Models for Code (LLM4Code'24). 2024. P. 119–126. https://doi.org/10.1145/3643795.3648387
- Genevey-Metat C., Bachelot D., Gourmelen T., Quemat A., Satre P.-M., Scotto L., Di Perrotolo, Chaux M., Delesques P., Gesny O. Red Team LLM: towards an adaptive and robust automation solution // Proc. of the Conference on Artificial Intelligence for Defense. 2023. hal-04328468.
- Franco M.F., Rodrigues B., Scheid E., Jacobs A., Killer C., Granville L., Stiller B. SecBot: a business-driven conversational agent for cybersecurity planning and management // Proc. of the 16<sup>th</sup> International Conference on Network and Service management (CNSM). 2020. P. 1–7. https://doi.org/10.23919/ cnsm50824.2020.9269037
- Chamberlain D., Casey E. Capture the Flag with ChatGPT: Security Testing with AI ChatBots // Proc. of the 19<sup>th</sup> International Conference on Cyber Warfare and Security (ICCWS). 2024. V. 19. N 1. P. 43–54. https://doi.org/10.34190/iccws.19.1.2171
- Timmins J., Knight S., Lachine B. Offensive cyber security trainer for platform management systems // Proc. of the IEEE International Systems Conference (SysCon). 2021. P. 1–8. https://doi.org/10.1109/ syscon48628.2021.9447060
- Raman R., Calyam P., Achuthan K. ChatGPT or Bard: Who is a better Certified Ethical Hacker? // Computers & Security. 2024. V. 140. P. 103804. https://doi.org/10.1016/j.cose.2024.103804
   Abualhaija S., Arora C., Sleimi A., Briand L. Automated question
- Abualhaija S., Arora C., Sleimi A., Briand L. Automated question answering for improved understanding of compliance requirements: A multi-document study // Proc. of the IEEE 30<sup>th</sup> International Requirements Engineering Conference (RE). 2022. P. 39–50. https:// doi.org/10.1109/re54965.2022.00011
- Renaud K., Warkentin M., Westerman G. From ChatGPT to HackGPT: Meeting the cybersecurity threat of generative AI // MIT Sloan Management Review. 2023.
- Yamin M.M., Hashmi E., Ullah M., Katt B. Applications of LLMs for generating cyber security exercise scenarios // IEEE Access. 2024. V. 12. P. 143806–143822. https://doi.org/10.1109/access.2024.3468914
- Heim M.P., Starckjohann N., Torgersen M. The Convergence of AI and Cybersecurity: An Examination of ChatGPT's Role in Penetration Testing and its Ethical and Legal Implications. BS thesis. NTNU, 2023.
- Chen J., Hu S., Zheng H., Xing C., Zhang G. GAIL-PT: An intelligent penetration testing framework with generative adversarial imitation learning // Computers & Security. 2023. V. 126. P. 103055. https:// doi.org/10.1016/j.cose.2022.103055
- Ананьев В.А., Человечкова А.В. ChatGPT в сфере информационной безопасности // Информационная безопасность цифровой экономики. 2023. С. 77–83.
- Прохоров А.И. Киберполигон как современный инструмент обеспечения информационной безопасности // Информатизация в цифровой экономике. 2023. Т. 4. № 4. С. 363–378. https://doi. org/10.18334/ide.4.4.119301
- 22. Chen Y., Yao Y., Wang X., Xu D., Yue C., Liu X., Chen K., Tang H., Liu B. Bookworm game: Automatic discovery of LTE vulnerabilities through documentation analysis // Proc. of the IEEE Symposium on Security and Privacy (SP). 2021. P. 1197–1214. https://doi. org/10.1109/sp40001.2021.00104

- Wang L., Ma C., Feng X., Zhang Z., Yang H., Zhang J., Chen Z., Tang J., Chen X., Lin Y., Zhao W., Wei Z., Wen J. A survey on large language model based autonomous agents. *Frontiers of Computer Science*, 2024, vol. 18, no. 6, pp. 186345. https://doi.org/10.1007/ s11704-024-40231-1
- Gupta M., Akiri C., Aryal K., Parker E., Praharaj L. From ChatGPT to ThreatGPT: Impact of generative ai in cybersecurity and privacy. *IEEE Access*, 2023, vol. 11, pp. 80218–80245. https://doi.org/10.1109/ ACCESS.2023.3300381
- Happe A., Cito J. Getting pwn'd by ai: Penetration testing with large language models. Proc. of the 31st ACM Joint European Software Engineering Conference and Symposium on the Foundations of Software Engineering, 2023, pp. 2082–2086. https://doi. org/10.1145/3611643.3613083
- Chang Y., Wang X., Wang J., Wu Y., Yang L., Zhu K., Chen H., Yi X., Wang C., Wang Y., Ye W., Zhang Y., Chang Y., Yu P., Yang Q., Xie X. A survey on evaluation of Large Language Models. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 2024, vol. 15, no. 3, pp. 1–45. https://doi.org/10.1145/3641289
- Li Z., Cao Y., Xu X., Jiang J., Liu X., Teo Y., Lin S., Liu Y. LLMs for Relational Reasoning: How Far are We? Proc. of the 1<sup>st</sup> International Workshop on Large Language Models for Code (LLM4Code '24), 2024, pp. 119–126. https://doi.org/10.1145/3643795.3648387
- Genevey-Metat C., Bachelot D., Gourmelen T., Quemat A., Satre P.-M., Scotto L., Di Perrotolo, Chaux M., Delesques P., Gesny O. Red Team LLM: towards an adaptive and robust automation solution. *Proc. of the Conference on Artificial Intelligence for Defense*, 2023, hal-04328468.
- Franco M.F., Rodrigues B., Scheid E., Jacobs A., Killer C., Granville L., Stiller B. SeeBot: a business-driven conversational agent for cybersecurity planning and management. *Proc. of the 16th International Conference on Network and Service management* (CNSM). 2020, pp. 1–7. https://doi.org/10.23919/ cnsm50824.2020.9269037
- Chamberlain D., Casey E. Capture the Flag with ChatGPT: Security Testing with AI ChatBots. Proc. of the 19<sup>th</sup> International Conference on Cyber Warfare and Security (ICCWS), 2024, vol. 19, no 1, pp. 43– 54. https://doi.org/10.34190/iccws.19.1.2171
- Timmins J., Knight S., Lachine B. Offensive cyber security trainer for platform management systems. *Proc. of the IEEE International Systems Conference (SysCon)*, 2021, pp. 1–8. https://doi.org/10.1109/ syscon48628.2021.9447060
- Raman R., Calyam P., Achuthan K. ChatGPT or Bard: Who is a better Certified Ethical Hacker? *Computers & Security*, 2024, vol. 140, pp. 103804. https://doi.org/10.1016/j.cose.2024.103804
- Abualhaija S., Arora C., Sleimi A., Briand L. Automated question answering for improved understanding of compliance requirements: A multi-document study. *Proc. of the IEEE 30th International Requirements Engineering Conference (RE)*, 2022, pp. 39–50. https:// doi.org/10.1109/re54965.2022.00011
- Renaud K., Warkentin M., Westerman G. From ChatGPT to HackGPT: Meeting the cybersecurity threat of generative AI. *MIT Sloan Management Review*, 2023.
- Yamin M.M., Hashmi E., Ullah M., Katt B. Applications of LLMs for generating cyber security exercise scenarios. *IEEE Access*, 2024, vol. 12, pp. 143806–143822. https://doi.org/10.1109/access.2024.3468914
- Heim M.P., Starckjohann N., Torgersen M. The Convergence of AI and Cybersecurity: An Examination of ChatGPT's Role in Penetration Testing and its Ethical and Legal Implications. BS thesis. NTNU, 2023.
- Chen J., Hu S., Zheng H., Xing C., Zhang G. GAIL-PT: An intelligent penetration testing framework with generative adversarial imitation learning. *Computers & Security*, 2023, vol. 126, pp. 103055. https:// doi.org/10.1016/j.cose.2022.103055
- Ananyev V., Chelovechkova A. ChatGPT in information security. Informacionnaja bezopasnost' cifrovoj ekonomiki, 2023, pp. 77–83. (in Russian)
- Prokhorov A.I. Cyberpolygon as a modern information security tool. *Informatization in the Digital Economy*, 2023, vol. 4, no. 4, pp. 363– 378. (in Russian). https://doi.org/10.18334/ide.4.4.119301
- 22. Chen Y., Yao Y., Wang X., Xu D., Yue C., Liu X., Chen K., Tang H., Liu B. Bookworm game: Automatic discovery of LTE vulnerabilities through documentation analysis. *Proc. of the IEEE Symposium on Security and Privacy (SP)*, 2021, pp. 1197–1214. https://doi. org/10.1109/sp40001.2021.00104

- Ren Z., Ju X., Chen X., Shen H. ProRLearn: boosting prompt tuningbased vulnerability detection by reinforcement learning // Automated Software Engineering. 2024. V. 31. N 2. P. 38. https://doi.org/10.1007/ s10515-024-00438-9
- Hoffmann J. Simulated penetration testing: from "Dijkstra" to "Turing Test++" // Proc. of the 25<sup>th</sup> International Conference on Automated Planning and Scheduling. 2015. V. 25. N 1. P. 364–372. https://doi. org/10.1609/icaps.v25i1.13684
- 25. Dube R. Large Language Models in Information Security Research: A January 2024 Survey: preprint. 2024.
- Ai Z., Luktarhan N., Zhou A., Lv D. Webshell attack detection based on a deep super learner // Symmetry. 2020. V. 12. N 9. P. 1406. https:// doi.org/10.3390/sym12091406
- Esmradi A., Yip D.W., Chan C.F. A Comprehensive Survey of Attack Techniques, Implementation, and Mitigation Strategies in Large Language Models // Communications in Computer and Information Science. 2024. V. 2034. P. 76–95. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1274-8 6
- Gabrys R., Bilinski M., Fugate S., Silva D. Using natural language processing tools to infer adversary techniques and tactics under the Mitre ATT&CK framework // Proc. of the IEEE 14<sup>th</sup> Annual Computing and Communication Workshop and Conference. 2024. P. 541–547. https://doi.org/10.1109/CCWC60891.2024.10427746
- Ebert C., Beck M. Generative Artificial Intelligence for Automotive Cybersecurity // ATZelectronics worldwide. 2024. V. 19. N 1. P. 50– 54. https://doi.org/10.1007/s38314-023-1564-3
- Kanakogi K., Washizaki H., Fukazawa Y., Ogata S., Okubo T., Kato T., Kanuka H., Hazeyama A., Yoshioka N. Tracing CVE Vulnerability Information to CAPEC Attack Patterns Using Natural Language Processing Techniques // Information. 2021. V. 12. N 8. P. 298. https://doi.org/10.3390/info12080298
- Radanliev P., De Roure D., Santos O. Red Teaming Generative AI/ NLP, the BB84 Quantum Cryptography Protocol and the NIST-Approved Quantum-Resistant Cryptographic Algorithms. SSRN Electronic Journal. September 17, 2023. URL: https://ssrn.com/ abstract=4574446 (дата обращения: 01.10.2024).
- 32. Sun Y., Wu D., Xue Y., Liu H., Wang H., Xu Z., Xie X., Liu Y. GPTScan: Detecting Logic Vulnerabilities in Smart Contracts by Combining GPT with Program Analysis // Proc. of the IEEE/ACM 46<sup>th</sup> International Conference on Software Engineering (ICSE 2024). 2024. N 166. P. 1–13. https://doi.org/10.1145/3597503.3639117
- Al-Hawawreh M., Aljuhani A., Jararweh Y. Chatgpt for cybersecurity: practical applications, challenges, and future directions // Cluster Computing. 2023. V. 26. N 6. P. 3421–3436. https://doi.org/10.1007/ s10586-023-04124-5
- 34. Tsingenopoulos I., Preuveneers D., Joosen W. AutoAttacker: A reinforcement learning approach for black-box adversarial attacks // Proc. of the IEEE European Symposium on Security and Privacy Workshops (EuroS&PW). 2019. P. 229–237. https://doi.org/10.1109/ EuroSPW.2019.00032
- Rigaki M., Lukas O., Catania C., Garcia S. Out of the cage: how stochastic parrots win in cyber security environments // Proc. of the 16<sup>th</sup> International Conference on Agents and Artificial Intelligence. 2024. V. 3. P. 774–781. https://doi.org/10.5220/0012391800003636
- 36. Liu B., Xiao B., Jiang X., Cen S., He X., Dou W. Adversarial attacks on large language model-based system and mitigating strategies: A case study on ChatGPT // Security and Communication Networks. 2023. V. 2023. N 1. P. 8691095. https://doi.org/10.1155/2023/8691095
- Campbell M., Jovanovic M. Disinfecting AI: Mitigating Generative AI's Top Risks // Computer. 2024. V. 57. N 5. P. 111–116. https://doi. org/10.1109/MC.2024.3374433
- Намиот Д.Е., Зубарева Е.В. О работе AI Red Team // International Journal of Open Information Technologies. 2023. Т. 11. № 10. Р. 130–139.
- Shi Z., Wang Y., Yin F., Chen X., Chang K., Hsieh C. Red teaming language model detectors with language models // Transactions of the Association for Computational Linguistics. 2024. V. 12. P. 174–189. https://doi.org/10.1162/tacl\_a\_00639
- Alawida M., Mejri S., Mehmood A., Chikhaoui B., Abiodun O. A comprehensive study of ChatGPT: advancements, limitations, and ethical considerations in natural language processing and cybersecurity // Information. 2023. V. 14. N 8. P. 462. https://doi. org/10.3390/info14080462
- Chen Y., Arunasalam A., Celik Z.B. Can large language models provide Security & Privacy advice? measuring the ability of LLms to refute misconceptions//Proc. of the 39th Annual Computer Security Applications Conference. 2023. P. 366–378. https://doi.org/10.1145/3627106.3627196

- Ren Z., Ju X., Chen X., Shen H. ProRLearn: boosting prompt tuningbased vulnerability detection by reinforcement learning. *Automated Software Engineering*, 2024, vol. 31, no. 2, pp. 38. https://doi. org/10.1007/s10515-024-00438-9
- Hoffmann J. Simulated penetration testing "Dijkstra" to "Turing Test++". Proc. of the 25<sup>th</sup> International Conference on Automated Planning and Scheduling, 2015, vol. 25, no. 1, pp. 364–372. https:// doi.org/10.1609/icaps.v25i1.13684
- 25. Dube R. Large Language Models in Information Security Research: A January 2024 Survey. Preprint. 2024.
- Ai Z., Luktarhan N., Zhou A., Lv D. Webshell attack detection based on a deep super learner. *Symmetry*, 2020, vol. 12, no. 9, pp. 1406. https://doi.org/10.3390/sym12091406
- Esmradi A., Yip D.W., Chan C.F. A Comprehensive Survey of Attack Techniques, Implementation, and Mitigation Strategies in Large Language Models. *Communications in Computer and Information Science*, 2024, vol. 2034, pp. 76–95. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1274-8 6
- Gabrys R., Bilinski M., Fugate S., Silva D. Using natural language processing tools to infer adversary techniques and tactics under the Mitre ATT&CK framework. *Proc. of the IEEE 14<sup>th</sup> Annual Computing* and Communication Workshop and Conference, 2024, pp. 541–547. https://doi.org/10.1109/CCWC60891.2024.10427746
- Ebert C., Beck M. Generative Artificial Intelligence for Automotive Cybersecurity. *ATZelectronics worldwide*, 2024, vol. 19, no. 1, pp. 50–54. https://doi.org/10.1007/s38314-023-1564-3
- Hazeyama A., Yoshioka N. Tracing CVE Vulnerability Information to CAPEC Attack Patterns Using Natural Language Processing Techniques. *Information*, 2021, vol. 12, no. 8, pp. 298. https://doi. org/10.3390/info12080298
- Radanliev P., De Roure D., Santos O. Red Teaming Generative AI/ NLP, the BB84 Quantum Cryptography Protocol and the NIST-Approved Quantum-Resistant Cryptographic Algorithms. SSRN Electronic Journal. September 17, 2023. URL: https://ssrn.com/ abstract=4574446 (accessed: 01.10.2024).
- 32. Sun Y., Wu D., Xue Y., Liu H., Wang H., Xu Z., Xie X., Liu Y. GPTScan: Detecting Logic Vulnerabilities in Smart Contracts by Combining GPT with Program Analysis. Proc. of the IEEE/ACM 46th International Conference on Software Engineering (ICSE 2024), 2024, no. 166, pp. 1–13. https://doi.org/10.1145/3597503.3639117
- Al-Hawawreh M., Aljuhani A., Jararweh Y. Chatgpt for cybersecurity: practical applications, challenges, and future directions. *Cluster Computing*, 2023, vol. 26, no. 6, pp. 3421–3436. https://doi. org/10.1007/s10586-023-04124-5
- 34. Tsingenopoulos I., Preuveneers D., Joosen W. AutoAttacker: A reinforcement learning approach for black-box adversarial attacks. *Proc. of the IEEE European Symposium on Security and Privacy Workshops (EuroS&PW)*, 2019, pp. 229–237. https://doi.org/10.1109/ EuroSPW.2019.00032
- Rigaki M., Lukas O., Catania C., Garcia S. Out of the cage: how stochastic parrots win in cyber security environments. *Proc. of the* 16<sup>th</sup> International Conference on Agents and Artificial Intelligence, 2024, vol. 3. pp. 774–781. https://doi.org/10.5220/0012391800003636
- 36. Liu B., Xiao B., Jiang X., Cen S., He X., Dou W. Adversarial attacks on large language model-based system and mitigating strategies: A case study on ChatGPT. Security and Communication Networks, 2023, vol. 2023, no. 1, pp. 8691095. https://doi. org/10.1155/2023/8691095
- Campbell M., Jovanovic M. Disinfecting AI: Mitigating Generative AI's Top Risks. *Computer*, 2024, vol. 57, no. 5, pp. 111–116. https:// doi.org/10.1109/MC.2024.3374433
- Namiot D., Zubareva E. About AI Red Team. *International Journal* of Open Information Technologies, 2023, vol. 11, no. 10, pp. 130–139. (in Russian)
- Shi Z., Wang Y., Yin F., Chen X., Chang K., Hsieh C. Red teaming language model detectors with language models. *Transactions of the Association for Computational Linguistics*, 2024, vol. 12, pp. 174– 189. https://doi.org/10.1162/tacl\_a\_00639
- Alawida M., Mejri S., Mehmood A., Chikhaoui B., Abiodun O. A comprehensive study of ChatGPT: advancements, limitations, and ethical considerations in natural language processing and cybersecurity. *Information*, 2023, vol. 14, no. 8, pp. 462. https://doi. org/10.3390/info14080462
- Chen Y., Arunasalam A., Celik Z.B. Can large language models provide Security & Privacy advice? measuring the ability of LLms to refute misconceptions. *Proc. of the 39th Annual Computer Security*

- 42. Bang Y., Cahyawijaya S., Lee N., Dai W., Su D., Wilie B., Lovenia H., Ji Z., Yu T., Chung W., Do Q.V., Xu Y, Fung P. A Multitask, Multilingual, Multimodal Evaluation of ChatGPT on Reasoning, Hallucination, and Interactivity // Proc. of the 13<sup>th</sup> International Joint Conference on Natural Language Processing and the 3<sup>rd</sup> Conference of the Asia-Pacific Chapter of the Association for Computational Linguistics. 2023. V. 1. P. 675–718. https://doi.org/10.18653/v1/2023. ijcnlp-main.45
- Xie Y., Yi J., Shao J., Curl J., Lyu L., Chen Q., Xie X., Wu F. Defending ChatGPT against jailbreak attack via self-reminders // Nature Machine Intelligence. 2023. V. 5. N 12. P. 1486–1496. https:// doi.org/10.1038/s42256-023-00765-8
- 44. Deng G., Liu Y., Li Y., Wang K., Zhang Y., Li Z., Wang H., Zhang T., Liu Y. MASTERKEY: Automated jailbreaking of large language model Chatbots // Proc. of the Network and Distributed System Security Symposium. 2024. P. 1–16. https://doi.org/10.14722/ ndss.2024.24188
- 45. Schulhoff S., Pinto J., Khan A., Bouchard L., Si C., Anati S., Tagliabue V., Kost A., Carnahan C., Boyd-Graber J. Ignore This Title and HackAPrompt: Exposing Systemic Vulnerabilities of LLMs Through a Global Prompt Hacking Competition // Proc. of the Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. 2023. P. 4945–4977. https://doi.org/10.18653/v1/2023.emnlp-main.302
- 46. Liang H., Li X., Xiao D., Liu J., Zhou Y., Wang A., Li J. Generative Pre-Trained Transformer-Based reinforcement learning for testing Web Application Firewalls // IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing. 2024. V. 21. N 1. P. 309–324. https://doi. org/10.1109/TDSC.2023.3252523
- 47. Серобабов Д.С. Безопасность кода, созданного с помощью Chat GPT: анализ и исправление уязвимостей //Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных: сборник материалов VII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, приуроченной к 110-летию со дня рождения Т.В. Алексеевой, Омск, 20–21 апреля 2023 года. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ). 2023. С. 615–620.
- Gasiba T.E., Oguzhan K., Kessba I., Lechner U., Pinto-Albuquerque M. I'm Sorry Dave, I'm Afraid I Can't Fix Your Code: On ChatGPT, CyberSecurity, and Secure Coding // Proc. of the 4<sup>th</sup> International Computer Programming Education Conference (ICPEC 2023). 2023.
- Lu G., Ju X., Chen X., Pei W., Cai Z. GRACE: Empowering LLMbased software vulnerability detection with graph structure and incontext learning // Journal of Systems and Software. 2024. V. 212. P. 112031. https://doi.org/10.1016/j.jss.2024.112031
- Wang J., Huang Y., Chen C., Liu Z., Wang S., Wang Q. Software testing with Large Language Models: Survey, Landscape, and Vision // IEEE Transactions on Software Engineering. 2024. V. 50. N 4. P. 911–936. https://doi.org/10.1109/TSE.2024.3368208
- Chaudhary P.K. AI, ML, and Large Language Models in cybersecurity // International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science. 2024. V. 6. N 2. P. 2229–2234. https://www.doi.org/10.56726/IRJMETS49546
- Botacin M. GPThreats-3: Is Automatic Malware Generation a Threat? // Proc. of the IEEE Security and Privacy Workshops (SPW). 2023. P.238–254. https://www.doi.org/10.1109/SPW59333.2023.00027

#### Авторы

Конев Антон Александрович — кандидат технических наук, доцент, заместитель директора Института системной интеграции и безопасности, доцент кафедры КИБЭВС, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, 634050, Российская Федерация, вс 23035057200, https://orcid.org/0000-0002-3222-9956, kaa@fb.tusur.ru

**Паюсова Татьяна Игоревна** — доцент, Тюменский государственный университет, Тюмень, 625003, Российская Федерация, sc 57188574761, https://orcid.org/0000-0003-4923-1689, t.i.payusova@ utmn.ru

Статья поступила в редакцию 07.10.2024 Одобрена после рецензирования 02.11.2024 Принята к печати 23.01.2025

CC OS

Applications Conference, 2023, pp. 366-378. https://doi. org/10.1145/3627106.3627196

- 42. Bang Y., Cahyawijaya S., Lee N., Dai W., Su D., Wilie B., Lovenia H., Ji Z., Yu T., Chung W., Do Q.V., Xu Y, Fung P. A Multitask, Multilingual, Multimodal Evaluation of ChatGPT on Reasoning, Hallucination, and Interactivity. Proc. of the 13<sup>th</sup> International Joint Conference on Natural Language Processing and the 3<sup>rd</sup> Conference of the Asia-Pacific Chapter of the Association for Computational Linguistics, 2023, vol. 1, pp. 675–718. https://doi.org/10.18653/ v1/2023.ijcnlp-main.45
- Xie Y., Yi J., Shao J., Curl J., Lyu L., Chen Q., Xie X., Wu F. Defending ChatGPT against jailbreak attack via self-reminders. *Nature Machine Intelligence*, 2023, vol. 5, no. 12, pp. 1486–1496. https://doi.org/10.1038/s42256-023-00765-8
- 44. Deng G., Liu Y., Li Y., Wang K., Zhang Y., Li Z., Wang H., Zhang T., Liu Y. MASTERKEY: Automated jailbreaking of large language model Chatbots. Proc. of the Network and Distributed System Security Symposium, 2024, pp. 1–16. https://doi.org/10.14722/ ndss.2024.24188
- 45. Schulhoff S., Pinto J., Khan A., Bouchard L., Si C., Anati S., Tagliabue V., Kost A., Carnahan C., Boyd-Graber J. Ignore This Title and HackAPrompt: Exposing Systemic Vulnerabilities of LLMs Through a Global Prompt Hacking Competition. *Proc. of the Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*, 2023, pp. 4945–4977. https://doi.org/10.18653/v1/2023.emnlpmain.302
- 46. Liang H., Li X., Xiao D., Liu J., Zhou Y., Wang A., Li J. Generative Pre-Trained Transformer-Based reinforcement learning for testing Web Application Firewalls. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 2024, vol. 21, no. 1, pp. 309–324. https://doi. org/10.1109/TDSC.2023.3252523
- Serobabov D.C., Razumov S.Y. Security of code created using Chat GPT: vulnerability analysis and correction. *Fundamental'nye i* prikladnye issledovanija molodyh uchjonyh, 2023, pp. 615–620. (in Russian)
- Gasiba T.E., Oguzhan K., Kessba I., Lechner U., Pinto-Albuquerque M. I'm Sorry Dave, I'm Afraid I Can't Fix Your Code: On ChatGPT, CyberSecurity, and Secure Coding. Proc. of the 4<sup>th</sup> International Computer Programming Education Conference (ICPEC 2023). 2023.
- Lu G., Ju X., Chen X., Pei W., Cai Z. GRACE: Empowering LLMbased software vulnerability detection with graph structure and incontext learning. *Journal of Systems and Software*, 2024, vol. 212, pp. 112031. https://doi.org/10.1016/j.jss.2024.112031
- Wang J., Huang Y., Chen C., Liu Z., Wang S., Wang Q. Software testing with Large Language Models: Survey, Landscape, and Vision. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 2024, vol. 50, no. 4, pp. 911–936. https://doi.org/10.1109/TSE.2024.3368208
- Chaudhary P.K. AI, ML, and Large Language Models in cybersecurity. International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science, 2024, vol. 6, no. 2, pp. 2229–2234. https:// www.doi.org/10.56726/IRJMETS49546
- Botacin M. GPThreats-3: Is Automatic Malware Generation a Threat? Proc. of the IEEE Security and Privacy Workshops (SPW), 2023, pp. 238–254. https://www.doi.org/10.1109/SPW59333.2023.00027

#### Authors

Anton A. Konev — PhD, Associate Professor, Deputy Director of the Institute of System Integration and Security, Associate Professor of the Department, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, 634050, Russian Federation, Sc 23035057200, https://orcid.org/0000-0002-3222-9956, kaa@fb.tusur.ru

Tatyana I. Payusova — Associate Professor, Tyumen State University, Tyumen, 625003, Russian Federation, Sc 57188574761, https://orcid. org/0000-0003-4923-1689, t.i.payusova@utmn.ru

Received 07.10.2024 Approved after reviewing 02.11.2024 Accepted 23.01.2025

Работа доступна по лицензии Creative Commons «Attribution-NonCommercial» **VİTMO** 

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ январь-февраль 2025 Том 25 № 1 http://ntv.ifmo.ru/ SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS January-February 2025 Vol. 25 No 1 http://ntv.ifmo.ru/en/ ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-53-60

# Usage of polar codes for fixed and random length error bursts correction Andrei A. Ovchinnikov $\boxtimes$

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation mldoc@guap.ru<sup>\influx</sup>, https://orcid.org/0000-0002-8523-9429

#### Abstract

Error correction during data storage, processing, and transmission allows for ensuring data integrity. Channel coding techniques are used to counteract these errors. Noise in real systems is often correlated, whereas traditional coding and decoding approaches are based on decorrelation which in turn reduces the performance limits of channel coding. Polar codes, adopted as a coding scheme in the modern fifth-generation communication standard, demonstrate low error probabilities during decoding in memoryless channels. The current task is to investigate the suitability of polar codes for channels with memory, analyze their burst error-correcting capabilities, and compare them with known errorcorrecting coding methods. To evaluate burst error-correcting capability, the method of calculating the ranks of each submatrix of the parity-check matrix of a fixed-size polar code is used. The burst error-correcting capability of polar codes can be improved through a proposed interleaving procedure. The analysis of the burst error-correcting capability is carried out for short-length polar codes. An analysis of the burst error-correcting capability of polar codes has been performed. A comparison of burst error-correcting capabilities of polar codes with codes defined by random generator matrix, Gilbert codes and low-density parity-check codes was conducted. An analysis of the decoding error probability shows that standard polar code decoding algorithms do not achieve low error probabilities. The same decoding error probability 0.01 as for Gilbert channel is achieved by polar code in binary symmetric channel with an unconditional error probability two times as high. From the analysis, it can be concluded that the burst error-correcting capability of standard polar codes is low. The proposed interleaving approach improves the burst error-correcting capability and allows achieving values close to the Reiger bound. Further research directions may include developing decoding algorithms for polar codes adapted for channels with variable packet lengths

## Keywords

polar codes, channels with memory, Gilbert channel, interleaving

#### Acknowledgements

The paper was prepared with the financial support of the Russian Science Foundation, project No. 22-19-00305 "Spatial-temporal stochastic models of wireless networks with a large number of users".

For citation: Ovchinnikov A.A. Usage of polar codes for fixed and random length error bursts correction. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 1, pp. 53–60. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-53-60

УДК 621.391

# Использование полярных кодов для исправления пакетов ошибок случайной и детерминированной длины

### Андрей Анатольевич Овчинников

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация

mldoc@guap.ru<sup>\Box</sup>, https://orcid.org/0000-0002-8523-9429

#### Аннотация

**Введение.** Исправление ошибок, возникающих при хранении, обработке и передаче данных позволяет обеспечивать их целостность. Для противодействия этим ошибкам используются методы канального кодирования. Возникающий в реальных системах шум часто имеет коррелированный характер, в то время как традиционные подходы к кодированию и декодированию основаны на декорреляции, что приводит к снижению

© Ovchinnikov A.A., 2025

Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2025, том 25, № 1 Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2025, vol. 25, no 1

предельных характеристик канального кодирования. Полярные коды, принятые в качестве схемы кодирования в современном стандарте связи пятого поколения, показывают низкие вероятности ошибки при декодировании в каналах без памяти. Актуальной является задача исследования пригодности полярных кодов для каналов с памятью, анализа их пакетной корректирующей способности, а также сравнение с известными методами помехоустойчивого кодирования. Метод. Для оценки пакетной корректирующей способности использован метод вычисления рангов каждой из подматриц проверочной матрицы полярного кода фиксированного размера. Увеличение пакетной корректирующей способности полярного кода возможно с помощью предложенной процедуры перемежения. Анализ пакетной корректирующей способности полярных кодов проводится для кодов небольшой длины. Основные результаты. Выполнен анализ и сравнение пакетной корректирующей способности полярных кодов с кодами, определяемыми случайной порождающей матрицей, кодами Гилберта и низкоплотностными кодами. Анализ вероятности ошибки декодирования показал, что стандартные алгоритмы декодирования полярных кодов не позволяют достигать малых вероятностей ошибок. Такая же вероятность ошибки декодирования 0,01, как и для канала Гилберта, достигается полярным кодом в двоичном симметричном канале с большей, чем в два раза безусловной вероятностью ошибки. Обсуждение. Результаты исследования показывают, что пакетная корректирующая способность стандартных полярных кодов мала. Предложенный подход с перемежением улучшает пакетную корректирующую способность и позволяет достичь значений, близких к границе Рейгера. Направлением дальнейших исследований может быть разработка алгоритмов декодирования полярных кодов, адаптированных для каналов с длиной пакетов, имеющих случайную длину.

#### Ключевые слова

канал с памятью, канал Гилберта, полярные коды, перемежение

#### Благодарности

Работа подготовлена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-19-00305 «Пространственно-временные стохастические модели беспроводных сетей с большим числом пользователей».

Ссылка для цитирования: Овчинников А.А. Использование полярных кодов для исправления пакетов ошибок случайной и детерминированной длины // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 1. С. 53–60 (на англ. яз.). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-53-60

#### Introduction

Information in the modern world is one of the key resources. The procedures of processing, transmitting, and storing information are often accompanied by the occurrence of errors. These processes are modeled mathematically, and errors are often dependent, leading to the formation of error bursts or memory in the channel. In the absence of error dependence, it is assumed that the channel has no memory. The memory effect in data transmission channels can be caused by various physical characteristics, such as multipath propagation, signal scattering, or the peculiarities of data storage equipment [1]. Among the widely used mathematical models for describing channels with memory are the Gilbert channel, the Gilbert-Elliott channel, and the Rayleigh fading channel with dependent fading, inter-symbol interference channel models, and others. To correct errors, coding theory offers the use of error-correcting codes, which introduce redundancy into the data to enable error detection and correction. Reliability issues, including the introduction of information redundancy, are a crucial task in the development of info communication systems [2, 3].

Polar codes, proposed by Erdal Arikan in 2009 [4], became the first codes with a clear construction capable of asymptotically achieving the capacity of a symmetric channel with simple encoding and decoding procedures. Recently, interest in polar codes has significantly increased due to their inclusion in the fifth-generation wireless communication standard, where they are particularly used for control channel coding. The theoretical analysis of polarization properties for channels with memory has been examined in [5, 6].

This paper will investigate the burst error-correcting capabilities of polar codes, with a focus on their application

in channels with bursts. A comparison of the burst errorcorrecting capabilities of polar codes with other errorcorrecting methods will be presented, along with an analysis of the decoding error probability of polar codes in channels with memory. The results will also be compared with those obtained using other error-correcting methods.

#### **Channels with memory**

Let *X* and *Y* be the alphabets of the input and output symbols of the channel, respectively. This work considers discrete-time channels, i.e., channels where the transmission and reception of messages occur at discrete moments in time. A communication channel is defined by a set of transition probabilities  $p(\mathbf{y}|\mathbf{x})$  for any  $\mathbf{x} \in X$ ,  $\mathbf{y} \in Y$ . Let  $\mathbf{x} = [x_0, ..., x_{N-1}]$  and  $\mathbf{y} = [y_0, ..., y_{N-1}]$ be sequences of length *N* at the input and output of the channel, respectively. The effect of noise in the channel on the transmitted information is described by an error vector  $\mathbf{e}$  such that  $\mathbf{y} = \mathbf{x} + \mathbf{e}$ . Formally, a memoryless channel is defined as a channel for which the following holds [7]:

$$p(\mathbf{y}|\mathbf{x}) = \prod_{i=0}^{N-1} p(y_i|x_i).$$

One common type of memoryless channel is the Binary Symmetric Channel (BSC), described by the transition error probability  $p_e$  with the input and output alphabets  $X = Y = \{0, 1\}$ .

One of the key characteristics of a communication channel is its transmission rate. The channel capacity refers to the maximum data transmission rate at which communication can be reliable, meaning with an arbitrarily low error probability. C. Shannon proved that there exist coding methods that can ensure reliable communication at rates approaching the channel capacity. It was also shown that the capacity of a channel with memory exceeds the capacity of a channel where memory is not accounted for (e.g., when channel decorrelation is applied using interleaving).

As mentioned earlier, in real communication channels, transmission errors are not independent. The causes of dependency between symbols can include the physical properties of the channel, such as signal multipath propagation in fading and scattering channels, the physical principles of information storage, or the organizational structure in data storage systems. The simplest model describing a channel with memory is a two-state channel model. Within the two-state model, one can consider a Markov model, the Gilbert model [8], and the Gilbert-Elliott (GE) model [9].

The GE model was proposed by E. Elliott in 1963 and is a generalization of the Gilbert channel model introduced in 1960. The GE model describes a discrete channel with memory, where the transition to the next state is determined by the previous state. We will use traditional notations for this model, where the GE channel is described by two states: "good" (G) and "bad" (B). In the "good" state, the probability of a bit error in the channel is  $p_G$ , and in the "bad" state, it is  $p_B$ . In the Gilbert model, it is assumed that  $p_G$  is always equal to zero. Let the probability of transitioning from the "good" state to the "bad" state be denoted as  $P_{GB}$ , and the probability of transitioning from the "bad" state to the "good" state as  $P_{BG}$ . The unconditional probabilities of being in states B and G are

$$P_{B} = \frac{P_{GB}}{P_{GB} + P_{BG}}, P_{G} = \frac{P_{BG}}{P_{GB} + P_{BG}}$$

Using the transition probabilities of the GE channel, the unconditional bit error probability can be calculated as:

$$p_e = p_B P_B + p_G P_G = \frac{p_B P_{GB} + p_G P_{BG}}{P_{GB} + P_{BG}}.$$
 (1)

If an infinite-length interleaving procedure is applied to the output of the channel described by the two-state model, a memoryless channel is obtained, which is described by the BSC model with the transition probability (1). Such a channel will hereafter be referred to as equivalent (to the original two-state channel), and the value  $p_e$  will be referred to as the equivalent error probability.

### Burst error-correcting capability of linear codes

In channels with memory, the error vector represents a burst, meaning an error vector in which non-zero elements tend to group together. The article examines bursts of length *l*, defined as vectors in which all non-zero components are located in *l* consecutive positions, with the first and last positions being non-zero. For example, the error vector  $\mathbf{e} = (0, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0)$ represents a burst of length 6. A linear code capable of correcting all error bursts of length *l* or less, but not all bursts of length *l* + 1, is called a code correcting error bursts of length *l*, or a code with a burst error-correcting capability of *l*. When correcting bursts at a given code length *n*, number of information symbols *k*, and burst errorcorrecting capability *l*, the goal is to construct a code (n, k)with the smallest possible redundancy (the number of check symbols) r = n - k. Next, we will establish certain limits on n - k for a given *l* or on *l* for a given n - k [10].

A necessary condition for a linear code (n, k) to correct all error bursts of length *l* or less is that no burst of length 2l or less can be a codeword. The number of check symbols in a linear code (n, k) which contains no bursts of length b or less as codewords, must be at least b (i.e.  $n - k \ge b$ ). The number of check symbols in a code correcting error bursts of length *l* must be at least 2*l*, i.e.,  $n - k \ge 2l$ . For given *n* and *k*, this implies that the burst error-correcting capability of the (n, k) code is no more than  $\lfloor (n-k)/2 \rfloor$ , or  $l \leq \lfloor (n-k)/2 \rfloor$ . This is the upper bound on the burst error-correcting capability of a linear code (n, k), known as the Reiger bound. Codes that meet the Reiger bound are considered optimal. The ratio z = 2l/(n-k) is used as a measure of the burst error-correcting efficiency of the code. An optimal code has a burst error-correcting efficiency of one

The following approach can be used to assess the burst error-correcting capability of a linear code [11]. The burst error-correcting capability of a code with a parity-check matrix **H** is the maximum *l* for which any matrix formed by two submatrices of *l* consecutive columns of **H** has a rank equal to 2l. By successively reducing the value of *l* from  $\lfloor (n - k)/2 \rfloor$  and considering all possible pairs of submatrices, the maximum correctable burst length  $l_{\text{max}}$  can be found with polynomial complexity. From the described procedure, it follows that for a code to correct error bursts of length *l*, the code must not only lack codewords forming bursts of *l* symbols.

Modern communication standards employ various error-correcting code constructions that help ensure reliable data transmission in the presence of noise and distortions. Among the most common are Low-Density Parity-Check (LDPC) codes and polar codes. The error-correcting performance of these constructions has been widely studied for memoryless channels, but the study of the properties of codes and their error-correcting performance in channels with memory is a less developed topic.

The burst error-correcting capability of LDPC codes based on block-permutation construction has been studied in the literature. It is known that for a block-permutation LDPC code with zero blocks, the correctable burst length cannot exceed the block size. The burst errorcorrecting capability of LDPC codes constructed using the Progressive Edge Growth (PEG) algorithm was evaluated in [12]. The burst error identification problem for LDPC codes was investigated in [13]. Decoding of polar codes without channel state information knowledge is considered in [14].

# Polar code and its burst error-correcting capability

Polar codes belong to the class of binary linear block codes. The encoding procedure of polar codes is based on channel polarization, which is described by a linear transformation defined by the matrix  $\mathbf{G} = \mathbf{F}^{\otimes m}$ , where

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$
 is the polarization kernel, and  $\bigotimes m$  denotes  
the *m*-fold Kronecker product of matrix **F** with itself,  
where  $m = \log_2 n$ , and *n* is the length of the codeword of  
the constructed code. A polar code is defined by a set of  
parameters  $(n, k, A_c)$ , where *n* is the codeword length, *k*  
is the number of information symbols, and  $A_c$  is the set  
of "frozen" symbols whose values are predetermined,  
usually equal to zero, with  $|A_c| = n - k, A_c \subset \{0, ..., n - 1\}$ .  
Methods for constructing polar codes are detailed in [15].  
One of the most common approaches to constructing the set  
of frozen symbols is the Polarization Weight (PW) method.  
It should be noted that the well-known Reed-Muller (RM)  
codes from coding theory can also be described as polar  
codes.

The non-systematic encoding of polar codes is described by the expression  $\mathbf{x} = \mathbf{u}\mathbf{G}$ , where  $\mathbf{x}$  is a codeword,  $\mathbf{u}$  is a vector including the information symbols  $(u_i \notin A_c, 1 \le i \le n)$  and "frozen" positions  $(u_i \in A_c, 1 \le i \le n)$ .

The classic method for decoding polar codes is the successive cancellation algorithm which does not provide maximum likelihood decoding and has a relatively high error probability. To reduce the error probability of decoding polar codes, I. Tal and A. Vardy [15] proposed the list decoding algorithm, which involves considering multiple paths at each level of the tree, with the maximum number of paths limited by the algorithm parameter *L*. List decoding with a sufficiently large *L* approaches nearmaximum likelihood decoding.

We will now analyze the burst error-correcting capability of polar codes defined by the matrix  $\mathbf{G}_N = \mathbf{F}^{\otimes n}$ . Fig. 1 shows an example of the generator matrix of a (64, 42) RM code. As can be seen from the figure, the rows of the generator matrix form short-length bursts. Thus, the very procedure for constructing the generator matrix of a polar code results in a structure with low correcting capability for burst errors.

Next, let's consider the possibility of constructing codes with improved burst error-correcting capability based on the polar code structure. We apply a random interleaving procedure, defined by the random permutation of the columns of the polar code generator matrix, resulting in a code referred to as equivalent to the polar code. It is known that switching to an equivalent code via interleaving



Fig. 1. Example of a generator matrix of a (64, 42) polar code

preserves the code minimum distance (i.e., does not alter its ability to correct independent errors), but it can significantly impact the value of  $l_{max}$ . Fig. 2 presents the results of calculating the burst error-correcting capability of the RM code, which is a special case of a polar code, with length n = 64 and various values of  $r = \{22, 42, 57\}$ .

The figure also shows a line corresponding to the Reiger bound. The burst error-correcting capability for the original code without interleaving is depicted in the figure with the symbol " $\circ$ ", and for the interleaved codes with the symbol "\*". As can be seen from the figure, interleaving increases the burst error-correcting capability and yields codes with  $l_{\text{max}}$  values close to the Reiger bound and with greater efficiency *z*.

# Comparative analysis of burst error-correcting capability of code constructions

In this section, we compare the burst error-correcting capability of polar codes (RM and PW constructions), their equivalent codes, and several other code constructions: codes defined by a random generator matrix, Gilbert codes specified by a  $(2 \times 3)$  block-permutation parity-check matrix, and LDPC codes constructed using PEG algorithm. Similar to polar codes, we also consider equivalent codes for these constructions. To build equivalent codes, samples of 100 random permutations was generated.

Fig. 3 shows the burst error-correcting capability for random codes and Gilbert codes. For clarity, only some of the results for equivalent codes are displayed in the figures. Since a code equivalent to a random code is still a random code, we observe a small scatter of  $l_{\text{max}}$  values in Fig. 3, *a*. It is worth noting that random linear codes are located near the Reiger bound. Fig. 3, *b* shows the results for Gilbert codes. The considered Gilbert codes lie on the Reiger bound, as confirmed by the experiments. Their equivalent codes disrupt the block-permutation structure, leading to a sharp decrease in burst error-correcting capability.

Fig. 4 shows the results for the PEG construction and Reed-Muller codes. The burst error-correcting capability of PEG codes is quite close to the Reiger bound. In rare



*Fig. 2.* Burst error-correcting capability of the Reed-Muller code and equivalent codes



Fig. 3. Estimates of burst error-correcting capability for (a) codes defined by a random generator matrix and (b) Gilbert codes



*Fig. 4.* Estimates of burst error-correcting capability for (*a*) low-density codes based on the PEG construction and (*b*) Reed-Muller codes with n = 128

cases, equivalent codes slightly increase the length of the correctable burst, but more often, interleaving degrades the burst error-correcting capability. Reed-Muller codes, as noted earlier, exhibit extremely low  $l_{\rm max}$  values, but these can be significantly increased through interleaving.

Fig. 5, a presents the results for the PW polar code construction. The results are similar to those of RM codes in Fig. 4, b.

Fig. 5, *b* provides comparative results for all the considered constructions with parameters n = 128, k = 64 (results for codes with other parameters are similar). As can be seen from the figure, while polar codes initially have an extremely low correctable burst length, they can be improved with interleaving. The resulting equivalent polar codes have a burst error-correcting capability comparable to other constructions and are close to the Reiger bound.

It should be noted that existing decoding methods for polar codes are tailored to their structure and cannot be applied to equivalent codes. Thus, the obtained results enable the construction of error-correcting codes based on polar codes that can be effectively used for correcting single burst errors. However, decoding such codes remains an open challenge, or general burst error-correcting algorithms may need to be applied [16].

# Experimental results of polar codes error correction capability in channels with memory

In the previous section, we compared various code constructions based on their burst error-correcting capability. Maximizing burst error-correcting capability is useful when the channel does not produce bursts longer or more severe than the code can correct. However, in many channel models with memory, including the GE channel model with two states, burst length and burst severity are random variables. For this reason, burst errorcorrecting capability is an indirect characteristic describing the code error-correcting properties. Therefore, we will analyze the decoding error probability of polar codes with various decoding parameters in the Gilbert channel. Using simulation, we will compare the obtained error probability estimates with the error probability in a BSC with a



*Fig. 5.* Estimates of burst error-correcting capability for n = 128 (*a*) Polarization Weight polar codes and (*b*) comparing different constructions

transition probability equivalent to the error probability  $p_e$  (1). The decoding of polar codes is performed using the CRC-Aided Successive Cancellation List (CA-SCL) algorithm with a list size *L* and a CRC polynomial  $\mathbf{g}_{crc} = x^8 + x^7 + x^6 + x^4 + x^2 + 1$ . The PW procedure is used to construct the polar code.

We will examine the decoding error probability as a function of the equivalent bit error probability  $p_e$  in the channel. The values of  $p_e$  will be obtained by fixing the parameters  $P_{GB} = 0.01$ ,  $p_G = 0$ , and  $p_B = 0.5$  in equation (1), and varying  $P_{BG}$ . These simulation parameters correspond to the use of a Gilbert channel. Fig. 6 shows the decoding error probability with list size L = 8 for a polar code with parameters n = 256, k = 128 in the Gilbert channel (G) and the BSC with corresponding values of  $p_e$ . Dotted curves are also presented, showing the probability that the burst length b generated by the channel will exceed the burst error-correcting capability. Let us denote the burst error-correcting capability of the code, according



*Fig. 6.* Comparison of decoding error probability for a polar code with n = 256, k = 128 and different list sizes *L* in the Gilbert channel and BSC

to the Reiger bound, as  $b_R$ . Let the burst error-correcting capability calculated using the algorithm described in [11] be denoted as  $b_P$ . Then, the probabilities that the burst length generated by the channel will exceed the respective burst error-correcting capabilities  $b_R$  and  $b_P$  are denoted as  $\Pr(b > b_R)$  and  $\Pr(b > b_P)$ .

Although at high error probability intervals, decoding in the BSC lags behind in terms of error probability compared to the Gilbert channel, the error probabilities in this range are quite high (close to one). As the equivalent error probability decreases, the BSC results significantly outperform those for the Gilbert channel. It is important to consider that the BSC simulation with transition probability (1) assumes infinite-length interleaving, and with a limited buffer size, error probabilities would be higher. Overall, it can be concluded that polar codes traditionally used with the classic decoder perform poorly in the presence of error bursts. This conclusion is consistent with the analysis of the burst error-correcting capability of polar codes. Moreover, as indicated by the results of the dotted curves, i.e., the probability that the burst length in the channel exceeds the burst error-correcting capability, even if the decoder were correcting bursts, in channels with random burst lengths, this would not ensure low decoding error probability due to the high probability of exceeding the burst-correcting limit. This means that in special channels with fixed burst lengths, burst error-correcting capability needs to be increased (for which interleaving was proposed). However, in channels with random burst lengths, this is insufficient, and a decoder is needed that not only corrects bursts but also corrects error patterns specific to Gilbert and GE channels.

Fig. 7 show the decoding error probability graphs for polar codes with lengths n = 64 and n = 256 and rates  $R = \{1/4, 1/2, 3/4\}$ . The list size used for decoding is L = 8. The results obtained at rates 1/4 and 3/4 generally correspond to those obtained earlier for rate 1/2, as shown in Fig. 6.



*Fig.* 7. Decoding error probability for: n = 64 (*a*); n = 256 (*b*)

### Conclusion

In this study, we evaluated the burst error-correcting capabilities of polar codes in channels with memory and compared them to other error-correcting coding methods. Our analysis revealed that, while standard polar codes exhibit low burst error-correcting performance, this limitation can be significantly improved by applying an interleaving procedure. The proposed interleaving method

#### References

- Lin S., Li J. Fundamentals of Classical and Modern Error-Correcting Codes. Cambridge University Press, 2022, 840 p. https://doi. org/10.1017/9781009067928
- Bogatyrev A.V., Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V. The probability of timeliness of a fully connected exchange in a redundant real-time communication system. Proc. of the International Conference Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2020), 2020, pp. 1–4. https://doi.org/10.1109/ WECONF48837.2020.9131517
- Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V., Bogatyrev S.V. Multipath transmission of heterogeneous traffic in acceptable delays with packet replication and destruction of expired replicas in the nodes that make up the path. *Communications in Computer and Information Science*, 2023, vol. 1748. pp. 104–121. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30648-8 9
- Arikan E. Channel polarization: A method for constructing capacityachieving codes for symmetric binary-input memoryless channels. *IEEE Transactions on information Theory*, 2009, vol. 55, no. 7, pp. 3051–3073. https://doi.org/10.1109/TIT.2009.2021379
- Wang R., Honda J., Yamamoto H., Liu R., Hou Y. Construction of polar codes for channels with memory. *Proc. of the 2015 IEEE Information Theory Workshop — Fall (ITW)*, 2015, pp. 187–191. https://doi.org/10.1109/ITWF.2015.7360760
- Şaşoğlu, E., Tal I. Polar coding for processes with memory. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2019, vol. 65, no. 4, pp. 1994–2003. https://doi.org/10.1109/TIT.2018.2885797
- Proakis J.G., Manolakis D.G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications. Pearson, 2021, 1033 p.
- Gilbert E.N. Capacity of a burst-noise channel. *The Bell System Technical Journal*, 1960, vol. 39, no. 5, pp. 1253–1265. https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1960.tb03959.x
- Elliott E.O. Estimates of error rates for codes on burst-noise channels. *The Bell System Technical Journal*, 1963, vol. 42, no. 5 pp. 1977– 1997. https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1963.tb00955.x
- Moon T.K. Error Correction Coding: Mathematical Methods and Algorithms. Wiley, 2021, 992 p.
- Krouk E.A., Ovchinnikov A.A. Exact Burst-Correction Capability of Gilbert Codes. Informatsionno-upravliaiushchie sistemy, 2016,

enhances the error-correcting capability, bringing it closer to the Reiger bound. Additionally, we found that traditional polar code decoding algorithms do not perform well in channels with correlated noise. These results highlight the need for further research into decoding algorithms specifically adapted for channels with memory and variable packet lengths, aiming to optimize error correction in practical scenarios where noise is not memoryless.

#### Литература

- Lin S., Li J. Fundamentals of Classical and Modern Error-Correcting Codes. Cambridge University Press, 2022. 840 p. https://doi. org/10.1017/9781009067928
- Bogatyrev A.V., Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V. The probability of timeliness of a fully connected exchange in a redundant real-time communication system // Proc. of the International Conference Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2020). 2020. P. 1–4. https://doi.org/10.1109/ WECONF48837.2020.9131517
- Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V., Bogatyrev S.V. Multipath transmission of heterogeneous traffic in acceptable delays with packet replication and destruction of expired replicas in the nodes that make up the path // Communications in Computer and Information Science. 2023. V. 1748. P. 104–121. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30648-8\_9
- Arikan E. Channel polarization: A method for constructing capacityachieving codes for symmetric binary-input memoryless channels // IEEE Transactions on information Theory. 2009. V. 55. N 7. P. 3051– 3073. https://doi.org/10.1109/TIT.2009.2021379
- Wang R., Honda J., Yamamoto H., Liu R., Hou Y. Construction of polar codes for channels with memory // Proc. of the 2015 IEEE Information Theory Workshop – Fall (ITW). 2015. P. 187–191. https://doi.org/10.1109/ITWF.2015.7360760
- Şaşoğlu, E., Tal I. Polar coding for processes with memory // IEEE Transactions on Information Theory. 2019. V. 65. N 4. P. 1994–2003. https://doi.org/10.1109/TIT.2018.2885797
- Proakis J.G., Manolakis D.G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications. Pearson, 2021. 1033 p.
- Gilbert E.N. Capacity of a burst-noise channel // The Bell system technical journal. 1960. V. 39. N 5. P. 1253–1265. https://doi. org/10.1002/j.1538-7305.1960.tb03959.x
- Elliott E.O. Estimates of error rates for codes on burst-noise channels // The Bell System Technical Journal. 1963. V. 42. N 5. P. 1977–1997. https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1963.tb00955.x
- Moon T.K. Error Correction Coding: Mathematical Methods and Algorithms. Wiley, 2021. 992 p.
- Крук Е.А., Овчинников А.А. Точная корректирующая способность кодов Гилберта при исправлении пакетов ошибок //

no. 1 (80), pp. 80–87 (in Russian). https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2016.1.80

- Ovchinnikov A., Veresova A., Fominykh A. Usage of LDPC codes in a Gilbert channel. *Proceedings of Telecommunication Universities*, 2022, vol. 8, no. 4, pp. 55–63. https://doi.org/10.31854/1813-324X-2022-8-4-55-63
- Li L., Lv J., Li Y., Dai X., Wang X. Burst error identification method for LDPC coded systems. *IEEE Communications Letters*, 2024, vol. 28, no. 7, pp. 1489–1493. https://doi.org/10.1109/ LCOMM.2024.3391826
- Fang Y., Chen J. Decoding polar codes for a generalized Gilbert-Elliott channel with unknown parameter. *IEEE Transactions on Communications*. 2021, vol. 69, no. 10, pp. 6455–6468. https://doi. org/10.1109/TCOMM.2021.3095195
- Tal I., Vardy A. How to construct polar codes. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2013, vol. 59, no. 10, pp. 6562–6582. https://doi.org/10.1109/TIT.2013.2272694
- Isaeva M.N., Ovchinnikov A.A. Correction of single error bursts beyond the code correction capability using information sets. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 1, pp. 70–80 (in Russian). https://doi.org/10.17586/2226-1494-2024-24-1-70-80

#### Author

Andrei A. Ovchinnikov — PhD, Associate Professor, Associate Professor, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation, Sc 57207711162, https://orcid.org/0000-0002-8523-9429, mldoc@guap.ru

Информационно-управляющие системы. 2016. № 1 (80). С. 80–87. https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2016.1.80

- Ovchinnikov A., Veresova A., Fominykh A. Usage of LDPC codes in a Gilbert channel // Proceedings of Telecommunication Universities. 2022. V. 8. N 4. P. 55–63. https://doi.org/10.31854/1813-324X-2022-8-4-55-63
- Li L., Lv J., Li Y., Dai X., Wang X. Burst error identification method for LDPC coded systems // IEEE Communications Letters. 2024.
   V. 28. N 7. P. 1489–1493. https://doi.org/10.1109/ LCOMM.2024.3391826
- Fang Y., Chen J. Decoding polar codes for a generalized Gilbert-Elliott channel with unknown parameter // IEEE Transactions on Communications. 2021. V. 69. N 10. P. 6455–6468. https://doi. org/10.1109/TCOMM.2021.3095195
- Tal I., Vardy A. How to construct polar codes // IEEE Transactions on Information Theory. 2013. V. 59. N 10. P. 6562–6582. https://doi. org/10.1109/TIT.2013.2272694
- Исаева М.Н., Овчинников А.А. Исправление одиночных пакетов ошибок за пределами корректирующей способности кода с использованием информационных совокупностей // Научнотехнический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24. № 1. С. 70–80. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2024-24-1-70-80

#### Автор

**Овчинников Андрей Анатольевич** — кандидат технических наук, доцент, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация, *sc* 57207711162, https://orcid.org/0000-0002-8523-9429, mldoc@guap.ru

Received 03.10.2024 Approved after reviewing 11.12.2024 Accepted 22.01.2025 Статья поступила в редакцию 03.10.2024 Одобрена после рецензирования 11.12.2024 Принята к печати 22.01.2025



Работа доступна по лицензии Creative Commons «Attribution-NonCommercial» **I/İTMO** 

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ январь-февраль 2025 Том 25 № 1 http://ntv.ifmo.ru/ SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS January-February 2025 Vol. 25 No 1 http://ntv.ifmo.ru/en/ ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКІ

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-61-67

# Efficient sparse retrieval through embedding-based inverted index construction Viacheslav Yu. Dobrynin<sup>1⊠</sup>, Roman K. Abramovich<sup>2</sup>, Alexey V. Platonov<sup>3</sup>

1,2,3 ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

<sup>1</sup> Shift Lab LTD, London, W3 7XS, Great Britain

<sup>2</sup> Payler Ltd, London, E14 4QA, Great Britain

<sup>1</sup> vidobrynin@itmo.ru<sup>\equiv</sup>, https://orcid.org/0009-0004-3056-8403

<sup>2</sup> asmetliness24237@gmail.com, https://orcid.org/0009-0005-5397-2772

<sup>3</sup> avplatonov@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-8485-1296

## Abstract

Modern search engines use a two-stage architecture for efficient and high-quality search over large volumes of data. In the first stage, simple and fast algorithms like BM25 are applied, while in the second stage, more precise but resourceintensive methods methods, such as deep neural networks, are employed. Although this approach yields good results, it is fundamentally limited in quality due to the vocabulary mismatch problem inherent in the simple algorithms of the first stage. To address this issue, we propose an algorithm for constructing an inverted index using vector representations combining the advantages of both stages: the efficiency of the inverted index and the high search quality of vector models. In our work, we suggest creating a vector index that preserves the various semantic meanings of vocabulary tokens. For each token, we identify the documents in which it is used, and then cluster its contextualized embeddings. The centroids of the resulting clusters represent different semantic meanings of the tokens. This process forms an extended vocabulary which is used to build the inverted index. During index construction, similarity scores between each semantic meaning of a token and documents are calculated which are then used in the search process. This approach reduces the number of computations required for similarity estimation in real-time. Searching the inverted index first requires finding keys in the vector index, helping to solve the vocabulary mismatch problem. The operation of the algorithm is demonstrated on a search task within the SciFact dataset. It is shown that the proposed method achieves high search quality with low memory requirements. The proposed algorithm demonstrates high search quality, while maintaining a compact vector index whose size remains constant and depends only on the size of the vocabulary. The main drawback of the algorithm is the need to use a deep neural network to generate vector representations of queries during the search process which slows down this stage. Finding ways to address this issue and accelerate the search process represents a direction for future research.

# Keywords

inverted index, vocabulary mismatch problem, neural networks, vector representations, clusterization

For citation: Dobrynin V.Yu., Abramovich R.K., Platonov A.V. Efficient sparse retrieval through embedding-based inverted index construction. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 1, pp. 61–67 doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-61-67

УДК 004.89

# Эффективный разреженный поиск с помощью построения инвертированного индекса на основе эмбеддингов Вячеслав Юрьевич Добрынин<sup>1</sup>⊠, Роман Константинович Абрамович<sup>2</sup>, Алексей Владимирович Платонов<sup>3</sup>

1,2,3 Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

<sup>1</sup> Shift Lab LTD, Лондон, W3 7XS, Великобритания

<sup>1</sup> vidobrynin@itmo.ru<sup>\Box</sup>, https://orcid.org/0009-0004-3056-8403

<sup>2</sup> asmetliness24237@gmail.com, https://orcid.org/0009-0005-5397-2772

<sup>3</sup> avplatonov@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-8485-1296

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Payler Ltd, Лондон, E14 4QA, Великобритания

<sup>©</sup> Dobrynin V.Yu., Abramovich R.K., Platonov A.V., 2025

# Аннотация

Введение. Современные поисковые системы используют двухэтапную архитектуру для эффективного и качественного поиска по большим объемам данных. На первом этапе применяются простые и быстрые алгоритмы, такие как ВМ25, а на втором — более точные, но ресурсоемкие методы, например глубокие нейронные сети. Несмотря на то, что такой подход показывает хорошие результаты, он фундаментально ограничен по качеству из-за проблемы несовпадения словарей, что присуще простым алгоритмам первого этапа. Метод. Для решения проблемы ограничений качества поиска, в настоящей работе предлагается алгоритм построения инвертированного индекса с использованием векторных представлений. Представленный подход объединяет преимущества обоих этапов: эффективность инвертированного индекса и высокое качество поиска при использовании векторных моделей. Предложено создание векторного индекса, сохраняющего различные семантические значения токенов словаря. Для каждого токена определяются документы, в которых он используется, после чего его контекстуализированные эмбеддинги кластеризуются. Центроиды полученных кластеров представляют различные семантические значения токенов. Таким образом, формируется расширенный словарь, который применяется для построения инвертированного индекса. При построении индекса вычисляются оценки близости между каждым семантическим значением токена и документами, что затем используется в процессе поиска. Это позволяет сократить количество вычислений для оценки близости в режиме реального времени. Поиск по инвертированному индексу требует нахождения ключей в векторном индексе, что позволяет решить проблему несовпадения словарей. Основные результаты. Работа алгоритма продемонстрирована на задаче поиска в наборе данных SciFact. Показано, что предлагаемый метод обеспечивает высокое качество поиска при низких требованиях к объему памяти. Обсуждение. Разработанный алгоритм демонстрирует высокое качество поиска, при этом он поддерживает компактный векторный индекс, размер которого остается неизменным и определяется исключительно размерами словаря. Основным недостатком алгоритма является необходимость использования глубокой нейронной сети для генерации векторных представлений запроса в процессе поиска, что замедляет этот этап. Поиск путей для решения данной проблемы и сокращения времени поиска представляет собой направление дальнейших исследований.

#### Ключевые слова

инвертированный индекс, проблема несоответствия словарей, нейронные сети, векторные представления, кластеризация

Ссылка для цитирования: Добрынин В.Ю., Абрамович Р.К., Платонов А.В. Эффективный разреженный поиск с помощью построения инвертированного индекса на основе эмбеддингов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 1. С. 61–67 (на англ. яз.). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-61-67

#### Introduction

Modern search systems typically use a two-stage architecture to balance between speed and search quality while working with massive volumes of data such as the entire Internet. At the first stage, simple and fast algorithms are used to reduce the number of candidates to hundreds or thousands. At the second stage, these candidate documents are re-ranked using more complex models that provide high-quality results but require by an order of magnitude more processing power. Consequently, those models cannot be efficiently applied to the entire dataset due to performance constraints. However, this approach has limitations in search quality, as the algorithm at the first stage can miss relevant documents by not accounting for the semantics of the texts.

nd-to-end solutions, such as Contextualized Late Interaction over Bidirectional Encoder Representations from Transformers (BERT) (ColBERT), implement search using a single stage, allowing for significantly improved search quality. For example, Best Matching 25 (BM25), which is often used as a first-stage ranking model, achieves a Mean Reciprocal Rank (MRR)@10 of 19.5 on the Microsoft Machine Reading Comprehension (MS MARCO) dataset, whereas ColBERT (end-to-end) achieves an MRR@10 of 36.7 [1]. The main innovation in the ColBERT architecture is the late interaction mechanism which independently encodes query and document tokens into vector representations that are used for computing relevance scores. This approach allows us to independently pre-compute document embeddings at the offline stage and store them in a vector index for further retrieval. However, it also requires a significant amount of resources to store the indexed documents and process incoming queries, making it challenging to apply to large-scale datasets.

To address this problem, we propose implementing a single-stage architecture algorithm that uses an inverted index as the primary structure for indexing and searching. However, unlike classical approaches like BM25, our method constructs an inverted index using deep neural networks, allowing for a more precise capture of the context of tokens and their relevance to the documents.

In this paper, we present a new method that leverages the efficiency of an inverted index while maintaining the search quality of vector models. Our approach combines the advantages of inverted index structure with the scoring provided by deep learning models that deeply understand token semantics.

#### **Related works**

The Sparse Neural Ranking Model (SNRM), introduced by Zamani et al. in 2018 [2], was one of the first works that tried to integrate deep neural networks with traditional inverted indexing. By using sparsity constraints, SNRM is trained to generate high-dimensional sparse embeddings for both queries and documents, which can be later used to construct an inverted index. This model was able to significantly improve search quality, but, at the same time, it has certain limitations related to its architecture, such as loss of token interpretability, fixed dimensionality of output vectors, and the need to process queries through the model which significantly increases computational resources at query time.

SparTerm, introduced by Bai et al. in 2020 [3], was designed to improve traditional sparse term-based representations by using deep models like BERT [4]. By generating dense contextualized embeddings that capture the semantics of each term and using a gating controller to sparsify the resulting vectors, SparTerm is able to construct an inverted index using original vocabulary terms. By doing so, SparTerm improves semantic matching in the inverted index, while keeping the interpretability and efficiency of classical methods.

The Sparse Lexical And Expansion (SPLADE) model by Formal et al. [5], builds upon SparTerm by simplifying its architecture. The main idea is that instead of using a gating controller to achieve sparsity, the authors would employ a log-saturation function and a sparsifying regularization at the training stage to induce sparsity in the output vectors, thus addressing one of the key limitations of SparTerm, allowing for end-to-end training and reducing computational complexity.

ColBERT [1] and ColBERTv2 [6] can be considered an alternative approach to generating sparse vectors, as instead of building an inverted index, it focuses on algorithmic optimizations to reduce computational resources required for search. In this work, the authors introduce the concept of "late interaction" which separates the encoding of queries and documents from computing relevance scores between them. By employing an Approximate Nearest Neighbor (ANN) index with the Facebook AI Similarity Search [7] library and vector compression techniques like Product Quantization [8], combined with offline indexing, ColBERT allows for significantly reducing resources required for storing and processing search queries. However, despite achieving high search quality and requiring significantly fewer resources than traditional vector search methods, ColBERT still requires more computational resources during query time and greater storage space for document embeddings than inverted index models.

The model SparseEmbed [9] was inspired by both SPLADE and ColBERT. By generating sparse vectors using the same approach as SPLADE and storing dense embeddings for each input token, SparseEmbed constructs an inverted index with original vocabulary terms, where the values stored in the index are the dense representations of the tokens. At search time, it uses dense embeddings of activated tokens to compute relevance scores efficiently. This approach improves context capture compared to SPLADE by using dense representations and is more efficient than ColBERT as it requires linear time relative to the number of activated terms rather than quadratic time. SparseEmbed achieved an MRR@10 score of 39.2 on the MS MARCO dataset, which is slightly the score of 39.7 achieved by ColBERTv2. However, it still requires storing dense vectors for each token and document and computing contextualized embeddings at query time, increasing the computational resources needed during search.

The work Sparse Transformer Matching (SPARTA) [10] offers an efficient neural ranking method that addresses

the limitations of dense vector search in open-domain question answering. Unlike similar models that rely entirely on dense embeddings, SPARTA learns sparse representations that can be implemented as an inverted index, allowing for scalable retrieval without the need for expensive ANN search. SPARTA captures finegrained relevance information by focusing on token-level interactions between queries and documents, allowing for high-quality matching while maintaining efficiency. This approach significantly improves retrieval performance compared to dense models and achieves state-of-the-art results across multiple open-domain question answering tasks.

This paper is a continuation of the algorithm proposed in [11]. The main improvement is in the way we select contextualized embeddings from documents. Instead of computing context based on a sliding window algorithm as in our earlier approach, we now utilize contextualized vector representations of tokens within the entire document. This change allows us to perform more effective clustering and capture different semantic meanings of words. By constructing an inverted index using these embeddings, we address the resource-intensive computations required during search, achieving efficiency comparable to traditional methods while capturing the semantic richness highlighted in models like SPARTA and SPLADE.

In the next sections we describe the whole algorithm with the new upgrades.

# **Description of the Proposed Algorithm**

The usage of transformer models allows for significantly improved search quality due to their ability to capture complex semantic relationships between tokens in the text. However, these models also require substantial computational resources, making them far less practical to use directly in large-scale search systems.

In contrast, the usage of inverted indexes is a standard practice in modern production search systems due to their scalability, high performance, and relatively low memory usage.

Inverted indexes are able to efficiently retrieve documents based on exact query term matching, however, when queries and documents use different words with similar meanings, traditional inverted indexes fail to retrieve relevant documents, which is known as the vocabulary mismatch problem.

To address this problem, we propose a novel method of inverted index construction, where the index terms are selected based on their semantic similarity, rather than exact term matching. By doing so, we aim to resolve the vocabulary mismatch problem by incorporating semantic understanding into the index building process.

Our method involves training a compact vector index that contains embeddings representing different semantic meanings for each token in the vocabulary. To generate these embeddings, we cluster the contextualized token embeddings across all documents in the dataset. This allows us to capture the various contexts in which a token appears, effectively representing its multiple semantic meanings.

# **Index construction**

As search systems face the requirement to work with massive data volumes, the efficient implementation of the indexing stage is a crucial concern. Caching is one of the most common optimization techniques to speed up data processing, and the one that we adopted to optimize our indexing algorithm.

As we build both a compact vector index and an inverted index using vector representations extracted from documents, it is a logical step to cache those representations for both processes. Our vector representations are obtained using a deep neural network based on the transformer architecture. More specifically, it is a bidirectional encoder that considers each token context by looking at both preceding and following tokens. This allows for a deeper semantic understanding of words depending on their context, which is a critical factor for calculating the relevance score between tokens and documents.

The result of this preparation stage is a collection that contains mappings of document identifiers to their corresponding contextualized embeddings, represented as pairs (*doc\_id*, *contextualized\_embs*), which is later used for obtaining semantic clusters for tokens, building a vector index and an inverted index.

The index construction is divided into two main stages: first, we use vector representations and clustering to build an expanded vocabulary that captures different semantic contexts of tokens, and second, we use this expanded vocabulary to construct the inverted index.

The core idea of the proposed approach is to construct a fixed Hierarchical Navigable Small World (HNSW) [12] index that contains vector representations of all vocabulary tokens in their various semantic contexts across indexed documents. This index allows us to efficiently distinct different token contexts at both indexing and query time. Since a token can have multiple meanings depending on its usage, capturing these variations is essential for semantic search.

The first step is quite similar to building a classical inverted index. For each token, we collect and store all the document ids in which this token appears, ending up with a map of token id to the list of document ids. This collection will later be used to gather contextualized embeddings for each token across different contexts.

Then, for each token in the map, the following steps are performed:

- 1. Collect Contextualized Embeddings from all the documents that the token appears in. As the token might have different semantic meanings based on the context, by collecting token embeddings from all documents we make sure to account for all of them. At this step, we use the (*doc\_id*, *contextualized\_embs*) map prepared at the preparation step to speed up the process and avoid re-calculating embeddings for each document over and over.
- 2. **Clustering:** As soon as we have all token embeddings from each document it appears in, we perform clustering on these embeddings using the *k*-means++ algorithm [13]. As a result, we get a small set of cluster centroids that group similar embeddings and represent different semantic meanings that this token has.

3. Store semantic centroids: Finally, we store the resulting centroids to the HNSW index, where they can be later used for building an inverted index. With each centroid, we also store the associated metadata required for further steps: a source token and a unique cluster identifier (*token\_id*, *cluster\_id*).

This process is depicted in Fig. 1.

The constructed HNSW index enables efficient nearest neighbor search based on semantic similarity during both indexing and query processing. By using those centroids to build an inverted index we address the vocabulary mismatch problem and allow for a search based on semantics and thus more agile, but still interpretable as we save corresponding token and cluster identifiers with each embedding in both vector and inverted index.

At this step, we combine the results from all the previous steps in order to construct the inverted index.

To do so, we iterate over the collection of document ids mapped to their contextualized embeddings generated at the preparation step. For each contextualized token embedding e in the document, we search for its nearest semantic centroids from the HNSW index built at the previous step.

The relevance score between contextualized embeddings of a document and retrieved semantic centroids is calculated using the MaxSim operator as defined in [1]. Thus, in our work, most of the computations of the "late interaction" mechanism are performed at the indexing stage, which speeds up the search process compared to ColBERT. Finally, these relevance scores are then stored in the inverted index along with the document ids, where the keys are represented as pairs of token and cluster identifiers (*token id*, *cluster id*).

The whole inverted index construction process is presented in Fig. 2.

This algorithm allows us to effectively expand the vocabulary of the inverted index based on a deep semantic understanding of the source texts. The vocabulary mismatch problem is addressed by searching for nearest semantic clusters for each token, allowing for including semantic clusters from different tokens to the resulting posting list even if they do not appear in the document. The inverted index remains efficient and interpretable, as it still relies on tokens from the original vocabulary augmented with cluster identifiers representing different semantic meanings.

| H           | INSW                        |  |  |
|-------------|-----------------------------|--|--|
| [token:clus | [token:cluster_id:centroid] |  |  |
|             | centroids                   |  |  |
| k-          | means                       |  |  |
|             | contextualized_embs         |  |  |
| doc_id      | contextualized_embs         |  |  |
|             |                             |  |  |
|             | doc_ids                     |  |  |
| token       | doc_ids                     |  |  |
|             |                             |  |  |

Fig. 1. Vector index construction process



Fig. 2. Inverted index construction process

## Search process

The search process begins by encoding the query with the same encoder used at the indexing stage (e.g., a pretrained transformer model like BERT). Then, for each contextualized embedding of the query tokens, we use a vector index to search for the nearest neighbor tokens. These nearest tokens represent the semantic variations of the query tokens captured during the clustering step.

The retrieved tokens and cluster ids are then used to look up the list of documents and their associated scores from the inverted index. These scores represent the relevance between the document and the semantic cluster of the token.

To compute the overall relevance score for each document, we aggregate the scores from all matching tokens by summing them:

$$score_{query,doc} = \Sigma_{token \in query} \Sigma_{cluster id} score_{token:cluster id,doc}$$

where  $score_{token:cluster_id,doc}$  is the relevance score between the document and the specific semantic variation of the token.

Finally, we sort the documents in descending order based on their aggregated scores. This results in a ranked list of documents ordered by their relevance to the query. This method leverages the semantic understanding captured during the indexing process, allowing for effective retrieval even when there is a vocabulary mismatch between the query and the documents.

The search process is presented in Fig. 3.

#### **Evaluation of the Proposed Algorithm**

To train our model, we performed a *k*-means clustering on 300,000 documents from the widely-used ranking dataset MS MARCO [14] passages. The evaluation was done using the Benchmarking Information Retrieval (BIER) framework [15] which provides a variety of datasets and metrics for assessing the quality of search systems. As a dataset for rapid quality validation, we selected the SciFact dataset containing approximately 5,000 documents.



Fig. 3. Search process for a given query

The BIER framework provides several standard metrics that can be used to evaluate search quality, such as Normalized Discounted Cumulative Gain (NDCG), Mean Average Precision, MRR, Precision and Recall, etc. To assess our model, we've primarily focused on NDCG and MRR metrics which are commonly used to measure the ranking quality of retrieval systems.

As the dense model that would convert our documents into contextualized embeddings, we used the sentencetransformers/all-MiniLM-L6-v2, which is a highly efficient transformer model optimized for semantic search. However, while this model balances between speed and embedding quality, it has a considerable limitation, as the maximum input sequence length is restricted to 256 tokens.

We chose the HNSW algorithm for vector search due to its high search quality and low search latency in comparison to other approximate algorithms. However, while HNSW requires considerable memory resources, this does not limit our algorithm since the index size depends on the number of terms in the vocabulary rather than the number of documents in the corpus, which keeps memory usage optimal.

For comparison, we considered the SPARTA, HNSW, and ColBERTv2 algorithms. The results of the comparison are shown in Table.

The results of our study demonstrate that our model achieves higher search quality compared to SPARTA

Table. Retrieval results on SciFact dataset

| Algorithm  | Metrics |        |  |
|------------|---------|--------|--|
| Algorithin | NDCG@10 | MRR@10 |  |
| SPARTA     | 0.60    | 0.57   |  |
| Our work   | 0.63    | 0.60   |  |
| HNSW       | 0.64    | 0.60   |  |
| ColBERTv2  | 0.69    | 0.66   |  |



Fig. 4. Index size growth with increasing documents

(conceptually similar algorithm), provides comparable quality to HNSW (one of the best algorithms for ANN search), and falls behind ColBERT (state-of-the-art in search quality). However, due to the use of an inverted index, our model requires less memory than both HNSW and ColBERT, as illustrated in Fig. 4.

In the figure above, only the size of the inverted index for our algorithm is shown. The size of our vector index is constant and, therefore, not included in the calculation.

## **Discussion of Results**

#### Vector index size

Although our approach requires a separate HNSW index, the way we construct it makes our algorithm more efficient than those of ColBERT and SparseEmbed. In ColBERT, the number of vectors that need to be stored increases linearly with the number of documents in the dataset, as a separate embedding must be saved for each new document, reducing scalability for large datasets. SparseEmbed further exacerbates this issue by storing embeddings of each token within the document as a value in the inverted index, thus requiring to store dozens of embeddings per document.

In contrast, the size of our vector index does not depend directly on the size of the dataset. We store embeddings of different contextual clusters of tokens within our vocabulary. Therefore, the dataset size affects the index size only indirectly: as more documents are added, new contextual meanings of tokens may appear, potentially increasing the number of clusters. This means that for small datasets consisting of a few thousand documents, our approach might require more memory than ColBERT as we would store at least one embedding for each token

#### References

- Khattab O., Zaharia M. ColBERT: Efficient and Effective Passage Search via Contextualized Late Interaction over BERT. *Proc. of the* 43<sup>rd</sup> International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval, 2020, pp. 39–48. https://doi. org/10.1145/3397271.3401075
- Zamani H., Dehghani M., Croft W.B., Learned-Miller E., Kamps J. From neural re-ranking to neural ranking: Learning a sparse representation for inverted indexing. *Proc. of the 27<sup>th</sup> ACM International Conference on Information and Knowledge Management*, 2018, pp. 497–506. https://doi.org/10.1145/3269206.3271800

in the vocabulary. However, as the dataset size grows, the storage requirements for ColBERT and SparseEmbed increase linearly, while in our approach the size of the vector index stabilizes and remains constant as soon as new documents cease to introduce new semantic meanings to existing clusters.

Moreover, as our vector index stores semantic clusters for each token in the vocabulary, as long as our vocabulary does not change, we can train this vector index once and then reuse it in further iterations of indexing and searching processes.

# Query-processing overhead

A major limitation of our algorithm is the requirement to process each query through a BERT-like model to obtain the vector representations of its tokens which are subsequently used to retrieve semantically similar clusters from the HNSW index. This step is computationally expensive and might significantly increase the querytime latency. In future iterations of the algorithm, we intend to explore strategies to eliminate this costly model invocation to enhance the efficiency of our model. In the current version, it is still possible to perform search queries using only the inverted index, though it affects the search quality.

#### Conclusion

In this work, we proposed a novel algorithm for inverted index construction, designed to adapt deep neural models for usage with an efficient data structure widely adopted in production information retrieval systems. By utilizing contextualized vector representations, our approach can effectively address the vocabulary mismatch problem between documents and queries, leading to significant search quality improvements.

A key feature of our algorithm is the construction of a compact vector index used for capturing different semantic meanings of vocabulary tokens. The resulting index has a relatively small size which does not linearly depend on the amount of data in the search system, but rather on the size of the vocabulary, which is a major advantage of our algorithm. Additionally, by utilizing the MaxSim operator during the indexing process, we reduce the computational load of the search process compared to ColBERT while maintaining the advantages of the "late interaction" mechanism in terms of search quality.

Experimental results show the effectiveness of our approach, achieving strong search quality, which confirms its potential applicability to real-world information retrieval tasks.

#### Литература

- . Khattab O., Zaharia M. ColBERT: Efficient and Effective Passage Search via Contextualized Late Interaction over BERT // Proc. of the 43<sup>rd</sup> International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval. 2020. P. 39–48. https://doi. org/10.1145/3397271.3401075
- Zamani H., Dehghani M., Croft W.B., Learned-Miller E., Kamps J. From neural re-ranking to neural ranking: Learning a sparse representation for inverted indexing // Proc. of the 27<sup>th</sup> ACM International Conference on Information and Knowledge Management. 2018. P. 497–506. https://doi.org/10.1145/3269206.3271800

- Bai Y., Li X., Wang G., Zhang C., Shang L., Xu J., Wang Z., Wang F., Liu Q. SparTerm: Learning term-based sparse representation for fast text retrieval. arXiv, 2020, arXiv:2010.00768. https://doi. org/10.48550/arXiv.2010.00768
- Devlin J., Chang M.W., Lee K., Toutanova K. BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. arXiv, 2018, arXiv:1810.04805v2. https://doi.org/10.48550/arXiv.1810.04805
- Formal T., Piwowarski B., Clinchant S. SPLADE: Sparse lexical and expansion model for first stage ranking. *Proc. of the 44<sup>th</sup> International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*, 2021, pp. 2288–2292. https://doi. org/10.1145/3404835.3463098
- Santhanam K., Khattab O., Saad-Falcon J., Potts C., Zaharia M. ColBERTv2: Effective and efficient retrieval via lightweight late interaction. Proc. of the 2022 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, 2022, pp. 3715–3734. https://doi. org/10.18653/v1/2022.naacl-main.272
- Johnson J., Douze M., Jégou H. Billion-scale similarity search with GPUs. *IEEE Transactions on Big Data*, 2021, vol. 7, no. 3, pp. 535– 547. https://doi.org/10.1109/tbdata.2019.2921572
- Jégou H., Douze M., Schmid C. Product quantization for nearest neighbor search. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, vol. 33, no. 1, pp. 117–128. https://doi. org/10.1109/tpami.2010.57
- Kong W., Dudek J.M., Li C., Zhang M., Bendersky M. SparseEmbed: Learning sparse lexical representations with contextual embeddings for retrieval. *Proc. of the 46<sup>th</sup> International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*. 2023. P. 2399–2403. https://doi.org/10.1145/3539618.3592065
- Tiancheng Z., Lu X., Lee K. SPARTA: Efficient Open-Domain Question Answering via Sparse Transformer Matching Retrieval. Proc. of the 2021 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, 2021, pp. 565–575. https://doi.org/10.18653/v1/2021. naacl-main.47
- Dobrynin V., Abramovich R., Platonov A. Building a full-text search index using "Transformer" neural network. *Proc. of the 2023 IEEE* 17<sup>th</sup> International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT), 2023. pp. 1–5. https://doi. org/10.1109/aict59525.2023.10313200
- Malkov Y.A., Yashunin D.A. Efficient and robust approximate nearest neighbor search using Hierarchical Navigable Small World graphs. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2020, vol. 42, no. 4, pp. 824–836. https://doi.org/10.1109/ tpami.2018.2889473
- Arthur D., Vassilvitskii S. k-means++: the advantages of careful seeding. Proc. of the 18<sup>th</sup> ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms Mathematics, 2007, pp. 1027–1035.
- Bajaj P., Campos D., Craswell N., Deng L., Gao J., Liu X., Majumder R., McNamara A., Mitra B., Nguyen T., Rosenberg M., Song X., Stoica A, Tiwary S., Wang T. MS MARCO: a human generated MAchine Reading COmprehension dataset. arXiv, 2016, arXiv:1611.09268. https://doi.org/10.48550/arXiv.1611.09268
- Thakur N., Nils R., Rücklé A., Srivastava A., Gurevych I. BEIR: A heterogenous benchmark for zero-shot evaluation of information retrieval models. arXiv, 2021, arXiv:2104.08663. https://doi. org/10.48550/arXiv.2104.08663

#### Authors

Viacheslav Yu. Dobrynin — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Senior Developer, Shift Lab LTD, London, W3 7XS, Great Britain, Sc 57223099701, https://orcid. org/0009-0004-3056-8403, vidobrynin@itmo.ru

Roman K. Abramovich — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Senior Developer, Payler Ltd, London, E14 4QA, Great Britain, sc 58759320100, https://orcid.org/0009-0005-5397-2772, asmetliness24237@gmail.com

Alexey V. Platonov — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, sc 57197736275, https://orcid. org/0000-0002-8485-1296, avplatonov@itmo.ru

Received 31.10.2024 Approved after reviewing 10.12.2024 Accepted 22.01.2025

- Bai Y., Li X., Wang G., Zhang C., Shang L., Xu J., Wang Z., Wang F., Liu Q. SparTerm: Learning term-based sparse representation for fast text retrieval // arXiv. 2020. arXiv:2010.00768. https://doi. org/10.48550/arXiv.2010.00768
- Devlin J., Chang M.W., Lee K., Toutanova K. BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding // arXiv. 2018. arXiv:1810.04805v2. https://doi.org/10.48550/arXiv.1810.04805
- Formal T., Piwowarski B., Clinchant S. SPLADE: Sparse lexical and expansion model for first stage ranking // Proc. of the 44<sup>th</sup> International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval. 2021. P. 2288–2292. https://doi. org/10.1145/3404835.3463098
- Santhanam K., Khattab O., Saad-Falcon J., Potts C., Zaharia M. ColBERTv2: Effective and efficient retrieval via lightweight late interaction // Proc. of the 2022 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies. 2022. P. 3715–3734. https://doi. org/10.18653/v1/2022.naacl-main.272
- Johnson J., Douze M., Jégou H. Billion-scale similarity search with GPUs // IEEE Transactions on Big Data. 2021. V. 7. N 3. P. 535–547. https://doi.org/10.1109/tbdata.2019.2921572
- Jégou H., Douze M., Schmid C. Product quantization for nearest neighbor search // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2011. V. 33. N 1. P. 117–128. https://doi. org/10.1109/tpami.2010.57
- Kong W., Dudek J.M., Li C., Zhang M., Bendersky M. SparseEmbed: Learning sparse lexical representations with contextual embeddings for retrieval // Proc. of the 46<sup>th</sup> International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval. 2023. P. 2399–2403. https://doi.org/10.1145/3539618.3592065
- Tiancheng Z., Lu X., Lee K. SPARTA: Efficient Open-Domain Question Answering via Sparse Transformer Matching Retrieval // Proc. of the 2021 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies. 2021. P. 565–575. https://doi.org/10.18653/v1/2021. naacl-main.47
- Dobrynin V., Abramovich R., Platonov A. Building a full-text search index using "Transformer" neural network // Proc. of the 2023 IEEE 17<sup>th</sup> International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT). 2023. P. 1–5. https://doi. org/10.1109/aict59525.2023.10313200
- Malkov Y.A., Yashunin D.A. Efficient and robust approximate nearest neighbor search using Hierarchical Navigable Small World graphs // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2020. V. 42. N 4. P. 824–836. https://doi.org/10.1109/ tpami.2018.2889473
- Arthur D., Vassilvitskii S. k-means++: the advantages of careful seeding // Proc. of the 18th ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms Mathematics. 2007. P. 1027–1035.
- 14. Bajaj P., Campos D., Craswell N., Deng L., Gao J., Liu X., Majumder R., McNamara A., Mitra B., Nguyen T., Rosenberg M., Song X., Stoica A, Tiwary S., Wang T. MS MARCO: a human generated MAchine Reading COmprehension dataset // arXiv. 2016. arXiv:1611.09268. https://doi.org/10.48550/arXiv.1611.09268
- Thakur N., Nils R., Rücklé A., Šrivastava A., Gurevych I. BEIR: A heterogenous benchmark for zero-shot evaluation of information retrieval models // arXiv. 2021. arXiv:2104.08663. https://doi. org/10.48550/arXiv.2104.08663

#### Авторы

Добрынин Вячеслав Юрьевич — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; старший разработчик, Shift Lab LTD, Лондон, W3 7XS, Великобритания, Sc 57223099701, https://orcid.org/0009-0004-3056-8403, vidobrynin@ itmo.ru

Абрамович Роман Константинович — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; старший разработчик, Payler Ltd, Лондон, E14 4QA, Великобритания, SC 58759320100, https://orcid.org/0009-0005-5397-2772, asmetliness24237@gmail.com

**Платонов Алексей Владимирович** — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, № 57197736275, https://orcid.org/0000-0002-8485-1296, avplatonov@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 31.10.2024 Одобрена после рецензирования 10.12.2024 Принята к печати 22.01.2025

# **I/İTMO**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ январь-февраль 2025 Том 25 № 1 http://ntv.ifmo.ru/ SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS January-February 2025 Vol. 25 No 1 http://ntv.ifmo.ru/en/ ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

университет итмо

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-68-77 УДК 004.93'1

# Метод семантической сегментации данных воздушного лазерного сканирования водоохранных зон Сергей Владимирович Сай<sup>1</sup>, Алексей Владимирович Зинкевич<sup>2</sup>

1,2 Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, 680035, Российская Федерация

<sup>1</sup> sai1111@rambler.ru. https://orcid.org/0000-0002-4506-1857

<sup>2</sup> zinkevich1985@mail.ru<sup>\box</sup>, https://orcid.org/0000-0003-3231-8569

#### Аннотация

Введение. Выполнена оценка эффективности нейросетевого метода семантической сегментации трехмерных облаков точек, полученных с использованием беспилотного летательного аппарата «Геоскан 401 Лидар». Реализована нейронная сеть, основанная на модели глубокого обучения PointNet++, которая использует метод непосредственной обработки облаков точек. Разработана методика получения и подготовки набора данных с четырьмя классами: земля, растительность, транспортные средства и строительные объекты. Для увеличения точности оценки предложена методика, основанная на аугментации и перераспределении наборов данных. Метод. Модель нейронной сети состоит из иерархически построенных блоков, выполняющих выборку, группировку и извлечение признаков. Изменение количества блоков и задание радиуса поиска локальных признаков влияет на точность сегментации и вычислительные затраты. Основные результаты. Проведена оценка эффективности метода семантической сегментации трехмерных облаков точек, полученных с помощью беспилотного летательного аппарата. Методика аугментации и перераспределения наборов данных позволила улучшить среднее значение Intersection over Union (IoU) не менее, чем на 35 %. Для полученных данных определен оптимальный радиус в слое группировки, при котором обеспечивается баланс между детализацией и чувствительностью. Установлено, что увеличение количества точек в наборе данных не приводит к существенному росту точности, однако разнообразие используемых наборов данных улучшает эффективность подхода. Обсуждение. Разработанный набор данных позволяет повысить эффективность применяемого подхода, в том числе при обучении на иных моделях. Полученные результаты исследования свидетельствуют о перспективности использования предложенных методик и алгоритмов при решении задачи построения цифровых моделей реки Амур и ее основных притоков.

## Ключевые слова

лидарная съемка, воздушное лазерное сканирование, облако точек, семантическая сегментация, нейронная сеть PointNet, гидрологические исследования

## Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-11-20024 и Министерства образования и науки Хабаровского края (соглашение № 124С/2024).

Ссылка для цитирования: Сай С.В., Зинкевич А.В. Метод семантической сегментации данных воздушного лазерного сканирования водоохранных зон // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 1. С. 68–77. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-68-77

# Method of semantic segmentation of airborne laser scanning data of water protection zones

#### Sergey V. Sai<sup>1</sup>, Alexey V. Zinkevich<sup>2</sup>⊠

<sup>1,2</sup> Pacific National University, Khabarovsk, 680035, Russian Federation
 <sup>1</sup> sai1111@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-4506-1857
 2 zinkevich1985@mail.ru<sup>⊠</sup>, https://orcid.org/0000-0003-3231-8569

© Сай С.В., Зинкевич А.В., 2025

#### Abstract

This article presents an evaluation of the efficiency of a neural network method for the semantic segmentation of three-dimensional point clouds obtained using the Geoscan 401 Lidar UAV. The proposed implementation of the neural network is based on the PointNet++ deep learning model which directly processes point clouds. A technique has been developed for acquiring and preparing a dataset with four classes: land, vegetation, vehicles, and construction objects. To increase the accuracy of the evaluation, a technique based on augmentation and redistribution of the datasets has been proposed. The neural network model consists of hierarchically constructed blocks that perform sampling, grouping, and feature extraction. Adjusting the number of blocks and setting the search radius for local features affects both the accuracy of segmentation and computational costs. The efficiency of the method for semantic segmentation and redistribution technique improved the average Intersection over Union (IoU) value by at least 35 %. For the obtained data, the optimal radius in the grouping layer was determined, ensuring a balance between detail and sensitivity. It was found that an increase in the number of points in the dataset does not lead to a significant improvement in accuracy; however, the diversity of the datasets used enhances the method efficiency. The developed dataset increases the effectiveness of the applied approach, including when training other models. The results of this study indicate the potential for using the proposed methods and algorithms in constructing digital models of the Amur River and its main tributaries.

## Keywords

Lidar survey, airborne laser scanning, point cloud, semantic segmentation, PointNet neural network, hydrological research

#### Acknowledgements

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 24-11-20024 and the Ministry of Education and Science of Khabarovsk Krai (Agreement No. 124C/2024).

**For citation:** Sai S.V., Zinkevich A.V. Method of semantic segmentation of airborne laser scanning data of water protection zones. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 1, pp. 68–77 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-68-77

## Введение

Амур — одна из крупнейших рек мира, имеет десятый по размеру речной бассейн площадью 1,85 млн км<sup>2</sup>, длина р. Амур составляет 2,8 тыс. км. Бассейн р. Амур является одним из самых паводкоопасных районов Российской Федерации, поэтому мониторинг изменений речного русла, поймы, рельефа дна и окружающей местности, которые воздействуют на характер движения воды, является актуальной задачей. Построение эффективной системы прогнозирования можно считать первоочередной задачей. Лучшим решением для построения комплексной прогнозной системы является создание цифровых моделей [1].

Для разработки цифровых моделей русла, береговой линии и водоохранной зоны р. Амур и ее основных притоков требуется существенное количество пространственных данных. Поскольку гидрологические исследования часто выполняются в условиях сложного рельефа местности, заболоченных почв, непроходимой густой древесно-кустарниковой растительности, ограждений и других препятствий, то работы наземными методами могут быть невыполнимы. Данные дистанционного зондирования Земли уже давно используются для получения полезной информации. При этом космические снимки представляют информацию среднего и относительно высокого пространственного разрешения, что неблагоприятно сказывается на качестве результатов моделирования. В этих случаях хорошо работают аэрофототопографические методы, позволяющие получить данные сверхвысокого пространственного разрешения. Однако изображения не могут передать полную информацию об осматриваемом объекте, так как для этого необходимо сделать несколько снимков, чтобы оценить объект полностью. Это особенно

актуально на пологих участках поймы с небольшими перепадами высот.

В настоящее время существуют современные методы выполнения топографических работ с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с применением лидарной съемки. Одним из преимуществ такой съемки является возможность классифицировать полученные точки (земля, растительность, строение и пр.). Также лидар формирует плотное облако точек даже в условиях густой сплошной залесенности и, таким образом, позволяет четко передать фактический рельеф местности. Все это способствует развитию методов воздушной съемки территории с БПЛА, в том числе, проведение мониторинга дна водных объектов и донных наносов с использованием батиметрического лидара, что является предметом исследований в настоящей работе.

Построение модели невозможно без понимания сцены, что является важным шагом в анализе данных облаков точек, полученных от лидара. При решении задачи классификации каждой точке в трехмерном облаке должны быть назначены правильные классы. Эта проблема известна как семантическая сегментация и хорошо изучена в приложениях компьютерного зрения, таких как автономные автомобили, где доступны разнообразные общедоступные наборы данных, например SemanticKITTI [2]. Однако семантическая сегментация недостаточно хорошо изучена для данных сканирования лидара на базе БПЛА. Наиболее заметным отличием является вид сцены и объектов. Данные, которые получены с БПЛА, также более разрежены.

Необходимость подготовки собственных наборов данных становится особенно актуальной в этом контексте. Учитывая уникальные характеристики сканируемых сцен, создание специализированных наборов данных, соответствующих конкретным условиям и классам, позволяет повысить достоверность и точность модели. В отличие от общедоступных наборов данных, собственные наборы позволяют более точно отражать специфику задач, связанных с семантической сегментацией, таких как различение растительности, транспортных средств и строительных объектов.

Использование нейронных сетей может значительно облегчить обработку большого объема полученной информации, определяя известные классы и автоматически обучаясь на конкретных наборах данных. Однако разработанные универсальные архитектуры нейронных сетей должны быть адаптированы для работы с разными наборами данных и задачами. Важно учитывать особенности каждого нового набора данных, чтобы избежать потери точности.

В настоящей работе предлагается оценка нейросетевого метода для семантической сегментации трехмерных облаков точек, полученных путем воздушного лазерного сканирования с применением БПЛА «Геоскан 401 Лидар». Разработана методика получения и подготовки набора данных с четырьмя классами: земля, растительность, транспортные средства и строительные объекты. Предложена реализация нейронной сети на основе используемой модели глубокого обучения PointNet++ и приведена оценка точности для ряда экспериментов. Для увеличения точности оценки предложена методика, основанная на методах аугментации и перераспределения наборов данных. Цель исследования — разработка методик и алгоритмов для задачи семантической сегментации данных воздушного лазерного сканирования при построении цифровых моделей р. Амур и ее основных притоков.

# Получение данных воздушного лазерного сканирования

Экспериментальные данные получены с помощью лидара Velodyne VLP-32С, установленного на БПЛА «Геоскан 401 Лидар»<sup>1</sup>. Датчик установлен под БПЛА, чтобы иметь возможность измерять поверхность земли сверху. Из-за крепления датчика только около 180° горизонтального поля зрения датчика представляют полезные данные. Полученная информация является набором точек в трехмерном пространстве, представляющих неупорядоченный, неструктурированный массив.

Итоговый набор данных состоит из файлов, в которых находится информация о части водоохранной зоны р. Амур и ее притоках. Каждый файл содержит данные о различной площади сканирования. Всего было получено 18,1 млн точек на площади размером 500 × 700 м. Данные включают примеры открытых территорий, деревьев и кустарников, построек, а также транспортных средств. Высота полета задавалась в пределах 100 м от уровня земли. Растительность и земля появляются во всех частях съемки, в то время как другие объекты встречаются редко. На рис. 1 представлена часть облака



*Рис. 1.* Часть облака точек, окрашенная в зависимости от значения высоты.

В нижней части рисунка находится граница с рекой

*Fig. 1.* Part of the point cloud colored depending on the altitude value.

At the bottom of the figure is the border with the river

точек, окрашенного в зависимости от высоты. Эта визуализация позволяет наглядно увидеть топографические особенности местности: более высокие точки окрашены в теплые оттенки, такие как красный и желтый, в то время как более низкие участки отображаются в холодных тонах — от синего до зеленого. В нижней части рисунка отчетливо прослеживается граница с рекой, которая образует естественную линию раздела. Однако из-за сильного отражения света от поверхности воды для используемого лидара — это отражение может создавать ложные сигналы, что затрудняет выявление контуров реки и ее сегментацию.

Полученный набор точек представляет трехмерную сцену или объект. Решение задач классификации и сегментации позволяет извлечь из него пространственную структуру.

#### Методы обработки данных

Обработка облаков точек при помощи нейросетевых моделей является относительно новым подходом. Первые работы в этом направлении датируются 2017 годом. Облака точек представляют из себя набор вершин в трехмерном пространстве и характеризуют внешнюю поверхность объекта. Ввиду особенностей таких данных, типовые полносвязные сверточные сети не могут быть применены.

В настоящее время методы классификации облаков точек на основе глубокого обучения можно разделить на четыре типа в зависимости от их сетевой структуры: многопроекционные методы, методы на основе вокселизации, методы на основе графовой свертки и методы на основе обработки точек.

Методы классификации облака точек, основанные на множественных проекциях, аналогичны методам классификации двумерных изображений. Объект рассматривается с разных сторон, формируя ряд проецируемых изображений вокруг трехмерной модели облака точек. Затем применяются методы обработки двумерных изображений, а классы, полученные в результате сегментации в двумерном виде, проецируются обратно на трехмерное облако точек [3–6].

Методы на основе вокселизации преобразуют облака точек в пространственно-однородную сетку вок-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Геоскан 401 Лидар [Электронный ресурс]. URL: https:// www.geoscan.ru/ru/products/geoscan401/lidar/ (дата обращения: 11.10.2024).

селей. Для выполнения задач классификации обычно используются трехмерные сверточные нейронные сети. Существующие методы, основанные на вокселизации, эффективны для неупорядоченных и неструктурированных облаков точек, однако определение размера вокселя представляет сложную задачу [7–10].

Методы на основе графовой свертки объединяют операции свертки с представлением структуры графа. Эти алгоритмы эффективны для захвата и обработки геометрической структуры облаков точек, однако при обработке разреженных графов модель сети в процессе обучения часто переобучается [11–13].

Методы обработки облаков точек напрямую принимают облака точек в качестве входных данных. Они используют сети облаков точек для извлечения признаков, сохраняя геометрическую информацию входных данных без высоких требований к оборудованию. Широко используемыми моделями в этой категории являются PointNet и PointNet++. Модель PointNet демонстрировала хорошие результаты в задачах семантической сегментации и классификации объектов. В [14] модель обрабатывала точки отдельно друг от друга, переводя их в пространства большей размерности. После чего все пространства точек объединялись. Эта работа получила продолжение в виде модели PointNet++ [15]. Для обработки облака точек использовались перекрывающие области, т. е. брались точки из всего облака, и вокруг этих точек строились области с заданным радиусом, после чего из данных областей выделялись характерные признаки.

Из-за потери пространственной информации в многопроекционных методах, высоких вычислительных требований к оборудованию в воксельных методах, сложностей в глобальном обучении признакам в методах на основе графовой свертки, а также особенностей используемых данных, полученных в результате лидарной съемки, в настоящей работе выбрана за основу модель PointNet++.

Исходными данными для обучения нейронной сети является наличие классифицированного облака точек. В связи с чем подготовка размеченного набора данных является важным этапом до начала работы с нейронной сетью, без которого невозможно получить оценку результатов.

# Подготовка классифицированного набора данных

Исходные данные содержат информацию о координатах точек. Данные о классе, к которому принадлежит точка, отсутствуют. Для формирования классифицированного набора данных была проведена предварительная обработка. Предложенная методика включает в себя следующие этапы.

- Объединение данных из отдельных файлов в общее облако точек. Это связано с обработкой данных от сенсоров БПЛА и сохранением их в файле в виде последовательных сканирований с перекрытием соседних.
- 2. Разбиение на блоки размером 50 × 50 м и отбрасывание блоков с количеством точек менее 1000.
- Фильтрация ложных выбросов, наличие которых связано с отражающими поверхностями и сложной геометрией сцены. Используется алгоритм оценки среднего расстояния от текущей точки до 5 соседних точек, после чего точка считается выбросом, если это расстояние превышает указанное пороговое значение.
- Перевод координат точек из глобальной системы координат в локальную. Алгоритм вычисляет разность между текущими координатами точки и значением центроида облака. При этом высотные отметки, для визуального удобства, считаются от нуля.
- 5. Ручное разделение точек и объектов по классам.
- Объединение данных, полученных в разных классах, и перевод точек из локальной системы координат в глобальную.

После проведенной классификации получен набор данных, представляющий наибольший интерес в рамках поставленной задачи. Координаты точек данных приведены в фиксированной системе координат WGS 84. Данные были разделены на четыре класса: земля, растительность, транспортные средства и строительные объекты. Класс «Земля» содержит все типы земли и низкой растительности, которые не могут быть отдельно аннотированы как растительность. Примеры материалов в классе «Земля» включают гравий, траву, песок, камень и почву. В данных класса «Транспортные средства» присутствуют автомобили, грузовики, а также плавательные средства. Класс «Строительные объекты» содержит данные о любых рукотворных объектах, таких как здания, заборы и прочие постройки. Для каждого класса рассчитан его вес относительно общего количества точек по выражению:

$$W_i = \sqrt{\frac{n}{n_i}},$$

где  $w_i$  — вес *i*-го класса;  $n_i$  — количество точек *i*-го класса; n — общее количество точек. Информация по полученному набору данных приведена в табл. 1.

На рис. 2 приведен пример облака точек, представленный на рис. 1, но с проведенной классификацией. Наглядно видна разница по дисбалансу классов.

Наличие дисбаланса классов является проблемой при обучении нейронной сети, что может негативно сказаться на точности ее работы. Для увеличения точ-

Таблица 1. Статистика набора данных по классам точек Table 1. Dataset statistics by point classes

| Класс            | Земля     | Растительность | Транспортные средства | Строительные объекты |
|------------------|-----------|----------------|-----------------------|----------------------|
| Количество точек | 8 017 567 | 9 867 772      | 5504                  | 148 518              |
| Вес класса       | 1,11      | 1              | 42,34                 | 8,15                 |

Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2025, том 25, № 1 Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2025, vol. 25, no 1



*Puc.* 2. Часть облака точек, окрашенная по классификации *Fig.* 2. Part of the point cloud colored by classification

ности обучения были применены методы расширения данных для класса «Транспортные средства» и перераспределение наборов данных для классов «Земля» и «Растительность». Для расширения данных предложено не генерировать синтетические данные, а использовать существующие данные из облака, содержащего точки класса «Транспортные средства». Методика обработки представлена следующими шагами.

- 1. Отдельно выделены несколько различных облаков точек, содержащих один класс «Транспортные средства».
- 2. На выделенном наборе проведена аугментация, включающая случайные аффинные преобразования, такие как изменение масштаба, смещение и вращение.
- Облако, не имеющее изначально класса «Транспортные средства» подвергалось прореживанию. Для этого из них удалялись случайным образом выбранные 15 % точек по классам «Земля» и «Растительность».
- Полученный после аугментации набор точек инжектировался в прореженное облако и проверялось условие нахождения объекта в границах исходного облака. При несоответствии условия процесс аугментации повторялся.
- Добавлялся новый объект и проверялась коллизия с ранее добавленным объектом. Процесс повторялся до устранения коллизий. При этом количество инжектированных объектов в среднем составило от двух до четырех.

Полученный в результате расширенный набор данных составил 41,67 млн точек. Информация по расширенному набору данных приведена в табл. 2.

# Структура нейронной сети

Используемая в работе нейронная сеть основана на модели глубокого обучения PointNet++, которая применяет многослойный перцептрон для извлечения признаков из облаков точек и слой максимального объединения (MaxPooling) для извлечения глобальных признаков, необходимых для классификации. Исходная модель также имеет иерархическую структуру для обучения по признакам наборов точек, полученных с использованием алгоритма выборки дальних точек (Farthest Point Sampling, FPS). Таким образом, модель подходит для решения задач сегментации как плотных, так и разреженных облаков точек, что дает решение проблемы неоднородной плотности облаков точек в полученном наборе данных. Упрощенная структура модели PointNet++ приведена на рис. 3.

Модель PointNet++ обрабатывает входные данные облака точек последовательно с помощью типовых блоков SA (Set Abstraction) и FP (Feature Propagation). Блок SA является основной частью подсети классификации PointNet++ и состоит из трех частей: выборка, группировка и извлечение признаков (рис. 4). Выборка с помощью алгоритма FPS уменьшает начальное количество точек от N до  $N_1$ . Затем следует этап группировки и для каждой выбранной точки происходит

*Таблица 2*. Статистика расширенного набора данных по классам точек *Table 2*. Statistics of the extended dataset by point classes

| Класс            | Земля      | Растительность | Транспортные средства | Строительные объекты |
|------------------|------------|----------------|-----------------------|----------------------|
| Количество точек | 17 883 477 | 23 042 886     | 326 199               | 408 729              |
| Вес класса       | 1,13       | 1              | 8,41                  | 7,81                 |

Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2025, том 25, № 1 Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2025, vol. 25, no 1


*Puc. 5.* Структура FP блока *Fig. 5.* FP block structure

поиск ближайших k точек в заданном радиусе, тем самым из входной матрицы  $\mathbf{N} \times \mathbf{D}$  формируется матрица  $\mathbf{N}_1 \times \mathbf{k} \times \mathbf{D}$ . Последним этапом, с помощью сети PointNet, извлекаются глобальные признаки в области выборки, в результате чего получается  $\mathbf{N}_1 \times \mathbf{D}_1$  локальных признаков, где D и  $D_1$  представляют собой разные размерности признаков.

В результате для входного облака точек  $A = \{a, x\}$  на выходе SA блока получается выходное облако  $B = \{b, y\}$ , где  $a \in R^{N \times 3}$  и  $x \in R^{N \times D}$  — координаты и класс входных точек, а  $b \in R^{N_1 \times 3}$  и  $y \in R^{N_1 \times D_1}$  — координаты и класс выходных точек. Данные первого SA блока подаются на вход следующему SA блоку, повторяя этот процесс. И хотя количество центральных точек уменьшается, поле охвата увеличивается, что позволяет захватывать больше информации о локальных признаках точек. Стоит отметить, что каждый следующий SA блок имеет в два раза больший радиус поиска, чем предыдущий.

Блок FP интерполирует точки, а затем объединяет их с вычисленным классом из SA блока (рис. 5). Далее с помощью PointNet вычисляются классы точек более высокого уровня. Таким образом, перенос информации о классах в исходное облако (этап семантической сегментации) реализован подобно U-net сети.

Последний слой в модели PointNet++ выполняет линейную свертку для получения оценок классов для каждой точки. Категория с наибольшей оценкой является результатом классификации данной точки.

Результирующая структура сети может содержать различное количество SA блоков, что влияет на точность сегментации и вычислительные затраты. В экспериментальной части работы исследованы варианты сети, включающие от трех до 5 SA блоков, а также различные радиусы поиска в слое группировки.

#### Метрики оценки и параметры обучения сети

Количество входных точек сети может свободно задаваться, однако для лучшего использования вычислительных ресурсов (Graphics Processing Unit) и процесса пакетного обучения в сеть подается подготовленное облако *A* с количеством точек равным 8192. Для этого к входным данным применяются алгоритмы, включающие изменение размера (равномерное прореживание облака) и минимально-максимальную нормализацию.

Полученная ранее статистика весов классов показала дисбаланс, который при обучении нейронной сети может привести к смещенным предсказаниям и низкому качеству распознавания. Чтобы минимизировать дисбаланс классов использована функция потерь взвешенной кросс-энтропии:

$$WeightedCrossEntropy = -\sum_{t=1}^{C} w_t p_t \log_e(y_t),$$

где C — количество классов;  $w_t$  — вес для класса t;  $p_t$  — истинная метка для класса t;  $y_t$  — предсказанная вероятность метки для класса t.

В качестве алгоритма оптимизации используется оптимизатор Adam с числом еросh равным 20. Обучение проводится с применением метода градиентного спуска. Скорость обучения установлена на 0,0005. Размер пакета (batch) равен 16.

Используемыми метриками оценки выбраны: пересечение по объединению (Intersection over union, IoU), среднее значение IoU для всех категорий (mIoU) и общая точность (overall accuracy, OA):

$$IoU = \frac{TP_i}{TP_i + FP_i + FN_i}; mIoU = \frac{\sum_{i=1}^{N} IoU_i}{N};$$
$$OA = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN},$$

где ТР (True Positives) — истинно положительные; TN (True Negatives) — истинно отрицательные; FP (False Positives) — ложноположительные; FN (False Negatives) — ложноотрицательные; N — количество классов.

Более высокое значение IoU указывает на то, что сеть предсказывает более точные границы сегментации. Метрика ОА измеряет точность классификации модели, рассчитываемую как доля правильно классифицированных точек и общее количество точек.

#### Методика эксперимента и результаты

Набор данных разделен случайным образом на обучающий и тестовый. На тестовый набор отводится 10 % данных.

В первой части эксперимента проведена оценка точности нейронной сети, обученной на схожем классифицированном наборе данных лидарной съемки с БПЛА — Dayton Annotated Laser Earth Scan (DALES), который содержит более 150 млн точек [16]. Выполнено сравнение точности при подаче на вход нейронной сети набора данных DALES и созданного набора данных. Различие классов в созданном наборе данных и наборе данных DALES решалось объединением классов DALES в более общие классы. В частности, классы «Легковые автомобили» и «Грузовики» объединены в более общий класс «Транспортное средство». Оставшиеся классы, за исключением «Земля» и «Растительность», объединены в класс «Строительные объекты» (табл. 3).

Полученные результаты показывают, что класс «Земля» сегментируется с высокой точностью в обоих наборах данных. В то же время уникальные характеристики сцен и объектов созданного набора данных не позволяют достичь высокой достоверности и точности сегментации. В частности, в классе «Строительные объекты» созданного набора данных, метрика IoU показывает низкую точность границ сегментации. Также можно отметить, что увеличение количества точек в наборе данных не дает существенного роста точности. Достичь более высоких результатов возможно как за счет обучения на созданном наборе данных, так и за счет перераспределения параметров в блоках поиска глобальных и локальных признаков.

Во второй части эксперимента проведена оценка точности нейронной сети, обученной на созданном наборе данных, при различном количестве SA блоков. Радиус поиска ближайших k точек на этапе группировки первого SA блока равен 10 % от размера нормализованного блока данных (табл. 4).

В общем случае увеличение количества SA блоков повышает средние значения OA и IoU, позволяя захватывать сложные структуры данных, однако существенно увеличивает вычислительные затраты. В частности, количество обучаемых параметров сети составляет 0,21, 0,89 и 3,5 млн параметров для SA от трех до 5, соответственно. Увеличение количества SA блоков также делает модель более чувствительной к классам, имеющим больший вес, что также сказывается на качестве сегментации мелких объектов. Наличие

*Таблица 3*. Метрики, полученные в результате сегментации сетью, обученной на наборе данных DALES *Table 3*. Metrics obtained as a result of segmentation by a network trained on the DALES dataset

| I/ wasa               | На   | бор данных DAI | LES  | Созданный набор данных |      |      |  |  |
|-----------------------|------|----------------|------|------------------------|------|------|--|--|
| Класс                 | OA   | IoU            | mIoU | OA                     | IoU  | mIoU |  |  |
| Земля                 | 0,87 | 0,75           |      | 0,99                   | 0,90 |      |  |  |
| Растительность        | 0,82 | 0,72           | 0.50 | 0,41                   | 0,41 | 0.27 |  |  |
| Транспортные средства | 0,41 | 0,21           | 0,39 | 0,02                   | 0,01 | 0,57 |  |  |
| Строительные объекты  | 0,79 | 0,69           | ]    | 0,66                   | 0,16 |      |  |  |

*Таблица 4.* Метрики, полученные в результате сегментации сетью, обученной на созданном наборе данных *Table 4.* Metrics obtained as a result of segmentation by a network trained on the created dataset

| L'acco                | Три SA блока |       |      | Че   | тыре SA бло | эка  | 5 SA блоков |      |      |  |
|-----------------------|--------------|-------|------|------|-------------|------|-------------|------|------|--|
| класс                 | OA           | IoU   | mIoU | OA   | IoU         | mIoU | OA          | IoU  | mIoU |  |
| Земля                 | 0,89         | 0,83  |      | 1    | 0,86        |      | 0,99        | 0,91 | 0,40 |  |
| Растительность        | 0,66         | 0,42  | 0.21 | 0,26 | 0,25        | 0,28 | 0,62        | 0,57 |      |  |
| Транспортные средства | 0            | 0     | 0,31 | 0    | 0           |      | 0           | 0    |      |  |
| Строительные объекты  | 0,002        | 0,002 |      | 0,05 | 0,03        |      | 0           | 0    |      |  |

Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2025, том 25, № 1 Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2025, vol. 25, no 1

| 1/ maga               | Три SA блока |      |      | Че   | тыре SA бл | эка  | 5 SA блоков |      |      |  |
|-----------------------|--------------|------|------|------|------------|------|-------------|------|------|--|
| Класс                 | OA           | IoU  | mIoU | OA   | IoU        | mIoU | OA          | IoU  | mIoU |  |
| Земля                 | 0,99         | 0,92 |      | 0,99 | 0,93       | 0,53 | 0,99        | 0,92 | 0,54 |  |
| Растительность        | 0,61         | 0,58 | 0.47 | 0,63 | 0,59       |      | 0,62        | 0,59 |      |  |
| Транспортные средства | 0            | 0    | 0,47 | 0,68 | 0,24       |      | 0,40        | 0,14 |      |  |
| Строительные объекты  | 0,92         | 0,39 |      | 0,51 | 0,35       |      | 0,70        | 0,50 |      |  |

*Таблица 5.* Метрики, полученные в результате сегментации сетью, обученной на расширенном наборе данных *Table 5.* Metrics obtained as a result of segmentation by a network trained on the augmented dataset

*Таблица 6.* Метрики, полученные в результате сегментации сетью с уменьшенным радиусом поиска в SA блоках *Table 6.* Metrics obtained as a result of segmentation by a network with a reduced search radius in SA blocks

| L'acco                | Три SA блока |      |      | Че   | тыре SA бло | эка  | 5 SA блоков |      |      |  |
|-----------------------|--------------|------|------|------|-------------|------|-------------|------|------|--|
| Класс                 | OA           | IoU  | mIoU | OA   | IoU         | mIoU | OA          | IoU  | mIoU |  |
| Земля                 | 0,99         | 0,93 |      | 0,99 | 0,92        | 0.52 | 0,99        | 0,92 | 0.64 |  |
| Растительность        | 0,68         | 0,65 | 0.59 | 0,63 | 0,62        |      | 0,61        | 0,58 |      |  |
| Транспортные средства | 0,38 0,27    |      | 0,38 | 0,48 | 0,28        | 0,32 | 0,45        | 0,26 | 0,04 |  |
| Строительные объекты  | 0,67         | 0,45 |      | 0,47 | 0,27        |      | 0,86        | 0,81 |      |  |

в созданном наборе данных сильного дисбаланса классов, несмотря на использование функции потерь взвешенной кросс-энтропии, не позволяет сети правильно определять классы «Транспортные средства» и «Строительные объекты».

В третьей части эксперимента проведена оценка точности нейронной сети, обученной на расширенном наборе данных, который был создан по предложенной методике в разделе «Подготовка классифицированного набора данных» для уменьшения дисбаланса классов, в частности класса «Транспортные средства» (табл. 5).

Полученные результаты показали увеличение точности и качества работы сети с данными, подвергнутыми балансировке классов. Ошибки в определении класса «Транспортные средства» в сети с тремя SA блоками связано с невозможностью захватить достаточное количество признаков для корректной сегментации мелких объектов. Увеличить точность возможно за счет изменения радиуса поиска в слое группировки. Следует учесть, что большой радиус может привести к потерям детализации в локальных структурах, поскольку важно учитывать мелкие детали, которые могут быть потеряны в процессе обобщения. В то же время слишком маленький радиус может привести к избыточной чувствительности и шуму, поскольку группировка может быть основана на нескольких случайных точках.

В четвертой части эксперимента проведена оценка точности нейронной сети, обученной на расширенном наборе данных. Дополнительно был вдвое уменьшен радиус поиска на этапе группировки (табл. 6).

Уменьшение радиуса поиска повышает оценку точности при определении класса «Транспортные средства» для модели с тремя SA блоками, однако теряет больше признаков класса «Строительные объекты». В то же время модель с 5 SA блоками позволяет получить более точные оценки по всем классам. Можно отметить, что оптимальный радиус должен быть определен в зависимости от специфики решаемой задачи и

набора данных. Для используемых данных оптимальным можно считать радиус равный 5 % от размера нормализованного блока данных. Тем не менее, невысокий IoU по классу «Транспортные средства» указывает на необходимость добавлять больше разнообразных объектов этого класса в обучающую выборку, в частности, плавательных средств.

#### Заключение

В работе оценена эффективность нейросетевого метода семантической сегментации трехмерных облаков точек, полученных с использованием беспилотного летательного аппарата «Геоскан 401 Лидар». Разработанная методика подготовки набора данных, включающего четыре ключевых класса — земля, растительность, транспортные средства и строительные объекты — позволила создать основу для качественной сегментации.

Использование в нейронной сети модели глубокого обучения PointNet++ продемонстрировало высокую точность в сегментации, что подтверждает целесообразность применения данного подхода. Увеличение количества агрегирующих блоков делает модель более чувствительной к классам, имеющим больший вес, что сказывается на качестве сегментации мелких объектов. Для дальнейшего повышения точности оценки отдельных классов предложена методика, основанная на аугментации и перераспределении наборов данных, что позволило значительно улучшить результаты сегментации. В частности, среднее значение Intersection over Union было улучшено, минимум на 35 %.

Дополнительное увеличение точности возможно при учете специфики решаемой задачи и набора данных. Большой радиус группировки приводит к потерям детализации в локальных структурах, в то время как слишком маленький радиус приводит к избыточной чувствительности и шуму, поскольку группировка может быть основана на нескольких случайных точках. Для решаемой задачи радиус поиска определен экспериментально и составляет 5 % от размера нормализованного блока данных.

На основе результатов экспериментальных оценок получено, что увеличение количества точек в наборе данных не дает существенного роста точности. В то же время наличие большего разнообразия доступных и используемых наборов данных, полученных с помощью

#### Литература

- Неров И.О., Краснопеев С.М., Бугаец А.Н., Беликов В.В., Глотко А.В., Борисова Н.М., Васильева Е.С., Кролевецкая Ю.В. Опыт создания цифровой модели рельефа для гидродинамических расчетов в бассейне р. Амур // Вестник ДВО РАН. 2021. № 6 (220). С. 45–55. https://doi.org/10.37102/0869-7698\_2021\_220\_06\_04
- Behley J., Garbade M., Milioto A., Quenzel J., Behnke S., Stachniss C., Gall J., SemanticKITTI: a dataset for semantic scene understanding of LiDAR sequences // Proc. of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). 2019. P. 9296– 9306. https://doi.org/10.1109/iccv.2019.00939
- Angrish A., Bharadwaj A., Starly B. MVCNN++: Computer-Aided design model shape classification and retrieval using multi-view convolutional neural networks // Journal of Computing and Information Science in Engineering. 2021. V. 21. N 1. P. 011001. https://doi.org/10.1115/1.4047486
- Feng Y., Zhang Z., Zhao X., Ji R., Gao Y. GVCNN: group-view convolutional neural networks for 3D shape recognition // Proc. of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2018. P. 264–272. https://doi.org/10.1109/ cvpr.2018.00035
- Li M., Cao Y., Wu H. Three-dimensional reconstruction for highly reflective diffuse object based on online measurement // Optics Communications. 2023. V. 533. P. 129276. https://doi.org/10.1016/j. optcom.2023.129276
- Sfikas K., Pratikakis I., Theoharis T. Ensemble of PANORAMAbased convolutional neural networks for 3D model classification and retrieval // Computers and Graphics. 2018. V. 71. P. 208–218. https:// doi.org/10.1016/j.cag.2017.12.001
- Riegler G., Ulusoy A.O., Geiger A. OctNet: learning deep 3D representations at high resolutions // Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2017. P. 6620– 6629. https://doi.org/10.1109/cvpr.2017.701
- Choy C., Gwak J., Savarese S. 4D spatio-temporal ConvNets: Minkowski convolutional neural networks // Proc. of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2019. P. 3070–3079. https://doi.org/10.1109/cvpr.2019.00319
- Hua B.-S., Tran M.-K., Yeung S.-K. Pointwise convolutional neural networks // Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2018. P. 984–993. https://doi. org/10.1109/cvpr.2018.00109
- Li W., Luo Z., Xiao Z., Chen Y., Wang C., Li J. A GCN-Based method for extracting power lines and pylons from airborne LiDAR data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2022. V. 60. P. 1–14. https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3076107
- Wang Y., Sun Y., Liu Z., Sarma S.E., Bronstein M.M., Solomon, J.M. Dynamic graph CNN for learning on point clouds // ACM Transactions on Graphics. 2019. V. 38. N 5. P. 146. https://doi. org/10.1145/3326362
- Liang Z., Yang M., Deng L., Wang C., Wang B. Hierarchical depthwise graph convolutional neural network for 3D semantic segmentation of point clouds // Proc. of the International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2019. P. 8152–8158. https://doi. org/10.1109/ICRA.2019.8794052
- Zhao Y., Zhou F., Guo B., Liu B. Spatial temporal graph convolution with graph structure self-learning for early MCI detection // Proc. of the IEEE 20th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI). 2023. P. 1-5. https://doi.org/10.1109/ isbi53787.2023.10230807
- Qi C.R., Su H., Mo K., Guibas L.J. PointNet: deep learning on point sets for 3D classification and segmentation // Proc. of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition (CVPR). 2017. P. 1–9. https://doi.org/10.1109/cvpr.2017.16

разных лидаров при различных условиях сканирования, должно повысить эффективность применяемого подхода.

Полученные результаты исследования свидетельствуют о перспективности использования предложенных методик и алгоритмов для задач семантической сегментации при разработке цифровых моделей реки Амур.

#### References

- Nerov I.O., Krasnopeyev S.M., Bugaets A.N., Belikov V.V., Glotko A.V., Borisova N.M., Vasileva E.S., Krolevetskaya Yu.V. Experience in digital terrain model generation for hydrodynamic modeling in the Amur River basin. *Vestnik of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences*, 2021, no. 6 (220), pp. 45–55. (in Russian). https://doi.org/10.37102/0869-7698\_2021\_220\_06\_04
- Behley J., Garbade M., Milioto A., Quenzel J., Behnke S., Stachniss C., Gall J., SemanticKITTI: a dataset for semantic scene understanding of LiDAR sequences. *Proc. of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2019, pp. 9296–9306. https://doi.org/10.1109/iccv.2019.00939
- Angrish A., Bharadwaj A., Starly B. MVCNN++: computer-aided design model shape classification and retrieval using multi-view convolutional neural networks. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 011001. https://doi. org/10.1115/1.4047486
- Feng Y., Zhang Z., Zhao X., Ji R., Gao Y. GVCNN: Group-View Convolutional Neural Networks for 3D Shape Recognition. Proc. of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2018, pp. 264–272. https://doi.org/10.1109/ cvpr.2018.00035
- Li M., Cao Y., Wu H. Three-dimensional reconstruction for highly reflective diffuse object based on online measurement. *Optics Communications*, 2023, vol. 533, pp. 129276. https://doi. org/10.1016/j.optcom.2023.129276
- Sfikas K., Pratikakis I., Theoharis T. Ensemble of PANORAMAbased convolutional neural networks for 3D model classification and retrieval. *Computers and Graphics*, 2018, vol. 71. pp. 208–218. https://doi.org/10.1016/j.cag.2017.12.001
- Riegler G., Ulusoy A.O., Geiger A. OctNet: learning deep 3D representations at high resolutions. *Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017, pp. 6620– 6629. https://doi.org/10.1109/cvpr.2017.701
- Choy C., Gwak J., Savarese S. 4D spatio-temporal ConvNets: Minkowski convolutional neural networks. *Proc. of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2019, pp. 3070–3079. https://doi.org/10.1109/cvpr.2019.00319
- D. Hua B.-S., Tran M.-K., Yeung S.-K. Pointwise convolutional neural networks. Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2018, pp. 984–993. https://doi. org/10.1109/cvpr.2018.00109
- Li W., Luo Z., Xiao Z., Chen Y., Wang C., Li J. A GCN-Based method for extracting power lines and pylons from airborne LiDAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, vol. 60, pp. 1–14. https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3076107
   Wang Y., Sun Y., Liu Z., Sarma S.E., Bronstein M.M., Solomon, J.M.
- Wang Y., Sun Y., Liu Z., Sarma S.E., Bronstein M.M., Solomon, J.M. Dynamic graph CNN for learning on point clouds. *ACM Transactions* on *Graphics*, 2019, vol. 38, no. 5, pp. 146. https://doi. org/10.1145/3326362
- Liang Z., Yang M., Deng L., Wang C., Wang B. Hierarchical depthwise graph convolutional neural network for 3D semantic segmentation of point clouds. *Proc. of the International Conference* on Robotics and Automation (ICRA), 2019, pp. 8152–8158. https:// doi.org/10.1109/ICRA.2019.8794052
- Zhao Y., Zhou F., Guo B., Liu B. Spatial temporal graph convolution with graph structure self-learning for early MCI detection. *Proc. of the IEEE 20th International Symposium on Biomedical Imaging* (*ISBI*), 2023, pp. 1–5. https://doi.org/10.1109/ isbi53787.2023.10230807
- Qi C.R., Su H., Mo K., Guibas L.J. PointNet: deep learning on point sets for 3D classification and segmentation. *Proc. of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition (CVPR)*, 2017, pp. 1–9. https://doi.org/10.1109/cvpr.2017.16

- Qi C.R., Li, Y, Su H., Guibas L.J. PointNet++: deep hierarchical feature learning on point sets in a metric space // arXiv. 2017. arXiv:1706.02413v1. https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.02413
- Varney N., Asari, V.K., Graehling Q. DALES: a large-scale aerial LiDAR data set for semantic segmentation // Proc. of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). 2020. P. 1–10. https://doi.org/10.1109/ cvprw50498.2020.00101

#### Авторы

Сай Сергей Владимирович — доктор технических наук, профессор, профессор, Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, 680035, Российская Федерация, sc 14042260800, https://orcid.org/0000-0002-4506-1857, sai1111@rambler.ru

Зинкевич Алексей Владимирович — кандидат технических наук, доцент, Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, 680035, Российская Федерация, se 57283303300, https://orcid.org/0000-0003-3231-8569, zinkevich1985@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17.10.2024 Одобрена после рецензирования 10.12.2024 Принята к печати 24.01.2025

- Qi C.R., Li, Y, Su H., Guibas L.J. PointNet++: deep hierarchical feature learning on point sets in a metric space. arXiv, 2017, arXiv:1706.02413v1. https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.02413
- Varney N., Asari, V.K., Graehling Q. DALES: a large-scale aerial LiDAR data set for semantic segmentation. *Proc. of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops* (*CVPRW*). 2020. pp. 1–10. https://doi.org/10.1109/ cvprw50498.2020.00101

#### Authors

Sergey V. Sai — D.Sc., Full Professor, Pacific National University, Khabarovsk 680035, Russian Federation, sc 14042260800, https://orcid. org/0000-0002-4506-1857, sai1111@rambler.ru

Alexey V. Zinkevich — PhD, Associate Professor, Pacific National University, Khabarovsk 680035, Russian Federation, sc 57283303300, https://orcid.org/0000-0003-3231-8569, zinkevich1985@mail.ru

Received 17.10.2024 Approved after reviewing 10.12.2024 Accepted 24.01.2025



Работа доступна по лицензии Creative Commons «Attribution-NonCommercial» **VİTMO** 

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ январь-февраль 2025 Том 25 № 1 http://ntv.ifmo.ru/ SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS January-February 2025 Vol. 25 No 1 http://ntv.ifmo.ru/en/ ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

университет итмо

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-78-86

### Directional variance-based algorithm for digital image smoothing Zohair Al-Ameen<sup>⊠</sup>

ICT Research Unit, University of Mosul, Mosul, 41002, Iraq

qizohair@uomosul.edu.iq<sup>\Box</sup>, https://orcid.org/0000-0003-3630-2134

#### Abstract

Image smoothing is vital in image processing as it attenuates the texture and unnecessary high-frequency components and provides a smooth image with a preserved structure to facilitate subsequent operations or analysis. Smoothed images are required in many image processing applications, such as details boost, sharpening, High Dynamic Range imaging, edge detection, stylization, abstraction, etc. Still, not all existing smoothing methods are successful in this task, as some undesirable problems may be introduced, such as removing significant details, introducing excessive blurring, processing flaws, halos, and other artifacts. Thus, the opportunity still stands to provide a new algorithm that smooths an image efficiently. This study concisely explores smoothing via the Directional Variances (DV) concept. The proposed algorithm leverages the DV concept to minimize energy, seeking a balance between essential structural preservation and smoothness. The proposed algorithm iteratively smooths the image using DV, diffusion, regularization, and energy minimization. A thorough evaluation is conducted on diverse images, showcasing the effectiveness of the developed algorithm. The results demonstrate that the developed DV-based algorithm has superb abilities in smoothing different images while preserving structural details, making it a valuable tool for various applications in digital image processing.

#### Keywords

Chan-Vese, regularization, image smoothing, diffusion, directional variance

#### Acknowledgments

I have heartfelt gratitude to the Computer Center staff for the aid that led to the completion of this research.

For citation: Zohair Al-Ameen. Directional variance-based algorithm for digital image smoothing. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 1, pp. 78–86. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-78-86

УДК 004.932

# Алгоритм сглаживания цифровых изображений на основе дисперсии направлений

#### Зохаир Аль-Амин⊠

Отделение информационных технологий Университета Мосула, Мосул, 41002, Ирак qizohair@uomosul.edu.iq<sup>⊠</sup>, https://orcid.org/0000-0003-3630-2134

#### Аннотация

Технология сглаживания изображений применяется при обработке изображений. Использование данной технологии ослабляет текстуру и ненужные высокочастотные компоненты, обеспечивает получение гладкого изображения с сохраненной структурой для облегчения последующих операций корректировки или анализа. Получение сглаженных изображений требуется во многих приложениях при обработке, например, High Dynamic Range изображений, при усилении деталей, повышении резкости, обнаружении краев, стилизации, абстракции и т. д. При этом, не все существующие методы сглаживания изображений успешно справляются с поставленной задачей. В результате могут возникнуть нежелательные проблемы, такие как удаление существенных деталей, введение чрезмерного размытия, дефекты обработки, ореолы и другие артефакты. В работе представлен новый алгоритм, который эффективно сглаживает изображение. Алгоритм основан на концепции направленных дисперсий (Directional Variances, DV) для минимизации энергии и получения баланса

<sup>©</sup> Zohair Al-Ameen, 2025

между сохранением структуры и гладкостью. С помощью концепции DV представленный алгоритм итеративно сглаживает изображение, диффузии, осуществляет регуляризацию и минимизацию энергии. Выполненная оценка полученных результатов на различных изображениях показала эффективность разработанного алгоритма. Алгоритм на основе DV обладает превосходными возможностями сглаживания изображений, сохраняя при этом структурные детали, что делает его ценным инструментом для приложений, применяемых в области цифровой обработки изображений.

Ключевые слова

метод Чан-Везе, регуляризация, сглаживание изображений, диффузия, направленная дисперсия

#### Благодарности

Автор благодарен сотрудникам компьютерного центра Президентства Университета Мосула за помощь в завершении исследования.

Ссылка для цитирования: Зохаир Аль-Амин. Алгоритм сглаживания цифровых изображений на основе дисперсии направлений // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 1. С. 78–86 (на англ. яз.). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-78-86

#### Introduction

Various real-life imaging applications demand the attenuation of insignificant information while maintaining significant structural details of an image, called image smoothing [1]. Smoothed images are required in many image processing applications, such as details boost, sharpening, pattern recognition, High Dynamic Range (HDR) imaging, edge detection, stylization, abstraction, matrix completion, image restoration, and more [2]. Image smoothing has been an active research topic for many years due to its importance in image processing, computer graphics, and computer vision. Its main goal is attenuating high-frequency components and textural information and maintaining the significant edges and structural information [3]. Because of its importance, dissimilar approaches have been developed in recent years. In 2016, a random walks-based algorithm was presented [4] which initiates by getting the selected image and the related parameters. Next, the weights for the image edges are determined using a Gaussian weighting approach. After that, the weighted adjacency array of the input image is constructed along with the diagonal array containing the degree of every used node. A particular minimization function is applied to smooth and generate the output image using this predetermined datum.

In 2017, a truncated total variation algorithm was introduced [5], starting by receiving the input image and the needed parameters. Next, the iteration begins, and the image is updated using the Euler-Lagrange approach followed by applying a unique minimizer to shrink the unwanted energies. After that, the image is modified using fixed solvers and total variation. This process is repeated until the iterations are finished and the output image is produced. In 2018, a sparse high-frequency gradient-based algorithm was created [6], wherein it initially decomposes the input image into high-frequency and constant components, in that the high-frequency is the non-smooth information and the constant is the smooth information. Next, the non-smooth information is eliminated if it has gradients with high frequency, and the other information is smoothed and combined with the sparse constraint to generate the resulting image.

In 2019, a 4th-order partial differential-based algorithm was proposed [7], starting by getting the input image and the required parameters related to the Gaussian kernel, fidelity, contrast, number of iterations, and the time step. A preprocessing phase begins by computing the diffusion tensor for every pixel, calculating the intensity change for each pixel, and updating the image accordingly. Next, the preprocessed image is fed to another iterative process which begins by computing the boundary conditions for each pixel, calculating two unique functions, and updating the image accordingly. The final image from the aforesaid iterative process is the resulting image. In 2020, a two-stage smoothing algorithm that depends on patch decomposition and histogram equalization was delivered [8], aiming to decrease the gradients of the textural details while increasing the gradient of significant structural edge details. The algorithm starts by dividing the input image into different patches, where the edge and textural information are concerted using a specialized segmentation process. The histogram equalization procedure is then applied to edge patches to improve the gradient of edges. Next, an  $L_0$ gradient minimization approach is implemented to smooth each patch, and then an inverse equalization process is applied to ensure the edge boundary continuity. Finally, the overall image is filtered by an  $L_0$  gradient minimization approach to attenuate the remaining textures and create the outcome.

In 2021, a multi-scale selective texture attenuation bested algorithm was developed [9], as it initially generates three scales of the image and applies Breadth-First Search (BFS) to purify the edges of the mid-scale. In addition, a mask that signifies non-texture and texture areas is extracted using BFS and an intuitive texture locator. This mask is then utilized to preserve structural information on the low scale and performs complete texture smoothing on the high scale. The output image is created by blending the outcomes of the masking operations. In 2022, a decomposition with a total variation-based algorithm was introduced [10], as it begins by increasing the difference between textural and structural details by applying a specialized filtering procedure. Next, the image is decomposed in the frequency domain with a limited multidirectional gradient, and the smooth elements are extracted. After that, the relative total variation approach is implemented on the smooth elements depending on the structural differences to attenuate the textural information while keeping the structural details. By iteratively performing these operations at different scales, the image is smoothed, and the resulting image is returned when the iterations end. In 2023, a weighted

sparse gradient-based algorithm was proposed [11], starting by suppressing gradients with low amplitude via an edgeaware mapping process. Next, the filtered gradients are sent to a weighted  $L_1$  gradient remodeling phase to impose sparsity on the resulting gradients and enable the edge-aware feature. The resulting image is generated using a blend of Fourier optimization and augmented Lagrange multipliers.

The methods reviewed show that different processing concepts were used, but most are of high complexity and involve numerous computations. Still, the chance remains to introduce an algorithm that can smooth an image while preserving its main structure without using colossal computations. Thus, a Directional Variances (DV) based algorithm is developed to perform proper image smoothing while keeping structural details. The proposed algorithm iteratively smooths the image using DV, diffusion, regularization, and energy minimization. It has been tested by applying it on various images, checking the smoothing correctness visually and via the help of gradient maps and image evaluation methods through different iterations. The results obtained are promising, and an innovative processing concept for image smoothing has proved valid.

#### **Proposed Algorithm**

Digital images consist of two parts: color variations and structural details. The structural details are represented as edges in between the smooth variations. The color variations are termed Low-Frequency (LF) components, whereas the structural details are termed High-Frequency (HF) components. The LF components establish the base of the image, while the HF components are added to the image, providing the image details [12]. Hence, the HF components are more significant as they provide visible details to the image. The proposed algorithm is developed based on this notion by utilizing the DV concept to detect the overall HF information of the image so that such information is reduced to get the smoothed image that maintains the original structure of the input image.

The DV is a concept that has a tremendous ability to detect HF components in that it has different forms and methodologies to do so. The idea of the DV concept is to calculate differences between neighboring pixels in various directions to get the variance information which is deemed the HF components, then attenuate such components and create a simplified image representation. The Chan-Vese (CV) detectors ( $\chi_1$ ,  $\chi_2$ ,  $\chi_3$ , and  $\chi_4$ ), which were initially designed for image segmentation, can provide reasonable performance in detecting the HF information by capturing the intensity differences and gradients. These detectors measure the differences in intensity and gradient magnitude in different directions, and they are expressed in [13] as:

$$\chi_1 = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon^2 + (u_{i+1,j}^k - u_{i,j}^k)^2 + \omega(u_{i,j+1}^k - u_{i,j-1}^k)^2}},$$
 (1)

$$\chi_2 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon^2 + (u_{i,j}^k - u_{i-1,j}^k)^2 + \omega(u_{i-1,j+1}^k - u_{i-1,j-1}^k)^2}}, \qquad (2)$$

$$\chi_3 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon^2 + \omega (u_{i+1,j}^k - u_{i-1,j}^k)^2 + (u_{i,j+1}^k - u_{i,j}^k)^2}},$$
 (3)

$$\chi_4 = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon^2 + \omega (u_{i+1,j-1}^k - u_{i-1,j-1}^k)^2 + (u_{i,j}^k - u_{i,j-1}^k)^2}}, \qquad (4)$$

where  $u_{i,i}^k$  is the processed image at every iteration k;  $\omega$  is a unique weight that is used to tune the detectors, in that it is set by default to  $\omega = 0.25$ ;  $\varepsilon = 10^{-5}$  small constant used to avoid division by zero; i, j are image coordinates;  $f_{i,j}$  is the inputted image, in that  $u_{i,j}^k = f_{i,j}$  is set at the first iteration;  $u_{i,j}^k$  is the image in the original position;  $u_{i+1,j}^k$  shifted up;  $u_{i-1,j}^k$  shifted down;  $u_{i,j+1}^k$  shifted right;  $u_{i,j-1}^k$  shifted left;  $u_{i-1,j+1}^k$  shifted down right;  $u_{i-1,j-1}^k$  shifted down left, and  $u_{i+1,j-1}^k$  shifted up left. These four CV detectors utilize the DV concept wherein each CV detectors is constitute to the DV concept, wherein each CV detector is sensitive to intensity differences in a particular direction. Accordingly,  $\chi_3$  in Eq. (3) and  $\chi_4$  in Eq. (4) capture differences in the horizontal direction, while  $\chi_1$  in Eq. (1) and  $\chi_2$  in Eq. (2) capture differences in the vertical direction. Next, the output of the four CV detectors is refined by providing HF information reduction while preserving the edges using a Non-Linear Diffusion (NLD) procedure. The NLD helps maintain structural information, which is paramount, wherein regions with vital details undergo less smoothing, while areas with fewer details are more strongly smoothed. Those described above can be accomplished through exponential weighting that modulates the diffusion procedure. The standard NLD function can be expressed as in [14]:

$$D(|\nabla I|) = \exp\left(-\frac{\nabla I}{\alpha}\right),\tag{5}$$

where in Eq. (5)  $\nabla$  represents the gradient operator,  $\alpha$  represents a diffusion parameter, and *I* represents the filtered image. This function is applied to the four CV detectors to refine their output, as discussed earlier, as defined below:

$$\overline{\chi}_{1} = \chi_{1} \exp\left(-\frac{|u_{i,j}^{k} - u_{i+1,j}^{k}|}{\alpha}\right), \tag{6}$$

$$\bar{\chi}_2 = \chi_2 \exp\left(-\frac{|u_{i,j}^k - u_{i-1,j}^k|}{\alpha}\right),$$
 (7)

$$\bar{\chi}_3 = \chi_3 \exp\left(-\frac{|u_{i,j}^k - u_{i,j+1}^k|}{\alpha}\right),\tag{8}$$

$$\bar{\chi}_4 = \chi_4 \exp\left(-\frac{|u_{i,j}^k - u_{i,j-1}^k|}{\alpha}\right),\tag{9}$$

where in Eq. (6) to Eq. (9),  $\alpha$  controls the strength of the diffusion (i.e., smoothness level), given that a higher value leads to more pronounced smoothness, a smaller value makes the diffusion procedure more sensitive to intensity variations. This scenario helps preserve fine details and edges since diffusion less influences adjacent pixels. Thus, using a lower  $\alpha$  is preferable since, in this work, its value is set to ( $\alpha = 0.5$ ). Next, the overall variance ( $\chi_{\Lambda}$ ) is computed, which represents all the HF information of the image is determined as each of the four detectors has a definite role in acquiring the variations. By computing  $\chi_{\Lambda}$ , the influence of all four detectors is combined, allowing for

Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2025, том 25, № 1 Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2025, vol. 25, no 1 a balanced process between regularization and smoothing. The variance  $\chi_{\Lambda}$  is calculated as follows [13]:

$$\chi_{\Lambda} = \overline{\chi}_1 + \overline{\chi}_2 + \overline{\chi}_3 + \overline{\chi}_4. \tag{10}$$

After that, the projection  $(p_{i,j}^k)$  is computed to guide the diffusion of pixel intensities during each iteration. Accordingly, in regions with significant intensity differences between the central pixel and its adjacent pixels, the component  $p_{i,j}^k$  has significance, aiding in adjusting the value of the central pixel with the aid of the non-linearly diffused detectors. Those mentioned above can be done by using the following equation [15]:

$$p_{i,j}^{k} = (\bar{\chi}_{1}u_{i+1,j}^{k}) + (\bar{\chi}_{2}u_{i-1,j}^{k}) + (\bar{\chi}_{3}u_{i,j+1}^{k}) + (\bar{\chi}_{4}u_{i,j-1}^{k}).$$
(11)

Computing  $p_{i,j}^k$  ensures that the smoothed areas retain similarity to the original structure which is an essential aspect of image smoothing. This is achieved by incorporating information from nearby pixels, including gradient and intensity information, allowing the local image structure to be considered when determining how pixel intensities should be modified. Next, a proper shrinking method must reduce the HF information while preserving essential details. The discrete forward update step of the CV segmentation method mentioned in [13] utilizes several aspects to refine the segmentation process. The update step is mathematically expressed as follows:

$$u_{i,j}^{k+1} =$$
 (12)

$$\frac{u_{i,j}^{k}+g(u^{k})+\lambda\delta(u^{k})[\chi_{1}u_{i+1,j}^{k}+\chi_{2}u_{i-1,j}^{k}+\chi_{3}u_{i,j+1}^{k}+\chi_{4}u_{i,j-1}^{k}]}{1+\Delta\iota\delta(u^{k})\lambda(\chi_{1}+\chi_{2}+\chi_{3}+\chi_{4})},$$

where  $(u_{i,j}^{k+1})$  is the output of each iteration;  $g(u^k)$  and  $\delta(u^k)$  are parameters related to CV segmentation;  $\Delta t$ is responsible for the stability of segmentation, and parameter  $\lambda$  is accountable for the curve smoothness. Eq. (12) is used in image segmentation and needs to be modified to be more suitable for image smoothing. The part  $[\chi_1 u_{i+1,j}^k + \chi_2 u_{i-1,j}^k + \chi_3 u_{i,j+1}^k + \chi_4 u_{i,j-1}^k]$  of Eq. (12) is like the projection mentioned in Eq. (11), and this part  $(\chi_1 + \chi_2 + \chi_3 + \chi_4)$  of Eq. (12) is like Eq. (10) above. Thus, the components related to the segmentation are deleted, and Eq. (12) is remodeled to refine the image effectively and shrink the HF energy. With the refinement, a Laplacian regularization is applied to promote smoothness while reducing the built-up blur and preserving structural details. Moreover, it aims to prevent edges from being distorted when shrinking HF information. Edges are abrupt changes in intensity, and the Laplacian term is sensitive to these changes, helping to maintain them. The Laplacian regularization is the discrete Laplacian differential operator [16] that can be described using the following equation:

$$L_{i,j}^{k} = \left(\frac{(u_{i+1,j}^{k} + u_{i-1,j}^{k} + u_{i,j+1}^{k} + u_{i,j-1}^{k})}{4}\right) - u_{i,j}^{k} .$$
(13)

The shrinking function is mainly utilized to determine how to update the pixel intensities for every iteration to achieve the desired level of smoothness. The remodeled shrinking function can now be described using the following formula:

$$u_{i,j}^{k+1} = \frac{u_{i,j}^{k} + (\lambda p_{i,j}^{k}) - (\lambda L_{i,j}^{k})}{1 + (\lambda \chi_{\Lambda})},$$
(14)

where  $\lambda$  is a smoothness factor that satisfies ( $\lambda = 0.1$ ), Eq. (14) balances the influence of non-linear diffused detectors  $\overline{\chi}_1$ ,  $\overline{\chi}_2$ ,  $\overline{\chi}_3$ ,  $\overline{\chi}_4$  with the Laplacian regularization term by ensuring both data fidelity (as captured by the non-linear diffused detectors) and structural coherence (as facilitated by Laplacian regularization) are considered during the smoothing (update) process. Likewise, Eq. (14) enables adaptive smoothing by adapting to the local context. Accordingly, it allows for more controlled updates to preserve features for regions with high-intensity variations such as edges. In contrast, it will enable substantial updates for regions with low-intensity variations, helping to reduce unwanted variations and enabling better smoothness.

Moreover, updating intensities based on a balance between the data-driven term (diffused detectors) and regularization term (Laplacian regularization) allows for preserving the coherence and consistency of the image shape. The algorithm iteratively updates the image by considering the local image properties. The loop stays for a given number of iterations, and after all iterations end, the smoothed image  $(u_{i,j}^{k+1})$  is returned. The final step involves the application of the standard median filter [17] to eliminate some speckle-like artifacts and deliver the final output image.

To methodically explain how the developed algorithm works, it starts by getting image  $f_{i,j}$  as input, and the number of iterations, which signifies a user-defined parameter controlling the smoothing amount, where a higher value results in more robust smoothing. Next, it sets the values of  $\alpha$ ,  $\omega$ ,  $\lambda$ ,  $\varepsilon$ , and  $(u_{i,j}^k = f_{i,j})$ . The algorithm core lies in the iterative loop that starts by computing the four CV detectors via Eqs (1)–(4). Next, the non-linear diffused CV detectors are calculated via Eqs (6)–(9), along with the overall variance using Eq. (10). Afterwards, the projection is determined using Eq. (11), the Laplacian regularization term is calculated via Eq. (13) followed by the implementation of the shrinking function via Eq. (14). These computations are repeated, the loop continues until all iterations are completed, wherein the standard median filter is applied once on the resulted image  $(u_{i,i}^{k+1})$  as a last step to generate the output image. Lastly, the structural outline of the developed algorithm is given in Fig. 1.

#### **Results and Discussion**

This section is dedicated to the dataset, evaluation methods, experimental results, and the needed analysis. The dataset used in this study is Microsoft Common Objects in Context (COCO) [18]. The COCO dataset is intended for object detection, containing more than 330k images of various scenes with different sizes, wherein more than three hundred images from this dataset were used in this study. Visual and objective assessment methods were used in addition to CPU runtimes for quality evaluation. All developments and experiments were conducted using a



Fig. 1. Structural outline of the introduced DV-based algorithm

laptop with an AMD Ryzen 7 Pro 4750U 1.70 GHz CPU and 32.0 GB of RAM. As for visual assessment, the gradient maps of the output images with a jet color scheme are utilized to better represent structural information and the variations by assigning colors to different values [8]. This can be helpful in visually highlighting the various levels of structural information and variations in an image. The jet color scheme has been utilized in scientific visualization for a long time and has become standard. For objective evaluation, the Average Local Binary Pattern (ALBP) [19] and Mean Gradient Magnitude (MGM) [20] measures have been used to evaluate the textural and HF information of the algorithm across different iterations. ALBP is used to measure textural details as it could provide insights into the impact of smoothing on texture, in that the more texture the algorithm attenuates, the more smoothness occurs.

MGM evaluates the HF information, indicating the gradient strength over the entire image. When an image is smoothed, the gradient magnitude is indirectly affected, resulting in a reduction in gradient magnitude. ALBP and MGM are no-reference assessment methods, wherein a lower value indicates less texture and HF information



*Fig. 2.* Experimental results with gradient maps. Original images (a, c, e); gradient maps of the original images (b, d, f); smoothed images using different iteration values (70, 50, 60) (g, i, k); gradient maps of the smoothed images (h, j, l)



*Fig. 3.* Experimental results of smoothing different images (**Batch 1**). Original images (*a–f*); the smoothing results using different iteration values (50, 80, 60, 70, 50, 80), respectively (*g–l*)

appearance in the smoothed images. As for CPU runtime, it is used to show the computational complexity of the proposed algorithm [21]. The results of the experiments can be seen in Fig. 2 to Fig. 6 and the given Table. As seen in Fig. 2, different images with dissimilar textures have been smoothed by the DV algorithm, where the HF components of the images were significantly reduced, and the output images contain the vital structural components as demonstrated by the before and after gradients maps of each considered image. The gradient maps highlighted the structural information of the smoothed images clearly, helping to identify and describe their essential patterns, wherein their discriminative features clearly show the success of the algorithm in reducing the HF information while retaining the critical image details as the bright areas represent regions with high variations, while darker areas correspond to smoothed regions.

Fig. 3 and Fig. 4 show the results of smoothing different images using the developed algorithm. As observed, the proposed algorithm is successful in smoothing images with various textures and details, attenuating the HF information

and retaining their fundamental structures. To further investigate the performance of the developed DV-based algorithm, an experiment that includes smoothing an image with different iterations and providing the corresponding gradient map for each output is delivered to comprehend various behavioral issues regarding the required time, the amount of texture and HF information attenuation when increasing the iterations. Fig. 5 demonstrates the experiment outcome with the related gradient maps. The Table provides the assessment readings and runtimes through different iterations. Fig. 6 shows a graphical representation of iterations vs quality evaluation readings.

From the experiments conducted, it can be observed that the runtimes increase almost linearly when the iteration number increases. Moreover, the readings of the ALBP indicate that the developed algorithm can attenuate the texture even after more iterations are utilized, and the decrease in textural information is somewhat straight. As for MGM, the readings indicate that the ability of the developed algorithm to reduce HF information is strongly present. The significant processing happens in the first 150



*Fig. 4.* Experimental results of smoothing different images (**Batch 2**). Original images (a-f); the smoothing results using different iteration values (35, 60, 30, 40, 50), respectively (g-l)



*Fig. 5.* Showing the proposed algorithm smoothing abilities with the gradient maps via different numbers of iterations. Original image (*a*); images (*b*–*f*) and (*m*–*r*) are smoothed images starting at 25 iterations and ending at 275 iterations with an increase of 25; the gradient maps (*g*–*l*) of images (*a*–*f*); the gradient maps (*s*–*x*) of images (*m*–*r*)

| Iterations | ALBP   | MGM      | Runtimes, s |
|------------|--------|----------|-------------|
| 25         | 0.0976 | 0.058585 | 2.159024    |
| 50         | 0.0950 | 0.047315 | 4.066738    |
| 75         | 0.0910 | 0.041448 | 5.986797    |
| 100        | 0.0869 | 0.037540 | 7.933668    |
| 125        | 0.0825 | 0.034665 | 9.804604    |
| 150        | 0.0780 | 0.032452 | 11.739654   |
| 175        | 0.0738 | 0.030690 | 13.633869   |
| 200        | 0.0699 | 0.029532 | 15.600377   |
| 225        | 0.0664 | 0.028549 | 17.460385   |
| 250        | 0.0634 | 0.027893 | 19.526623   |
| 275        | 0.0609 | 0.027189 | 21.328536   |
|            |        |          |             |

Table. Quality evaluation and runtimes via iterations

iterations and begins to decrease after that due to structural preservation supported by the algorithm.

As seen in the gradient maps in Fig. 5, g-l, and Fig. 5, s-x, the effect of attenuating textural and HF information can be seen. The processing ability of the developed algorithm is evident in that the structural, textural, and HF information are mixed in the gradient map in Fig. 5, g. Throughout the iterations, the primary structural details began to be distinguished as textural, and HF information was attenuated. The last gradient map in Fig. 5, x shows only the primary structural details of the image, indicating that the proposed algorithm is successful in its smoothing task.



*Fig. 6.* Readings of the quality evaluation methods through different iterations

#### Conclusion

This paper presents a Directional Variances (DV) based algorithm for image smoothing that iteratively refines the image via the DV concept, diffusion, regularization, and energy minimization. The DV is used to capture the High-Frequency (HF) information, the diffusion is applied to facilitate the smoothing process, the regularization reduces the built-up blur, and the energy minimization utilizes those as mentioned earlier to reduce the HF and textural information. The iterative feature allows for continuous refinement until the anticipated level of smoothness is attained. The developed algorithm has been tested with different images checked using various numbers of iterations with gradient maps and two assessment methods. The results showed promising abilities as the DV algorithm enabled adequate textural and HF information attenuation through a computationally efficient algorithm, in that the output images showed efficiency in reducing the

#### References

- Sun X., Lv X., Zhu G., Fang B., Jiang L. Fast additive half-quadratic iterative minimization for lp — lq image smoothing. *IET Image Processing*, 2023, vol. 17, no. 6, pp. 1739–1751. https://doi. org/10.1049/ipr2.12751
- Huang J., Wang H., Wang X., Ruzhansky M. Semi-sparsity for smoothing filters. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2023, vol. 32, pp. 1627–1639. https://doi.org/10.1109/TIP.2023.3247181
- Liu W., Zhang P., Huang X., Yang J., Shen C., Reid I. Real-time image smoothing via iterative least squares. *ACM Transactions on Graphics*. 2020, vol. 39, no. 3, pp. 1–24. https://doi.org/10.1145/3388887
- Wang Z., Wang H. Image smoothing with generalized random walks: Algorithm and applications. *Applied Soft Computing*, 2016, vol. 46, pp. 792–804. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.01.003
- Dou Z., Song M., Gao K., Jiang Z. Image Smoothing via Truncated Total Variation. *IEEE Access*, 2017, vol. 5, pp. 27337–27344. https:// doi.org/10.1109/access.2017.2773503
- Ma G.H., Zhang M.L., Li X.M., Zhang C.M. Image smoothing based on image decomposition and sparse high frequency gradient. *Journal* of Computer Science and Technology, 2018, vol. 33, no. 3, pp. 502– 510. https://doi.org/10.1007/s11390-018-1834-3
- Wang N., Chen Y., Yao L., Zhang Q., Jia L., Gui Z. Image smoothing via adaptive fourth-order partial differential equation model. *Journal* of *Engineering*, 2019, vol. 2019, no. 11, pp. 8198–8206. https://doi. org/10.1049/joe.2018.5443
- Liu Y., Ma X., Li X., Zhang C. Two-stage image smoothing based on edge-patch histogram equalisation and patch decomposition. *IET Image Processing*. 2020, vol. 14, no. 6, pp. 1132–1140. https://doi. org/10.1049/iet-ipr.2019.0484
- Liu C., Feng Y., Yang C., Wei M., Wang J. Multi-scale selective image texture smoothing via intuitive single clicks. *Signal Processing: Image Communication*, 2021, vol. 97, pp. 116357. https://doi. org/10.1016/j.image.2021.116357
- Ye-Peng L., De-Zhi Y., Si-Yuan L., Fan Z., Cai-Ming Z. Image smoothing based on image decomposition and relative total variation. *Journal of Graphics*, 2022, vol. 43, no. 6, pp. 1143–1149. https://doi. org/10.11996/JG.j.2095-302X.2022061143
- Zeng L., Chen Y., Yang Y., Pan Z. Edge-aware image smoothing via weighted sparse gradient reconstruction. *Signal, Image and Video Processing*, 2023, vol. 17, no. 8, pp. 4285–4293. https://doi. org/10.1007/s11760-023-02661-5
- Zuo Z., Lan X., Deng L., Yao S., Wang X. An improved medical image compression technique with lossless region of interest. *Optik*, 2015, vol. 126, no. 21, pp. 2825–2831. https://doi.org/10.1016/j. ijleo.2015.07.005
- Beylerian E. Finding a needle in a haystack: An image processing approach. *SIAM Undergraduate Research Online*, 2013, vol. 6, pp. 54–66. https://doi.org/10.1137/12s0119008
- Ghita O., Robinson K., Lynch M., Whelan P.F. MRI diffusion-based filtering: a note on performance characterization. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 2005, vol. 29, no. 4, pp. 267–277. https://doi.org/10.1016/j.compmedimag.2004.12.003
- Wang J., Lucier B.J. Error bounds for finite-difference methods for Rudin–Osher–Fatemi image smoothing. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 2011, vol. 49, no. 2, pp. 845–868. https://doi. org/10.1137/090769594
- Wan M., Zhao D., Zhao B. Combining Max pooling-Laplacian theory and k-means clustering for novel camouflage pattern design. *Frontiers* in *Neurorobotics*, 2022, vol. 16, pp. 1041101. https://doi.org/10.3389/ fnbot.2022.1041101
- Fahnun B.U., Andani L.S., Fadlillah H.M., Putra H.D. Color image enhancement using filtering and contrast enhancement. *Jurnal Mantik*, 2023, vol. 7, no. 1, pp. 177–184. https://doi.org/10.35335/ mantik.v7i1.3678

irregularities in images. This is uneasy as many existing image-smoothing algorithms have high computational costs. Finally, the future directions regarding this study can be the autonomous determination of required iterations so that it becomes a self-regulating algorithm.

#### Литература

- Sun X., Lv X., Zhu G., Fang B., Jiang L. Fast additive half-quadratic iterative minimization for lp — lq image smoothing // IET Image Processing. 2023. V. 17. N 6. P. 1739–1751. https://doi.org/10.1049/ ipr2.12751
- Huang J., Wang H., Wang X., Ruzhansky M. Semi-sparsity for smoothing filters // IEEE Transactions on Image Processing. 2023. V. 32. P. 1627–1639. https://doi.org/10.1109/TIP.2023.3247181
- Liu W., Zhang P., Huang X., Yang J., Shen C., Reid I. Real-time image smoothing via iterative least squares // ACM Transactions on Graphics. 2020. V. 39. N 3. P. 1–24. https://doi.org/10.1145/3388887
- Wang Z., Wang H. Image smoothing with generalized random walks: Algorithm and applications // Applied Soft Computing. 2016. V. 46. P. 792–804. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.01.003
- Dou Z., Song M., Gao K., Jiang Z. Image Smoothing via Truncated Total Variation // IEEE Access. 2017. V. 5. P. 27337–27344. https:// doi.org/10.1109/access.2017.2773503
- Ma G.H., Zhang M.L., Li X.M., Zhang C.M. Image smoothing based on image decomposition and sparse high frequency gradient // Journal of Computer Science and Technology. 2018. V. 33. N 3. P. 502–510. https://doi.org/10.1007/s11390-018-1834-3
- Wang N., Chen Y., Yao L., Zhang Q., Jia L., Gui Z. Image smoothing via adaptive fourth-order partial differential equation model // Journal of Engineering. 2019. V. 2019. N 11. P. 8198–8206. https://doi. org/10.1049/joe.2018.5443
- Liu Y., Ma X., Li X., Zhang C. Two-stage image smoothing based on edge-patch histogram equalisation and patch decomposition // IET Image Processing. 2020. V. 14. N 6. P. 1132–1140. https://doi. org/10.1049/iet-ipr.2019.0484
- Liu C., Feng Y., Yang C., Wei M., Wang J. Multi-scale selective image texture smoothing via intuitive single clicks // Signal Processing: Image Communication. 2021. V. 97. P. 116357. https://doi. org/10.1016/j.image.2021.116357
- Ye-Peng L., De-Zhi Y., Si-Yuan L., Fan Z., Cai-Ming Z. Image smoothing based on image decomposition and relative total variation // Journal of Graphics. 2022. V. 43. N 6. P. 1143–1149. https://doi.org/10.11996/JG.j.2095-302X.2022061143
- Zeng L., Chen Y., Yang Y., Pan Z. Edge-aware image smoothing via weighted sparse gradient reconstruction // Signal, Image and Video Processing. 2023. V. 17. N 8. P. 4285–4293. https://doi.org/10.1007/ s11760-023-02661-5
- Zuo Z., Lan X., Deng L., Yao S., Wang X. An improved medical image compression technique with lossless region of interest // Optik. 2015. V. 126. N 21. P. 2825–2831. https://doi.org/10.1016/j. ijleo.2015.07.005
- Beylerian E. Finding a needle in a haystack: An image processing approach // SIAM Undergraduate Research Online. 2013. V. 6. P. 54– 66. https://doi.org/10.1137/12s0119008
- Ghita O., Robinson K., Lynch M., Whelan P.F. MRI diffusion-based filtering: a note on performance characterization // Computerized Medical Imaging and Graphics. 2005. V. 29. N 4. P. 267–277. https:// doi.org/10.1016/j.compmedimag.2004.12.003
- Wang J., Lucier B.J. Error bounds for finite-difference methods for Rudin–Osher–Fatemi image smoothing // SIAM Journal on Numerical Analysis. 2011. V. 49. N 2. P. 845–868. https://doi. org/10.1137/090769594
- Wan M., Zhao D., Zhao B. Combining Max pooling-Laplacian theory and k-means clustering for novel camouflage pattern design // Frontiers in Neurorobotics. 2022. V. 16. P. 1041101. https://doi. org/10.3389/fnbot.2022.1041101
- Fahnun B.U., Andani L.S., Fadlillah H.M., Putra H.D. Color image enhancement using filtering and contrast enhancement // Jurnal Mantik. 2023. V. 7. N 1. P. 177–184. https://doi.org/10.35335/mantik. v7i1.3678

- Lin T.Y., Maire M., Belongie S., Hays J., Perona P., Ramanan D., Dollár P., Zitnick C.L. Microsoft COCO: Common objects in context. *Lecture Notes in Computer Science*, 2014, vol. 8693, pp. 740–755. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10602-1 48
- Singh K.R., Chaudhury S. Comparative analysis of texture feature extraction techniques for rice grain classification. *IET Image Processing*, 2020, vol. 14, no. 11, pp. 2532–2540. https://doi. org/10.1049/iet-ipr.2019.1055
- Li C., Ju Y., Bovik A.C., Wu X., Sang Q. No-training, no-reference image quality index using perceptual features. *Optical Engineering*, 2013, vol. 52, no 5, pp. 057003. https://doi.org/10.1117/1. oe.52.5.057003
- Yang Y., He T., Zeng L., Zhao Y., Wang X. Soft clustering based on high- and low-level features for image smoothing. *Journal of Electronic Imaging*, 2023, vol. 32, no. 1, pp. 013028. https://doi. org/10.1117/1.jei.32.1.013028

#### Author

Zohair Al-Ameen — PhD (Computer Science), Associate Professor, Researcher, ICT Research Unit, University of Mosul, Mosul, 41002, Iraq, SC 55377732400, https://orcid.org/0000-0003-3630-2134, qizohair@ uomosul.edu.iq

Received 23.10.2024 Approved after reviewing 13.12.2024 Accepted 22.01.2025

- Lin T.Y., Maire M., Belongie S., Hays J., Perona P., Ramanan D., Dollár P., Zitnick C.L. Microsoft COCO: Common objects in context // Lecture Notes in Computer Science. 2014. V. 8693. P. 740– 755. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10602-1\_48
- Singh K.R., Chaudhury S. Comparative analysis of texture feature extraction techniques for rice grain classification // IET Image Processing. 2020. V. 14. N 11. P. 2532–2540. https://doi.org/10.1049/ iet-ipr.2019.1055
- Li C., Ju Y., Bovik A.C., Wu X., Sang Q. No-training, no-reference image quality index using perceptual features // Optical Engineering. 2013. V. 52. N 5. P. 057003. https://doi.org/10.1117/1.oe.52.5.057003
- Yang Y., He T., Zeng L., Zhao Y., Wang X. Soft clustering based on high- and low-level features for image smoothing // Journal of Electronic Imaging. 2023. V. 32. N 1. P. 013028. https://doi. org/10.1117/1.jei.32.1.013028

#### Автор

Зохаир Аль-Амин — PhD (компьютерные технологии), доцент, исследователь, Отделение информационных технологий Университета Мосула, Мосул, 41002, Ирак, 📧 55377732400, https://orcid.org/0000-0003-3630-2134, qizohair@uomosul.edu.iq

Статья поступила в редакцию 23.10.2024 Одобрена после рецензирования 13.12.2024 Принята к печати 22.01.2025



Работа доступна по лицензии Creative Commons «Attribution-NonCommercial» νίτμο

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ январь-февраль 2025 Том 25 № 1 http://ntv.ifmo.ru/ SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS January-February 2025 Vol. 25 No 1 http://ntv.ifmo.ru/en/ ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОЛТИК

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-87-94 УДК 004.852

### Создание модельных наборов целевых классов DAS-сигналов с использованием технологии генеративных состязательных нейронных сетей

#### Андрей Владимирович Тимофеев<sup>⊠</sup>

ТОО «Эквалайзум», Астана, 010000, Казахстан

timofeev.andrey@gmail.com<sup>\Box</sup>, https://orcid.org/0000-0001-7212-5230

#### Аннотация

Введение. Предложен новый метод генерации модельных наборов (Distributed Acoustic Sensing, DAS) сигналов различных классов. Статистические характеристики модельных сигналов аналогичны peaльным DASсигналам соответствующих классов и могут быть использованы для повышения качества обработки DASсигналов методами машинного обучения. Метод. Представленный метод состоит в модификации технологии генеративных состязательных сетей (Generative Adversarial Network, GAN). Новизна подхода заключается во введении дополнительного контура внешнего контроля эффективности генеративной сети, который включает классификатор, обученный на доступном (малом) корпусе реальных DAS-сигналов. Основные результаты. Предложен оригинальный метод генерации модельных наборов DAS-сигналов, основанный на технологии GAN, и отличающийся от классической технологии наличием дополнительного контура внешнего контроля качества. Сформулирован критерий оптимальности генерирующей системы, который достигается путем пошагового реконфигурирования нейросетевой структуры GAN. Реконфигурирование основано на методе оптимизации Нелдера-Мида. Разработана и исследована на реальных данных программная реализация предложенного метода на платформе Python. Приведены результаты, доказывающие практическую эффективность рассмотренного подхода. Использование метода позволило увеличить мощность обучающего корпуса данных и, тем самым, повысить результирующую надежность классификации целевых DAS-сигналов. Обсуждение. Разработанный подход перспективен для применения в тех случаях, когда емкость представленных для обучения корпусов данных недостаточна для обеспечения высоконадежной классификации.

#### Ключевые слова

GAN, машинное обучение, классификация, оптоволоконная система мониторинга, DAS, генеративная модель

Ссылка для цитирования: Тимофеев А.В. Создание модельных наборов целевых классов DAS-сигналов с использованием технологии генеративных состязательных нейронных сетей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 1. С. 87–94. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-87-94

# DAS signal modeling using the generative adversarial neural network technique Andrey V. Timofeev

Equalizum LLP, Astana, 010000, Kazakhstan

timofeev.andrey@gmail.com<sup>\Box</sup>, https://orcid.org/0000-0001-7212-5230

#### Abstract

A new method of generating model sets of Distributed Acoustic Sensing (DAS) signals of different classes is proposed. Statistical characteristics of model signals are quite similar to real DAS-signals of corresponding classes and can be used for sharp improvement of DAS-signals processing quality by machine learning methods. The proposed method is a modification of the Generative Adversarial Network (GAN) technique. The novelty of the approach lies in the introduction of an additional external control loop for the performance of the generative network which includes a classifier trained on an available (small) corpus of real DAS signals. A method for generating model sets of DAS signals based on GAN technology is proposed, and it differs from the classical technology by the presence of an additional

© Тимофеев А.В., 2025

Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2025, том 25, № 1 Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2025, vol. 25, no 1 external quality control loop. An optimality criterion for the generating system is formulated, the optimum of which is achieved by step-by-step reconfiguration of the GAN neural network structure. Reconfiguration is based on the Nelder-Mead optimization method. A software implementation of the proposed solution architecture on the Python platform is developed and tested on real data. Results are presented proving the practical efficiency of the proposed method. In particular, the proposed method allowed to increase the capacity of the training dataset and, thus, to increase the resulting reliability of the classification of target DAS signals. The developed approach is promising for use in cases where the capacity of the datasets provided for training is insufficient to ensure highly reliable classification.

#### Keywords

GAN, machine learning, classification, fiber optic monitoring system, DAS, generative model

For citation: Timofeev A.V. DAS signal modeling using the generative adversarial neural network technique. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 1, pp. 87–94 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-87-94

#### Введение

Системы Coherent Optical Time Domain Reflectometer (C/F-OTDR) [1-3] широко используются для комплексного мониторинга протяженных объектов, например, для контроля текущего состояния трубопроводных систем. C/F-OTDR-системы также называются системами распределенного акустического зондирования (Distributed Acoustic Sensing, DAS) мониторинга. DAS используют виброчувствительность потока инфракрасной энергии, который генерируется полупроводниковыми, высококогерентными лазерами и передается через оптоволокно в импульсном режиме. DAS-системы могут быть применены для мониторинга различных физических явлений, таких как вибрации и акустические сигналы, что делает их полезными в различных областях, включая безопасность, мониторинг протяженной инфраструктуры и научные исследования, например, сейсмологические. Одной из важных и довольно сложных задач акустического мониторинга данного типа является не только регистрация полезного сигнала, но и его последующая, эффективная обработка с целью выделения информативной составляющей, необходимой для решения прикладных задач контроля и диагностики состояния контролируемого объекта. На практике DAS-системы способны эффективно контролировать виброакустическое поле объекта мониторинга в частотном диапазоне [0, 500] Гц. Основными задачами DAS-систем является обнаружение и классификация целевых, виброакустических сигналов, которые представляют собой крайне редкие явления и принимаются на фоне широкополосного, нестационарного помехового процесса. Решение о типе обнаруженного сигнала принимается подсистемой классификации, которая основана на методах машинного обучения (Machine Learning, ML) [1]. Подсистему классификации условимся называть ML-классификатором. Сигналы, генерируемые C/F-OTDR-системой, относятся к классу нестационарных, широкополосных шумоподобных сигналов [1]. Их нестационарность и шумоподобность определяется множеством факторов, основными из которых являются следующие: нестационарность динамики виброакустического поля объекта; особенности приемного канала C/F-OTDR-системы [1]. Например, нестационарность виброакустического поля трубопроводной системы, предназначенной для отвода шахтных вод, определяется динамикой процесса перекачки жидкости и технологическим режимом перекачки (давление и скорость движения жидкости внутри трубопровода). В системах данного типа движение жидкости по трубопроводу практически никогда не носит ламинарный характер, наоборот, в данном случае, это движение практически всегда представляет собой турбулентный процесс [4], параметры которого зависят от геометрии трубопровода, давления, плотности и угла напора перемещаемой жидкости. Как результат, виброакустическое поле трубопроводной конструкции, измеряемое посредством C/F-OTDR-системы, имеет ярко выраженный нестационарный, шумоподобный характер [4]. Одна из основных проблем, возникающая при классификации сигналов в C/F-OTDR-системах на практике – проблема критической малости мощности доступных для исследования сигналов целевого типа. Отметим, что данная проблема отсутствует для «фоновых» сигналов, но полученных записей образцов целевых сигналов, с целью обнаружения которых реализуется виброакустический мониторинг объекта, практически всегда недостаточно для полноценного обучения ML-классификатора. Описанная проблема обусловлена тем, что проведение натуральных экспериментов, например, на эксплуатируемом трубопроводе, с целью имитации утечки, представляет собой дорогостоящий, часто практически невозможный процесс. Например, в условиях Крайнего Севера, при температуре окружающей среды минус 50 °С и давлении в трубопроводной системе более 20 бар, создание множества сигналов утечки транспортируемого агента с целью пополнения обучающего набора сигнальных образцов при помощи имитатора отверстия в стенке трубопроводной конструкции сопряжено с технологическими рисками, значительными организационными и материальными издержками. На такие издержки эксплуатирующая трубопровод организация пойти не может.

Таким образом, разработчик C/F-OTDR-систем мониторинга сталкивается с ситуацией дефицита имеющихся в его распоряжении образцов целевых сигналов, например, сигналов от утечек транспортируемого по трубопроводной системе агента.

Существует несколько способов решения проблемы малой мощности доступного для исследования корпуса данных, одним из которых является искусственная генерация множества сигналов, эффективно имитирующих сигналы целевые. В настоящей работе предложено решение данной проблемы на базе оригинальным образом модифицированной технологии генеративно-состязательных нейронных сетей (Generative Adversarial Network, GAN). Также представлена новая схема генерации имитационных сигналов.

#### Генеративно-состязательные нейронные сети

GAN предназначена для генерации стохастических объектов подобных объектам, которые исходно представлены в доступном «эталонным» множестве X. Впервые эта модель была предложена в работе [5], развита в [6, 7] и множестве других. Фактически, GAN представляет собой алгоритм машинного обучения без учителя, основанный на связанной комбинации из двух нейронных сетей. Одна из этих сетей, называемая генеративной моделью (генератором), генерирует образцы, которые имитируют эталонные образцы из Х. Другая из этих сетей называется дискриминатором и предназначена для проверки того, насколько образцы, созданные генератором, похожи на образцы из эталонного множества Х. В процессе генерации используются случайные наборы из, так называемого, «латентного пространства», которое, по сути, представляет собой некое случайное поле ограниченной размерности. Размерность этого поля входит в множество гиперпараметров GAN. Согласно идее, заложенной в GAN, генератор получает случайные векторы из этого латентного пространства и преобразует их в имитационные образцы, степень похожести которых на образцы из Х, собственно, и определяет дискриминатор. Дискриминатор обучается различать подлинные и сымитированные образцы, а результаты дискриминации подаются на вход генератора для того, чтобы генератор имел возможность, в процессе конкурентного обучения, выбрать оптимальный набор латентных параметров. В результате, целью генератора является максимальное повышение процента ошибок дискриминатора. И наоборот, целью дискриминатора является максимальное повышение надежности распознавания сымитированного образца. В рамках концепции GAN, в процессе совместного

конкурентного обучения, генератор и дискриминатор должны достигнуть некоего сбалансированного состояния. Сбалансированность в контексте GAN подразумевает то, что генератор и дискриминатор достигли такого состояния, в котором генератор способен создавать убедительные имитации объектов из эталонного класса *X*, а дискриминатор способен эффективно отличать эти имитации от образцов из *X*. В этом случае говорят о минимаксном состоянии равновесия по Нэшу, в рамках которого генератор и дискриминатор достигли определенно высокого уровня качества. В этом случае GAN представляет собой игру с нулевой суммой между двумя игроками — генератором и дискриминатором. Обобщенная схема GAN представлена на рис. 1.

Упрощенно, общий алгоритм обучения GAN можно представить последовательностью этапов.

Этап 1. Инициализация. На этом этапе инициализируются генератор и дискриминатор. Генератор стартует со случайной инициализации, а дискриминатор может быть инициализирован с помощью любой модели, которая способна различать реальные и сгенерированные данные.

Этап 2. Обновление генератора. Генератор создает набор данных, а затем эти данные подаются на вход дискриминатору. Дискриминатор оценивает, насколько хорошо сгенерированные данные соответствуют реальным данным. Затем эта оценка используется для обновления весов генератора. Цель генератора — получить высокую оценку от дискриминатора.

Этап 3. Обновление дискриминатора. После обновления генератора дискриминатор получает новые сгенерированные данные, а также фрагмент *X*. Дискриминатор оценивает, насколько хорошо сгенерированные данные соответствуют реальным данным. Затем эта оценка используется для обновления весов дискриминатора. Цель дискриминатора — получить высокую оценку для реальных данных и низкую оценку для сгенерированных данных.





Этап 4. Итеративный процесс. Этапы 2 и 3 повторяются до тех пор, пока не будет достигнуто желаемое качество сгенерированных данных.

#### Обозначения и формальная постановка задачи

Пусть  $X \subseteq \mathbb{R}^m$  — множество шумоподобных, динамических C/F-OTDR-сигналов длительностью  $t_k$ , соответствующих K классам  $X_k$ , причем  $X = \bigcup_{k \in K} X_k$ ;  $\bigcap_{k \in K} X_k = \emptyset$ ;  $\mathbb{R}^m$  — темерное евклидово пространство. Для каждого  $k \in K$  на вероятностных пространствах  $\Omega$  и  $\Theta$  заданы величины  $\mathbf{x}^{(k)} \in \mathbb{R}^n$  и  $\mathbf{z}^{(k)} \in \mathbb{R}^m$  с плотностями распределений  $p_k(\mathbf{x}^{(k)})$  и  $\lambda_k(\mathbf{z}^{(k)})$  вида:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^{(k)} \colon \Omega \to X_k, \ \mathbf{x}^{(k)} \sim p_k(\mathbf{x}^{(k)}) \colon \exists i \colon X_k \subseteq X, \\ \mathbf{z}^{(k)} \colon \Theta \to X_k, \ \mathbf{z}^{(k)} \in Z \subseteq R^n, \ \mathbf{z}^{(k)} \sim \lambda_k(\mathbf{z}^{(k)}), \\ k \in K \exists \colon \left( X_k^{(L)} \subseteq X_k, \ |X_k^{(L)}| = N \right), \end{aligned}$$

где  $X_k^{(L)}$ ,  $k \in K$  — априорно заданные множества реальных, «эталонных» образцов сигналов.

Рассмотрим функции  $D_k: X \to [0, 1], k \in K, D_k(\mathbf{x}) = \overline{P}_k(\mathbf{x} \in X_k), \overline{P}_k(\mathbf{x} \in X_k) \longrightarrow$ оценка вероятности того, что  $\mathbf{x} \in X_k$ , при этом, в общем случае,  $\overline{P}_k(\mathbf{x} \in X_k) \neq P_k(\mathbf{x} \in X_k)$ , где  $P_k(\mathbf{x} \in X_k) \longrightarrow$ истинная вероятность  $\mathbf{x} \in X_k$ . Так как  $p_k(\mathbf{x}^{(k)}), k \in K$ , неизвестны, поэтому также неизвестны и  $P_k(\mathbf{x} \in X_k)$ . Функции  $\{D_k | k \in K\}$  называются *дискриминаторами* для классов  $\{X_k\}$ . Для каждого  $k \in K$  существует, но неизвестен, идеальный дискриминатор  $D_k^*: X \to [0, 1]$  такой, что  $D_k^* = P_k(\mathbf{x} \in X_k)$ . Рассмотрим функции  $\{G_k\}$  такие, что  $\forall k \in K$ :  $G_k: Z \to X_k$ . Согласно этому определению, конкретная функция  $G_k$ , принимая в качестве аргумента случайный вектор  $\mathbf{z}^{(k)} \in Z$ , генерирует образец  $G_k(\mathbf{z}^{(k)}) \in X_k$ .

Для каждого  $k \in K$  классическая Vanilla GAN [5, 6] состоит из двух компонентов:  $G_k$  и  $D_k$ . Функционально,  $G_k$  получает на вход  $\mathbf{z}^{(k)}$  и пытается преобразовать эти величины в m-векторы, которые выглядят как обучающие данные из  $X_k^{(L)}$ . С другой стороны,  $D_k$  пытается отличить эти векторы от обучающих данных из  $X_k^{(L)}$ .

Очевидно, что оптимальный генератор  $G_k^*$  удовлетворяет следующему равенству:

$$G_k^* = \operatorname{ArgMax} \int P_k(G_k(z) \in X_k) \lambda_k(z) dz =$$
  
= 
$$\operatorname{ArgMax} \int D_k^*(G_k(z)) \lambda_k(z) dz.$$
  
$$G_k$$

При условии статистической независимости наблюдений в  $X_k^{(L)}$ , легко видеть:

$$D_k^* = \operatorname{ArgMax}_{D_k} \left( E_{x \sim p(x)} [\log D_k(x)] + E_{z \sim q(z)} [1 - \log D_k(G(z))] \right),$$

где *Е* — символ математического ожидания.

В рамках концепции GAN [5, 6], искомые компоненты  $G_k$  и  $D_k$  определяются в результате следующей минимакс-игры между дискриминатором  $D_k$  и генератором  $G_k$ :

$$\min_{G_k \quad D_k} V(D_k, G_k) =$$

$$= E_{x \sim p(x)} [\log D_k(x)] + E_{z \sim q(z)} [1 - \log D_k(G_k(z))].$$
(1)

Согласно [7], функции  $G_k$  и  $D_k$  могут быть представлены в виде нейросетей  $G_k(w_G^{(k)}, \theta_G^{(k)})$  и  $D_k(w_D^{(k)}, \theta_D^{(k)})$ , которые зависят от наборов параметров  $(w_G^{(k)}, \theta_G^{(k)})$  и  $(w_D^{(k)}, \theta_D^{(k)})$  соответственно. При этом  $w_D^{(k)}, w_G^{(k)}$  — весовые коэффициенты, настраиваемые стандартными методами backpropagation [8] и stochastic gradient descent [9], а  $\theta_D^{(k)}, \theta_G^{(k)}$  — гиперпараметры, определяющие структуру соответствующих нейронных сетей.

В рамках настоящей работы рассматривались архитектуры  $G_k(w_G^{(k)}, \theta_G^{(k)})$  и  $D_k(w_D^{(k)}, \theta_D^{(k)})$  с линейным стеком слоев. Данный тип нейросети достаточен для решения поставленной задачи. Другие характеристики нейронной сети, такие как число слоев, тип слоя, количество нейронов в слоях, тип функции активации и другие были включены в набор гиперпараметров. При этом в процессе оптимизации набора гиперпараметров категориальные параметры кодировались обычным унитарным кодом (One-Hot Encoding, [10]). В этом случае решение задачи (1) будет сведено к выбору пар  $(w_G^{(k)}, \theta_G^{(k)})$  и  $(w_D^{(k)}, \theta_D^{(k)})$  для каждого  $k \in K$ . Пусть задан классификатор  $\chi(\mathbf{x}|\bigcup_{k\in K} X_k^{(L)})$ :  $X \to K$ ,

Пусть задан классификатор  $\chi(\mathbf{x} | \bigcup_{k \in K} X_k^{(-)}): X \to K$ , обученный на множестве  $\bigcup_{k \in K} X_k^{(L)} \subseteq X$  и для малых  $\rho_k > 0$ допускающий следующую запись:

$$\forall P\left(\chi\left(\mathbf{x}^{(k)}|\bigcup_{k\in K}X_{k}^{(L)}\right)=k\right)=1-\rho_{k}$$

Необходимо, опираясь на обучающие множества  $X_k^{(L)}$ , путем выбора параметров  $(w_G^{(k)}, \theta_G^{(k)})$  и  $(w_D^{(k)}, \theta_D^{(k)})$ , в процессе решения (1), идентифицировать структуру функций  $G_k$  и  $D_k$  таким образом, чтобы генерируемые величины  $G_k(\mathbf{z}^{(k)})$  имели плотности распределения вероятностей  $g_k(x)$ , близкие к  $p_k(x)$  по некоторой метрике  $D(p_k, g_k)$  при условии

$$\bigvee_{k \in K} P\left(\chi\left(G_k(\mathbf{z}^{(k)}) | \bigcup_{k \in K} X_k^{(L)}\right) = k\right) \to \max.$$
 (2)

Отметим, что в данном случае классификатор  $\chi$  обеспечивает внешний контроль качества функционирования GAN.

Довольно важен вопрос о том, каким образом определяется расстояние  $D(p_k, g_k)$ , представляющее собой степень близости распределений  $g_k(x)$  и  $p_k(x)$ ? Например, для сравнения схожести распределений можно использовать классическую метрику Хеллингера:

$$D_H(p_k, g_k) = 1 - \int \sqrt{p_k(x)g_k(x)dx}$$

В этом случае, чем ближе распределения  $p_k$  и  $g_k$ , тем ближе  $D_H(p_k, g_k)$  к нулю. Очевидно, что

$$\left( \int p_k(x)g_k(x)dx \to \max \right) \Rightarrow \left( \int \sqrt{p_k(x)g_k(x)}dx \to 1 \right) \Rightarrow \Rightarrow \left( D_H(p_k, g_k) \to 0 \right).$$

k

Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2025, том 25, № 1 Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2025, vol. 25, no 1

Так сложилось, что в практике GAN широко используются следующие метрики:

метрика Кульбака–Лейблера

$$D_{KL}(p_k, g_k) = \int_X p_k(x) \log\left(\frac{p_k(x)}{g_k(x)}\right) dx;$$
  
- кросс-энтропия  
$$H(p_k, g_k) = \int_Y p_k(x) \log(g_k(x)) dx;$$

— m-метрика Вассерштейна [11]

$$W_m(p_k, g_k) = \inf_{\gamma \in \Gamma(p_k, g_k)} \left( E_{(x,y)\gamma} d(x, y)^m \right)^{1/\epsilon}$$

 $\Gamma(p_k, g_k)$  — совокупность всех сдваиваний распределений  $p_k, g_k$ , определенных в метрическом пространстве (M, d), где М — носитель метрического пространства; d(x, y) — метрика между  $x, y \in M$ .

Напомним, что  $H(p_k, g_k) = H(p_k) + D_{KL}(p_k, g_k)$ , где  $H(p_k)$  — энтропия  $p_k$ .

Так как варьирование типом метрики представляется исследователям наиболее продуктивным способом развития концепта GAN, было предложено несколько очевидных модификаций GAN, в том числе: «Wasserstein GAN» [12], «Least squares GAN», «Hinge loss GAN», «InfoGAN» [13] и другие, основанные на использовании метрик  $D(p_k, g_k)$  соответствующего типа. Все эти варианты GAN имеют как плюсы, так и минусы, но сама по себе проблема минимаксной оптимизации GAN из (1) до сих пор представляет собой серьезную теоретическую и практическую проблему. В частности, в [14] указывается на то, что GAN, обученные с помощью методов оптимизации первого порядка, как правило, не сходятся к равновесию Нэша. Что, впрочем, не делает эти GAN бесполезными: возможны сценарии, когда генерируемые такими GAN имитированные образцы сигналов могут быть пригодны для практического использования несмотря на то, что они не будут оптимально близки к реальным, эталонным образцам. В [14] доказано то, что GAN-игры с нулевой суммой могут не иметь равновесия Нэша и поэтому предложена другая формулировка равновесия нулевой GAN-игры с целевой функцией, заданной проксимальным оператором. Это равновесие получило название проксимального. Проксимальное равновесие отражает последовательную природу GAN, когда сначала модифицируется генератор, и только потом происходит модификация дискриминатора. В [14] строго доказано, что оптимальная генеративная модель в задачах GAN Вассерштейна обеспечивает проксимальное равновесие. В рамках концепции достижения проксимального равновесия участники игры выбирают стратегию, которая минимизирует максимально возможный убыток независимо от того, какую стратегию выберет другой участник. Различие между равновесием Нэша и проксимальным равновесием заключается в том, что равновесие Нэша фокусируется на минимизации максимального возможного убытка для каждого игрока, в то время как проксимальное равновесие фокусируется на минимизации максимального возможного убытка в общем. Для преодоления проблемы возможного «застревания» классического GAN в равновесии Нэша, в [14] предложено использовать множество генераторов, каждый из которых обучается в режиме соревновании с

другими генераторами, а не только с одним дискриминатором. Таким образом, каждый генератор обучается на основании различных стратегий, что может помочь преодолеть проблему «застревания» GAN в равновесии Нэша. Формирование стратегии, в данном случае, подразумевает использование различных архитектур сети и значений гиперпараметров.

В рамках настоящей работы использовался новый подход к формированию стратегии обучения GAN, который показал практическую приемлемость для исследуемого класса сигналов.

#### Метод решения

При решении поставленной задачи были учтены следующие особенности технологии GAN.

**Особенность 1.** Фундаментальная проблема определения универсального дискриминатора: этот компонент GAN принципиально недоступен в силу ограниченности заданного множества *X*.

Особенность 2. Существующая ныне неопределенность в части универсального метода оценивания эффективности GAN. В настоящее время все практически приемлемые методы оценивания качества GAN разработаны исключительно для нейронных сетей, генерирующих изображения.

Для учета особенности 1 было решено использовать дискриминатор, с приемлемым уровнем качества отделяющий элементы X от образцов, созданных генератором, т. е. определенный только на заданном множестве X. Учет особенности 2 представляет собой существенно более сложную проблему. Дело в том, что в силу динамичности C/F-OTDR-сигналов, классические метрики сходства, например, критерий согласия Колмогорова–Смирнова, Т-критерий Вилкоксона, критерий Фридмана и иные, предполагающие стационарность и независимость выборок, становятся малоинформативными при сравнении распределения выборок искусственно сгенерированных векторов с выборками эталонных векторов из X.

Важно то, что сгенерированные данные предполагается использовать для обучения и тестирования подсистемы классификации C/F-OTDR-сигналов. При этом подсистема классификации C/F-OTDR-сигналов основана на использовании специального пространства признаков [1], при этом преобразование «сырых» C/F-ОТDR-сигналов в пространство признаков, которое обозначим символом  $\Delta$ , является существенно нелинейным. Пусть  $G_k(w_G^{(k)}, \theta_G^{(k)}|\theta_D^{(k)})$  — имитация сигнала *k*-го класса, созданная генератором Gk, который был обучен в противодействии с дискриминатором  $D_k(w_D^{(k)}, \theta_D^{(k)})$ . На вход ML-классификатора х[] поступают вектора  $\Delta(G_k(w_G^{(k)}, \theta_G^{(k)}|\theta_D^{(k)}))$ , при формировании которых компоненты исходных векторов  $G_k(w_G^{(k)}, \theta_G^{(k)}|\theta_D^{(k)})$  используются неравномерно: одни компоненты этих векторов имеют большее влияние на  $\Delta(G_k(w_G^{(k)}, \theta_G^{(k)}|\theta_D^{(k)})),$ другие — меньшее. В силу этих причин, при обучении GAN, в общем случае, нет необходимости в достижении чрезмерно малого значения  $D(p_k, g_k)$ . Главное, чтобы полученное распределение  $g_k$  обеспечивало выполнение условия (2). Как было отмечено, в процессе



*Puc.* 2. Модифицированная схема GAN с «внешним» оценщиком *Fig.* 2. Modified GAN scheme with an "external" estimator

обучения GAN, роль «внешнего» оценщика достигнутой эффективности GAN выполняет априорно заданный ML-классификатор  $\chi$ , построенный по схеме XGBoost и обученный на множестве  $\bigcup X_k^{(L)}$ .

Для решения поставленной задачи предлагается модифицировать схему обработки данных в контуре GAN, добавив дополнительный контур настройки гиперпараметров, основанный на использовании «внешнего» оценщика  $\chi$ , что является новым подходом к формированию структуры GAN. Схематически модифицированная схема GAN приведена на рис. 2. Назначение этого контура состоит в обеспечении выбора параметров  $\theta_D^{(k)}, \theta_G^{(k)}$  таким образом, чтобы выполнить условие (2).

Выбор очередных значений  $\theta_D^{(k)}$ ,  $\theta_G^{(k)}$  реализуется после окончания цикла настойки параметров  $w_D^{(k)}$ ,  $w_G^{(k)}$ , которое производится стандартным методом backpropagation.

Принцип выбора последовательности значений  $\theta_D^{(k)}$ ,  $\theta_G^{(k)}$  может быть осуществлен различными способами — в настоящей работе использован принцип, изложенный в работе [15] и основанный на поиске методом Нелдера–Мида экстремума функции, которая аппроксимирует функционал эффективности гиперпараметров. В качестве критерия эффективности, согласно постановке задачи, использовалась оценка величины

$$P\left(\chi\left[\Delta\left(G_k\left(w_G^{(k)}, \theta_G^{(k)} | \theta_D^{(k)}\right)\right)\right] = k\right)$$
для каждого  $k \in K$ .

В результате решения данной задачи, для каждого  $k \in K$  формируются наборы гиперпараметров  $(\theta_D^{*,(k)}, \theta_G^{*,(k)})$ , для которых

$$P\left(\chi\left[\Delta\left(G_k\left(w_G^{(k)}, \theta_G^{(k)} | \theta_D^{(k)}\right)\right)\right] = k\right) \to \max_{\substack{(\theta_D^{(k)}, \theta_G^{(k)})}}$$

Таким образом, формируются  $G_k(w_G^{(k)}, \theta_G^{*,(k)})$  и  $D_k(w_D^{(k)}, \theta_D^{*,(k)})$ , отвечающие соответствующему классу  $k \in K$ . Иначе говоря, для каждого класса  $k \in K$  формируется отдельная GAN-схема, настроенная на генерацию сигналов именно этого класса.

## Результаты построения и практического использования системы генерации данных

Для апробации предложенного метода использован набор эталонных данных, состав которого представлен в табл. 1. Как было упомянуто в разделе «Введение», статистические параметры фонового процесса зависят от конкретного участка трубопровода. Для численного исследования были взяты образцы фонового процесса (класс 0), которые соответствовали одному из участков трубопроводной конструкции, предназначенной для отвода шахтных вод. Также были использованы образцы целевых сигналов от утечки транспортируемого агента (класс 1) и образцы сигналов механического воздействия на поверхность трубопроводной конструкции (удары, класс 2). Из полученных результатов (табл. 1) следует, что целевые классы представлены сравнительно небольшим числом блоков: 160 15-секундных блоков для класса 2 и 410 таких же блоков для сигналов класса 1. Как показала практика, такой объем данных оказался недостаточным для того, чтобы обучить MLклассификатор ( $\chi$ ) с требуемой надежностью.

В результате предварительного обучения классификатора χ были достигнуты показатели надежности классификации F1-меры. Необходимо было повысить показатели F1-меры для классов 1 и 2 путем использования при его дообучении данных, искусственно сгенерированных при помощи предложенной GANтехнологии.

В результате использования предложенного метода для каждого класса сигналов были созданы соответствующие им нейронные сети генератора и дискриминатора, структура которых представлена в табл. 2.

Входная размерность данных, соответствующая 15-секундному сигнальному блоку, равнялась 360, а число эпох при обучении GAN — 50. Программа для реализации предложенного метода написана на платформе Python 3.10, с использованием библиотеки Keras.

При помощи созданной GAN-системы были сгенерированы 2000 15-секундных блоков сигналов классов 1 и 2, которые были использованы при дообучении ML-классификатора.

В результате дообучения на комбинированной базе данных, состоящей как из реальных сигналов, так и из имитированных, показатель F1-меры для класса 1 повысился от уровня 0,81 до 0,95, а для класса 2 от 0,97 до 0,99.

# *Таблица 1*. Состав набора данных *Table 1*. Dataset composition

| Класс сигнала | Описание класса  | Число 15-секундных блоков | F1-мера |
|---------------|--|---------------------------|---------|
| 0             | Фоновый сигнал   | 1500                      | 0,82    |
| 1             | Сигнал утечки из отверстия диаметром 10 мм                                 | 410                       | 0,81    |
| 2             | Сигнал от механического ударного воздействия на трубопроводную конструкцию | 160                       | 0,97    |

Таблица 2. Нейросетевая структура генератора и дискриминатора для разных классов C/F-OTDR-сигналов Table 2. Neural network structure of generator and discriminator for different classes of C/F-OTDR signals

| 10    |   | Генератор |    |      |      |      |     |    |   | Дискриминатор |    |      |      |      |     |    |
|-------|---|-----------|----|------|------|------|-----|----|---|---------------|----|------|------|------|-----|----|
| Класс | п | FA        | MA | N    | FA_O | N_IN | N_O | LS | n | FA            | MA | N    | FA_O | N_IN | N_O | LS |
| 0     | 3 | Rely      | U  | 20   | TN   | BN   | BN  | CE | 3 | Rely          | U  | 10   | SIG  |      |     | CE |
| 1     | 4 | Rely      | U  | 2560 | TN   | BN   | BN  | CE | 3 | Rely          | U  | 1280 | SIG  | _    | _   | CE |
| 2     | 4 | Rely      | U  | 20   | TN   | BN   | BN  | CE | 3 | Rely          | U  | 10   | SIG  | _    | _   | CE |

Примечание. N — количество нейронов в слое; n — количество полносвязных слоев; FA — функция активации слоя нейронной сети (для полносвязных слоев использовалась функция активации Rectified Linear Units; MA — способ инициализации весов слоя в нейронной сети (U — равномерное распределение для инициализации весов); FA\_O — функция активации выходного слоя сети; N\_IN — входная нормализация; N\_O — выходная нормализация; LS — функция потерь (оптимальной оказалась каноническая функция бинарной кросс-энтропии, которая обозначена символом CE); BN — слой нормализации данных (BatchNormalization); TN — функция активации типа гиперболический тангенс; SIG — функция активации типа сигмоид.

#### Заключение

Предложенный метод генерации DAS-сигналов — универсален и может быть использован для сигналов иных типов в тех случаях, когда доступный для

#### Литература

- Timofeev A.V., Groznov D.I. Classification of Seismoacoustic Emission Sources in Fiber Optic Systems for Monitoring Extended Objects // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2020. V. 56. N 1. P. 50–60. https://doi.org/10.3103/S8756699020010070
- Choi K.N., Juarez J.C., Taylor H.F. Distributed fiber optic pressure/ seismic sensor for low-cost monitoring of long perimeters // Proceedings of SPIE. 2003. V. 5090. P. 134–141. https://doi. org/10.1117/12.484911
- Zuo J., Zhang Y., Xu H., Zhu X., Zhao Z., Wei X., Wang X. Pipeline Leak Detection Technology Based on Distributed Optical Fiber Acoustic Sensing System // IEEE Access. 2020. V. 8. P. 30789–30796. https://doi.org/10.1109/access.2020.2973229
- Тимофеев А.В., Максимов П.Н., Грознов Д.И. Применение оптоволоконной технологии для мониторинга трубопроводных систем отведения шахтных вод в криолитозоне // Гидротехника. 2023. № 3 (72). С. 34–43. https://doi.org/10.55326/22278400\_2023\_3\_34
- Goodfellow I., Pouget-Abadie J., Mirza M., Xu B., Warde-Farley D., Ozair S., Courville A., Bengio Y. Generative Adversarial Nets // Proc. of the 28<sup>th</sup> International Conference on Neural Information Processing Systems. 2014. V. 2. P. 2672–2680.
- Goodfellow, I., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., Courville, A., Bengio, Y. Generative adversarial networks // arXiv. 2014. arXiv:1406.2661. https://doi.org/10.48550/ arXiv.1406.2661
- Goodfellow Ian. NIPS 2016 Tutorial: Generative Adversarial Networks // arXiv. 2017. arXiv:1701.00160. https://doi.org/10.48550/ arXiv.1701.00160
- Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Back-Propagation and Other Differentiation Algorithms // Deep Learning. MIT Press. 2016. P. 200–220.
- 9. Duchi J., Hazan E., Singer Y. Adaptive subgradient methods for online learning and stochastic optimization // Journal of Machine Learning Research. 2011. V. 12. P. 2121–2159.
- Jones K.S. A Statistical interpretation of term specificity and its application in retrieval // Journal of Documentation. 1972. V. 28. N 1. P. 11–21. https://doi.org/10.1108/eb026526
- Rüschendorf L. Wasserstein metric // Encyclopedia of Mathematics / ed. by M. Hazewinkel. Springer, 2000. P. 487–488.
- Erdmann M., Glombitza J., Quast T. Precise simulation of electromagnetic calorimeter showers using a Wasserstein Generative Adversarial Network // Computing and Software for Big Science. 2019. V. 3. N 1. P. 4. https://doi.org/10.1007/s41781-018-0019-7
- Goodfellow I., Pouget-Abadie J., Mirza M., Xu B., Warde-Farley D., Ozair S., Courville A.C., Bengio Y. Generative adversarial nets // Advances in Neural Information Processing Systems 27: Annual Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS). 2014. P. 2672–2680.
- Farnia F., Ozdaglar A. Do GANs always have Nash equilibria? // Proc. of the 37<sup>th</sup> International Conference on Machine Learning, PMLR. 2020. V. 119. P. 3029–3039.
- Тимофеев А.В. Метод выбора гиперпараметров в задачах машинного обучения для классификации стохастических объектов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 5. С. 667–676. https://doi. org/10.17586/2226-1494-2020-20-5-667-676

#### Автор

Тимофеев Андрей Владимирович — доктор технических наук, научный директор, ТОО «Эквалайзум», Астана, 010000, Казахстан, 50 56689367600, https://orcid.org/0000-0001-7212-5230, timofeev. andrey@gmail.com

Статья поступила в редакцию 13.11.2024 Одобрена после рецензирования 17.12.2024 Принята к печати 23.01.2025 обучения корпус данных недостаточен для достижения высоких характеристик качества классификации при использовании стандартных методик обучения. Исследование этих возможностей является целью дальнейших исследований.

#### References

- Timofeev A.V., Groznov D.I. Classification of Seismoacoustic Emission Sources in Fiber Optic Systems for Monitoring Extended Objects. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2020, vol. 56, no. 1, pp. 50–60. https://doi.org/10.3103/S8756699020010070
- Choi K.N., Juarez J.C., Taylor H.F. Distributed fiber optic pressure/ seismic sensor for low-cost monitoring of long perimeters. *Proceedings of SPIE*, 2003, vol. 5090, pp. 134–141. https://doi. org/10.1117/12.484911
- Zuo J., Zhang Y., Xu H., Zhu X., Zhao Z., Wei X., Wang X. Pipeline Leak Detection Technology Based on Distributed Optical Fiber Acoustic Sensing System. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 30789– 30796. https://doi.org/10.1109/access.2020.2973229
- Timofeev A.V., Maksimov P.N., Groznov D.I., Application of fiber optic technology for monitoring the mine water drainage pipeline system in the permafrost zone. *Gidrotehnika*, 2023, no. 3 (72), pp. 34– 43. (in Russian). https://doi.org/10.55326/22278400\_2023\_3\_34
- Goodfellow I., Pouget-Abadie J., Mirza M., Xu B., Warde-Farley D., Ozair S., Courville A., Bengio Y. Generative Adversarial Nets. Proc. of the 28<sup>th</sup> International Conference on Neural Information Processing Systems, 2014, vol. 2, pp. 2672–2680.
- Goodfellow, I., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., Courville, A., Bengio, Y. Generative adversarial networks. arXiv, 2014, arXiv:1406.2661. https://doi.org/10.48550/ arXiv.1406.2661
- Goodfellow Ian. NIPS 2016 Tutorial: Generative Adversarial Networks. arXiv, 2017, arXiv:1701.00160. https://doi.org/10.48550/ arXiv.1701.00160
- Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Back-Propagation and Other Differentiation Algorithms. *Deep Learning*, MIT Press, 2016, pp. 200–220.
- Duchi J., Hazan E., Singer Y. Adaptive subgradient methods for online learning and stochastic optimization. *Journal of Machine Learning Research*, 2011, vol. 12. pp. 2121–2159.
- Jones K.S. A Statistical interpretation of term specificity and its application in retrieval. *Journal of Documentation*, 1972, vol. 28, no. 1, pp. 11–21. https://doi.org/10.1108/eb026526
- Rüschendorf L. Wasserstein metric. *Encyclopedia of Mathematics*, ed. by M. Hazewinkel, Springer, 2000, pp. 487–488.
- Erdmann M., Glombitza J., Quast T. Precise simulation of electromagnetic calorimeter showers using a Wasserstein Generative Adversarial Network. *Computing and Software for Big Science*, 2019, vol. 3, no. 1, pp. 4. https://doi.org/10.1007/s41781-018-0019-7
- Goodfellow I., Pouget-Abadie J., Mirza M., Xu B., Warde-Farley D., Ozair S., Courville A.C., Bengio Y. Generative adversarial nets. Advances in Neural Information Processing Systems 27: Annual Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS), 2014, pp. 2672–2680.
- Farnia F., Ozdaglar A. Do GANs always have Nash equilibria? *Proc.* of the 37<sup>th</sup> International Conference on Machine Learning, PMLR, 2020, vol. 119, pp. 3029–3039.
- Timofeev A.V. Method for hyperparameter tuning in machine learning tasks for stochastic objects classification. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 5, pp. 667–676. (in Russian). https://doi. org/10.17586/2226-1494-2020-20-5-667-676

#### Author

Andrey V. Timofeev — D.Sc., Chief Scientific Officer, Equalizum LLP, Astana, 010000, Kazakhstan, 📧 56689367600, https://orcid.org/0000-0001-7212-5230, timofeev.andrey@gmail.com

Received 13.11.2024 Approved after reviewing 17.12.2024 Accepted 23.01.2025 **VİTMO** 

HAVHHO-TEXHIVECKИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ январь-февраль 2025 Том 25 № 1 http://ntv.ifmo.ru/ SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS January-February 2025 Vol. 25 No 1 http://ntv.ifmo.ru/en/ ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКІ

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-95-105 УЛК 004.942

# Алгоритм планирования многомерных траекторий для слайсера 5D-принтера

#### Максим Яковлевич Афанасьев<sup>1⊠</sup>, Михаил Романович Соловьев<sup>2</sup>, Анастасия Андреевна Крылова<sup>3</sup>, Сергей Александрович Шорохов<sup>4</sup>, Юрий Валерьевич Федосов<sup>5</sup>

1,3,4,5 Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

<sup>2</sup> ГК «Геоскан», Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

<sup>3</sup> ЗАО «Биоград», Санкт-Петербург, 197110, Российская Федерация

<sup>5</sup> ОАО «Российский институт мощного радиостроения», Санкт-Петербург, 199048, Российская Федерация

<sup>1</sup> higonokami@yandex.ru<sup>\exist</sup>, https://orcid.org/0000-0003-4061-1407

<sup>2</sup> onisoris@niuitmo.ru, https://orcid.org/0009-0006-0787-5573

<sup>3</sup> ananasn94@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-5822-6702

<sup>4</sup> stratumxspb@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-5412-7723

<sup>5</sup> yf01@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-1869-0081

#### Аннотация

Введение. Представлен алгоритм планирования многомерных траекторий для 5D-принтера. Метод направлен на решение проблем, возникающих при традиционной трехмерной (3D) печати. Стандартные методы 3D-печати с использованием послойного наплавления материала приводят к анизотропии механических свойств, в результате чего прочность изготавливаемого объекта зависит от направления нанесения слоев. Это ограничивает возможности для создания равнопрочных изделий сложной геометрии. Предлагаемый алгоритм позволит достичь равномерного распределения прочностных характеристик объекта за счет оптимизации траекторий печати. Метод. Алгоритм основан на построении траекторий с использованием сферических спиральных слоев. Предлагаемое решение учитывает изменяющиеся параметры печати, такие как высота слоя и толщина линии. Алгоритм адаптируется под различные геометрические формы объекта. Основной особенностью методики является обеспечение изотропии свойств изделия за счет равномерного распределения материала по траекториям. Также алгоритм включает построение нормалей в каждой точке кривой для точного задания направления движения печатающей головки. Используемый подход позволяет избежать стандартных ограничений, характерных для 3D-печати. Основные результаты. Алгоритм протестирован на моделях, имеющих простые и сложные геометрические формы с высоким уровнем кривизны. В ходе компьютерного моделирования проведены эксперименты с различными значениями высоты слоя и толщины линии. Результаты экспериментов позволили оценить влияние этих параметров. Алгоритм продемонстрировал высокую сходимость при разных значениях входных параметров, обеспечивая точное выполнение траекторий независимо от начальных условий. Была выполнена визуализация траекторий и нормалей, что подтвердило правильность направления печати и равномерное нанесение материала. Для удобства дальнейшей работы разработан промежуточный формат представления траекторий, который легко преобразуется в G-коды. Это позволяет подготовить данные для натурных экспериментов, которые будут проведены для оценки эффективности алгоритма в реальных условиях печати. Обсуждение. Алгоритм планирования многомерных траекторий открывает новые возможности для аддитивного производства и позволяет создавать сложные объекты с улучшенными механическими свойствами без необходимости в проектировании дополнительных конструктивных элементов для повышения прочности. Предложенный метод может найти применение в авиастроении, автомобилестроении и медицине, где важны как сложные геометрические формы, так и высокая прочность изделий.

#### Ключевые слова

5D-печать, многомерные траектории, алгоритм нарезки, аддитивное производство, планирование траектории, оптимизация программ ЧПУ

Ссылка для цитирования: Афанасьев М.Я., Соловьев М.Р., Крылова А.А., Шорохов С.А., Федосов Ю.В. Алгоритм планирования многомерных траекторий для слайсера 5D-принтера // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 1. С. 95–105. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-95-105

© Афанасьев М.Я., Соловьев М.Р., Крылова А.А., Шорохов С.А., Федосов Ю.В., 2025

### Multidimensional trajectory planning algorithm for a 5D printer slicer

Maksim Ya. Afanasiev<sup>1⊠</sup>, Michael R. Solovev<sup>2</sup>, Anastasiia A. Krylova<sup>3</sup>,

Sergey A. Shorokhov<sup>4</sup>, Yuri V. Fedosov<sup>5</sup>

1,3,4,5 ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

<sup>2</sup> Geoscan Corporate Group, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

<sup>3</sup> JSC "Biograd", Saint Petersburg, 197110, Russian Federation

<sup>5</sup> JSC "Russian Institute for Power Radiobuilding", Saint Petersburg, 199048, Russian Federation

<sup>1</sup> higonokami@yandex.ru<sup>\overline{1}</sup>, https://orcid.org/0000-0003-4061-1407

<sup>2</sup> onisoris@niuitmo.ru, https://orcid.org/0009-0006-0787-5573

<sup>3</sup> ananasn94@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-5822-6702

<sup>4</sup> stratumxspb@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-5412-7723

<sup>5</sup> yf01@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-1869-0081

#### Abstract

The article presents a trajectory planning algorithm for a 5D printer to solve problems that arise in traditional 3D printing. Standard 3D printing methods using layer-by-layer material deposition lead to anisotropy of mechanical properties, where the object strength depends on the direction of the layer application. This limits the ability to create isotropicstrength parts, especially those with complex geometry. The goal of the study is to develop an algorithm that enables uniform distribution of the mechanical properties of the object by optimizing the printing trajectories. The proposed algorithm is based on constructing trajectories using spherical spiral layers. The algorithm considers changing printing parameters, such as layer height and line thickness, and adapts to various geometric shapes of the object. A key feature is ensuring isotropy of the part properties by evenly distributing the material along the trajectories. The algorithm also includes the construction of normals at each point of the curve to accurately direct the movement of the printing head. This approach avoids the standard limitations typical of 3D printing. The algorithm was tested on various models, including simple and complex geometric shapes with high curvature. During computer modeling, experiments were conducted with different layer heights and line thicknesses, which allowed for the assessment of the influence of these parameters. The algorithm demonstrated high convergence under various input conditions, ensuring accurate trajectory execution regardless of initial parameters. The trajectories and normals were visualized, confirming the correct print direction and even material deposition. For further work convenience, an intermediate trajectory representation format was developed which is easily converted into G-codes. This allows data to be prepared for future physical experiments that will be conducted to assess the algorithm effectiveness in real printing conditions. The multidimensional trajectory planning algorithm opens up new possibilities for additive manufacturing, enabling the creation of complex objects with improved mechanical properties without the need for additional supports. The practical significance of the algorithm lies in its application in areas, such as aerospace, automotive, and medicine, where both complex geometric shapes and high part strength are important. Further research may focus on expanding the algorithm capabilities to work with various materials and adjusting printing parameters to improve the performance and quality of printed parts.

#### Keywords

5D printing, multidimensional trajectories, slicing algorithm, additive manufacturing, trajectory planning, CNC path optimization

**For citation:** Afanasev M.Ya., Solovev M.R., Krylova A.A., Shorohov S.A., Fedosov Yu.V. Multidimensional trajectory planning algorithm for a 5D printer slicer. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 1, pp. 95–105 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-95-105

#### Введение

В последние десятилетия аддитивные технологии, в том числе трехмерная (3D) печать, получили самое широкое распространение в различных отраслях промышленности, от авиации и автомобилестроения до медицины и бытовой электроники. Однако, несмотря на значительные успехи, традиционные методы 3D-печати ограничены использованием трех осей движения, что сужает возможности создания геометрически сложных деталей с высокой степенью точности.

В последнее время стали доступны технологии 5D-печати, которые предоставляют новый подход к аддитивному производству. В отличие от стандартных 3D-принтеров, которые создают объекты послойно вдоль фиксированных осей, 5D-принтеры работают по 5-ти координатам, добавляя вращательные движения к линейным. Это позволяет печатать объекты более сложной формы с минимальными внутренними напряжениями, повышенной прочностью и меньшими ограничениями по ориентации печатаемой детали на столе [1–5].

Большинство современных многокоординатных аддитивных установок являются промышленными роботами-манипуляторами, адаптированными для печати пластиками или другими материалами. Эти системы способны двигаться по 6-ти осям, что позволяет печатать объекты под разными углами и создавать сложные геометрические формы [6-8]. Однако использование промышленных манипуляторов для 5D-печати имеет ряд недостатков. Во-первых, такие роботы изначально не предназначены для печати, что приводит к ограничениям в точности и скорости производства. Во-вторых, они требуют сложного программного обеспечения для управления движением, что увеличивает стоимость и сложность эксплуатации. Кроме того, размеры и вес манипуляторов могут ограничивать возможности их применения в небольших лабораториях или домашних условиях.

К тому же промышленные манипуляторы чаще всего ориентированы на печать металлами, напри-

мер, с использованием технологий Wire Arc Additive Manufacturing или Directed Energy Deposition. Эти технологии особенно эффективны для создания крупных металлических объектов, но не всегда подходят для работы с другими материалами, такими как пластик, из-за специфики процесса и оборудования.

Тем не менее, существуют специальные 5D-принтеры<sup>1</sup>, как коммерческие (Stereotech<sup>2</sup>, 5axismaker<sup>3</sup>, Epit 5.1<sup>4</sup>) так и с открытым исходным кодом (Open5X [9, 10], Gen5X<sup>5</sup>), которые специально разработаны для аддитивного производства. Такие системы оптимизированы для работы с различными материалами, включая пластик, и предлагают более компактные, простые и доступные решения. Коммерческие устройства обеспечивают готовые решения для промышленности, а открытые (open-source) проекты позволяют пользователям модифицировать системы под свои нужды и создавать уникальные разработки.

Отметим, что имеющееся в настоящее время программное обеспечение для подготовки управляющих программ установок 3D-печати, так называемые слайсеры, не способно в полной мере обеспечить формирование многомерной траектории движения печатающей головки. В связи с этим ведутся исследования, направленные на разработку новых алгоритмов планирования многомерных траекторий для внедрения их в существующие слайсеры [11–13], а также разработки различных видов непланарной (конформной) печати [14–16].

Также стоит отметить, что многие исследователи предлагают использовать существующее программное обеспечение подготовки управляющих программ для станков с числовым программным управлением (ЧПУ) (САМ-системы) для формирования траектории движения при многомерной печати. Однако подобный подход не позволяет осуществлять подготовку управляющих программ в автоматическом режиме, так как требует от пользователя ввода дополнительных параметров обработки, ручного формирования стратегии обработки и в целом не учитывает особенностей именно аддитивного технологического процесса, таких как формирование внутренней структуры заполнения печатаемых моделей, формирование поддержек в слайсере, использование специализированной оснастки и т. д. [17].

<sup>3</sup> 5axismaker. Официальный сайт [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://5axismaker.co.uk/, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 20.09.2024).

<sup>4</sup> Еріtome 3D. Официальный сайт [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://epit3d.com/, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 20.09.2024).

<sup>5</sup> GenerativeMachine. Gen5X [Электронный ресурс] // GitHub. Режим доступа: https://github.com/GenerativeMachine/ Gen5X, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.09.2024). Особого внимания заслуживают российские научные работы, посвященные разработке алгоритмов спиральной печати для создания сложных геометрических поверхностей, в частности, для работы с керамическими материалами [18, 19]. В работе [20] изучен синтез алгоритмов управления рабочим столом 5D-принтера с параллельной кинематикой, где рассматривается модернизация программного и аппаратного обеспечений дельта-принтера для работы по сложным пространственным траекториям.

В настоящей работе рассматриваются 5D-принтеры для печати пластиком по технологии послойного наплавления. Цель исследования — разработка и реализация алгоритма планирования траектории движения для 5D-принтеров с учетом особенностей и ограничений оборудования и технологии. Выполнен анализ теоретических аспектов и практических решений, которые могут привести к дальнейшему совершенствованию аддитивных технологий и их внедрению в массовое производство.

#### Постановка задачи

Задача, решаемая в данной работе, состоит в разработке алгоритма формирования многомерной траектории движения печатающей головки 3D-принтера на основе сферических концентрических слоев с заданным шагом («высотой» слоя). На каждом слое базовая траектория представляет собой спиральную линию с заданным шагом («ширина» печатной линии), разбитой на равные отрезки [21]. Линия должна огибать всю поверхность каждого из концентрических слоев. Таким образом, «шов» (линия перехода между слоями) будет находиться внутри модели, и совпадать с осью, соединяющей северный и южный полюса каждого из сферических слоев.

На вход алгоритма поступает полигональная модель 3D-объекта. Модель предварительно обрабатывается и, исходя из максимальных размеров, осуществляется построение необходимого количества сферических слоев. Непрерывная спиральная линия каждого слоя разбивается на равные части, формируя, таким образом, облако точек. Данное облако точек пересекается с полигональной моделью, и все точки делятся на два класса: внутри объема модели и вне этого объема. На основании данного разбиения формируются последовательные связи между точками для рабочих (происходит экструдирование расплавленного пластика) и холостых ходов печатающей головки.

Базовая многомерная спираль задается формулами:

$$a_{\max} = 2\pi N,$$
  

$$a = a_{\max} t,$$
  

$$b = -\frac{\pi}{2} + \frac{a\pi}{a_{\max}},$$
  

$$x = \frac{r}{2} \cos a \cos b,$$
 (1)  

$$y = \frac{r}{2} \sin a \cos b,$$
  

$$z = -\frac{r}{2} \sin b,$$

Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2025, том 25, № 1 Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2025, vol. 25, no 1

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> В настоящей работе используются устоявшиеся в индустрии термины 3D-принтер и 5D-принтер. Под 3D-принтером понимается установка послойного наплавления материала с декартовой или дельта кинематикой и тремя управляемыми осями. Термин 5D-принтер подразумевает наличие в установке двух дополнительных осей (управляемых координат), как правило, в виде двухосевого поворотного стола.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> 5D Technology. Официальный сайт [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://5dtech.pro, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 20.09.2024).

где *t* — параметр; *a* — угол спирали вокруг сферы, изменяющийся от 0 до полного количества оборотов *N*;

b — угол вдоль широты сферы, изменяясь от  $-\frac{\pi}{2}$  до  $\frac{\pi}{2}$ ;

*x*, *y*, *z* — декартовы координаты точки на спирали в зависимости от углов *a* и *b*.

#### Описание алгоритма

На рис. 1 представлена общая блок-схема алгоритма формирования траектории движения головки 5D-принтера.

Рассмотрим более подробно шаги представленного алгоритма. 3D-модель загружается с диска в формате STL (STereoLithography — стереолитография). Формат STL используется для описания 3D-объектов, и существует в двух вариантах: текстовый (ASCII) и бинарный. Текстовый формат хранит данные о треугольных гранях в виде читаемого человеком текста, что удобно для отладки, но занимает больше места, чем бинарный. В бинарном формате информация хранится в виде двоичных чисел, что делает его более компактным и быстрым для обработки. Текстовый формат STL используется для простого анализа, тогда как бинарный — для эффективного хранения и передачи данных в задачах 3D-печати. Алгоритм предполагает возможность использования любого из вышеописанных представлений.

Проверка замкнутости модели. Проверка замкнутости модели в формате STL важна для предотвращения ошибок при дальнейшей обработке модели. Замкнутая модель не имеет «отверстий» или открытых граней. Для анализа и исправления таких дефектов используется интерфейс программирования приложения (Application Programming Interface, API) облачного сервиса Netfabb<sup>1</sup>, который предоставляет инструменты для автоматической проверки и исправления моделей, или программы MeshLab<sup>2</sup>, позволяющей находить и устранять проблемы с замкнутостью сеток.

Определение центра масс модели и перенос начала координат модели в центр масс. Геометрический центр масс (или центр тяжести) 3D-модели — это точка, в которой сосредоточена вся масса объекта, при условии, что материал модели имеет равномерную плотность. С точки зрения рассматриваемой технологии печати сферическими слоями наиболее целесообразным представляется совмещение геометрического центра масс с центром пересекающих модель сфер.

Формат STL описывает модель как набор треугольников (граней). Треугольник в 3D-пространстве можно математически описать по координатам его вершин  $A(x_1, y_1, z_1), B(x_2, y_2, z_2), C(x_3, y_3, z_3).$  Для расчета центра масс важно учитывать площадь и расположение всех треугольников. Для каждого треугольника можно вычислить его центр масс  $G(x_g, y_g, z_g)$  как среднее значение координат его вершин:

$$x_g = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3},$$
$$y_g = \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3},$$
$$z_g = \frac{z_1 + z_2 + z_3}{3}.$$

Также необходимо вычислить площадь каждого треугольника, чтобы взвесить его вклад в общий центр масс. Площадь треугольника *S*, заданного вершинами, можно найти через векторное произведение:

$$S = \frac{1}{2} ||\mathbf{AB} \times \mathbf{AC}||,$$

где  $AB = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1); AC = (x_3 - x_1, y_3 - y_1, z_3 - z_1).$ Общий центр масс  $G_{STL}$  треугольников с весами, пропорциональными их площадям:

$$G_{STL} = \frac{\sum_{i=1}^{N} S_i G_{\Delta i}}{\sum_{i=1}^{N} S_i},$$

где  $S_i$  и  $G_{\Delta i}$  — площадь и центр масс *i*-го треугольника; N — общее количество треугольников в модели.

Построение сферических спиральных слоев. После переноса начала координат модели происходит определение максимального диаметра сферы, в которую модель полностью помещается. Далее задается минимальный начальный диаметр сферы, с которого начинается разбиение. Минимальный диаметр  $r_0$  определяется, исходя из используемой при печати технологической оснастки. Пространство между минимальной и максимальной сферами равномерно заполняется концентрическими спиральными линиями, построенными по формулам (1), с заданным постоянным шагом l, который определяет толщину печатаемого слоя и зависит от параметров печатающей головки. Пример сферического слоя представлен на рис. 2.

В практической печати методом послойного наплавления профиль печатаемой нити не является точной окружностью. Окружность «сплющивается» в процессе печати, т. е. существуют два отдельных параметра: высота линии (совпадает с толщиной слоя *l*) и ширина линии печати — w, значение которой задается отдельно. Например, для наиболее распространенного диаметра сопла печатающей головки равного 0,4 мм, стандартной высотой линии (слоя) является 0,2 мм при ширине линии — 0,4–0,45 мм. При этом опытным путем доказано, что для данного диаметра сопла значения ширины могут быть в диапазоне от 0,4 до 0,8 мм без заметной потери качества или прочности печати. В рассматриваемом алгоритме ширина линии w используется для расчета параметра N в выражении (1), т. е. количества оборотов спирали:  $N = \frac{\pi R}{w}$ 

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Autodesk. Официальная документация [Электронный pecypc]. Режим доступа: https://www.autodesk.com/akn-aknsite-article-attachments/2fcf92e8-1c75-4e1f-89c3-eaa72a7eedfd.pdf, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 22.09.2024).

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> MeshLab. Официальный сайт [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.meshlab.net/ свободный. Яз. англ. (дата обращения: 22.09.2024).







Fig. 2. Spherical helix

Разбиение сферических спиральных слоев на отрезки. На данном этапе алгоритма происходит разбиение параметрически заданной пространственной кривой на прямолинейные отрезки заданной длины с шагом разбиения *n*. В иностранных научных работах, посвященных разработке систем с ЧПУ, данный этап, как правило, называется интерполяцией (interpolation). Чтобы разбить сферическую спираль на равные отрезки, необходимо выполнить несколько шагов [22].

Шаг 1. Осуществляется численное интегрирование для определения общей длины спирали. Поскольку спираль задана параметрически, длина дуги может быть найдена как интеграл от корня суммы квадратов производных координат x(t), y(t), и z(t) по параметру t:

$$L = \int_{0\sqrt{t}}^{1} \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2 dt.$$

Шаг 2. Происходит разбиение общей длины *L* на *N* равных частей, чтобы получить целевую длину каждого отрезка:

$$\Delta L = \frac{L}{N}$$

Шаг 3. С помощью численного метода выполняется поиск параметров  $t_i$  таких, что кумулятивная длина дуги до каждой точки  $t_i$  равна  $i\Delta L$ , где i = (1, 2, ..., N).

Для поиска используется функция fsolve из библиотеки scipy.optimize<sup>1</sup> языка программирования Python.

Эта функция решает уравнение вида f(t) = 0. В данном случае fsolve находит корни уравнения, вычисляя разницу между целевой длиной отрезка и текущей длиной дуги. Функция fsolve основана на методе Ньютона. Она корректирует значение t в направлении, уменьшающем разницу, чтобы найти такие  $t_i$ , при которых длина каждого сегмента будет равна  $\Delta L$ .

Примеры разбиения сферической кривой представлены на рис. 3, а. На рис. 3, b показано облако точек, состоящее из 555 108 точек. Видно равномерное распределение точек по объему модели. Данное можно сравнить с облаком разбиение точек на рис. 3, с, состоящее из 595 571 точек и построенное по формуле (1), при этом у полюсов присутствует уменьшение расстояния между точками по мере приближения к полюсу. Прямое преобразование подобного облака точек в управляющую программу для принтера приведет не только к нерациональному увеличению объема последней, но и к снижению качества модели у полюсов сферы разбиения. Это обусловлено тем, что принтер будет делать слишком много коротких перемещений, для которых достаточно сложно рассчитать необходимое количество подаваемого пластика, вследствие чего возможна его переэкструзия или недоэкструзия.

Очевидно, что количество точек разбиения должно увеличиваться по мере увеличения диаметра сферических слоев. Эмпирически определено, что увеличение должно быть пропорционально площади каждого следующего сферического слоя. Определим, что  $S_1$  — количество точек разбиения меньшего из соседних слоев,  $S_2$  — большего. Если площадь сферы задается с помощью формулы  $S = 4\pi R^2$ , то отношение определяется как:

$$S_2 = S_1 \left( 1 + \frac{2l}{R_1} + \frac{l^2}{R_1^2} \right),$$

где l — толщина сферического слоя;  $R_1$  — радиус меньшей сферы.  $R_1$  можно выразить через минимальный начальный радиус сферы  $r_0$  и l. Таким образом, отношения количества точек разбиения любых двух соседних слоев задается следующим образом:

$$S_{n+1} = S_n \left( 1 + \frac{2}{r_0 + n} + \frac{1}{r_0^2 + 2r_0 n l + n^2} \right)$$

где *n* — номер текущего слоя. Выражение в скобках представляет собой коэффициент увеличения количества точек на следующем слое *k*, который является параметром функции рассматриваемого алгоритма. В программной реализации также приняты следующие допущения: диаметр минимальной сферы равен 1, на данной сфере размещается вырожденная спираль, состоящая из одной точки.

Построение векторов нормали в каждой точке. Сферическая спираль параметризуется углами  $\theta(t)$  и  $\varphi(t)$  в сферических координатах. Для каждой точки спирали необходимо вычислить декартовы координаты x(t), y(t) и z(t). Вектор касательной **Т** к кривой в каждой точке можно вычислить как производную положения точки по времени *t* или параметру, который изменяется вдоль кривой. В декартовых координатах это будет вектор:

$$\mathbf{T} = \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \\ \frac{dz}{dt} \end{pmatrix}$$

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> SciPy v1.10.1. Tutorial — Optimization and fitting [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://docs.scipy.org/ doc/scipy/tutorial/optimize.html. Яз. англ. (дата обращения: 18.12.2024).



*Puc. 3.* Разбиение сферической спирали на отрезки (a); равномерное (b) и неравномерное (c) распределения *Fig. 3.* Segmentation of the spherical helix into segments (a); uniform distribution (b) and non-uniform distribution (c)

Получим вектор нормали N, перпендикулярный вектору касательной T. Его можно найти, используя производную вектора касательной по параметру:

$$\mathbf{N} = \frac{d}{dt}\mathbf{T} = \frac{d^2}{dt^2} \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix}.$$

Полученный вектор нормали может быть ненормированным, т. е. его длина может быть произвольной. Чтобы получить единичный вектор нормали, его нужно нормализовать:

$$\hat{N} = \frac{\mathbf{N}}{|\mathbf{N}|}$$

Пример построения векторов нормали для каждой точки разбиения сферической спиральной кривой представлен на рис. 4.

Операция разности для модели и оснастки. Печать сферическими слоями отличается от планарной печати отсутствием печатного стола. Многие 5D-принтеры используют цилиндрическую оснастку для печати осесимметричных деталей. Оснастка распечатывается планарными слоями, после чего начинается многоосевое построение. В настоящей работе также предполагается использование печатаемой оснастки





*Fig. 4.* Normal vectors at points of segmentation of the spherical spiral curve (green arrows indicate normal vectors)



*Puc.* 5. Модель с печатаемой оснасткой (*a*), вид с разрезом (*b*) *Fig.* 5. Model with printable tooling (*a*), sectional view (*b*)

специальной формы (рис. 5). Оснастка представляет собой конусообразное или цилиндрическое основание со сферическим навершием радиусом  $r_0$ . Таким образом, на данном этапе алгоритма необходимо выполнить операцию разности между основной STL-моделью и STL-моделью оснастки. Данная операция выполняется с помощью метода difference библиотеки trimesh<sup>1</sup> Python.

Пересечение модели и облака точек сферических спиралей. В рассматриваемой реализации результатом разбиения модели на отрезки является облако точек. На данном этапе алгоритма выполняется операция пе-

<sup>1</sup> Trimesh: Python library for 3D geometry processing [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://trimesh.org/. Яз. англ. (дата обращения: 18.12.2024).

ресечения полученной модели (без оснастки) с этим облаком точек. Пересечение осуществляется с помощью метода contains из библиотеки trimesh языка Python. Пример облака точек с разными параметрами толщин слоев показаны на рис. 6.

Постпроцессинг в набор координат отрезков. На данном этапе алгоритма формируется массив точек координат отрезков в порядке обхода слоев для каждой спиральной кривой. Каждая координата отмечается флагом, обозначающим принадлежность той или иной точки модели. Элемент массива представляется следующим образом: [flag, x, y, z, roll, pitch, yaw], где x, y и z декартовы координаты точек по соответствующим осяя; roll, pitch и yaw — углы вращения вокруг этих осей.

Формирования G-кодов. Каждый элемент массива преобразуется в соответствующий G-код по стандарту



*Puc. 6.* Полученное облако точек при ширине линии w = 0,4 для толщин слоев *l*: 0,1 (*a*), 0,5 (*b*) и 1 (*c*) *Fig. 6.* The resulting point cloud with line width w = 0.4; layer thickness *l*: 0.1 (*a*), 0.5 (*b*), and 1 (*c*)

ISO 6983<sup>1</sup>. Рабочие ходы (перемещение печатающей головки с экструзией пластика) задаются кодом G1, холостое перемещение кодом G0. Декартовы координаты задаются кодами X, Y и Z, а вращения A, B и C. Линейные координаты измеряются в миллиметрах, вращательные — в градусах (вещественным числом с четырьмя фиксированными разрядами после запятой). Также с помощью кода F определяются скорости перемещения по осям в миллиметрах в минуту, так называемая «минутная подача».

#### Программная реализация

Программная реализация алгоритма выполнена на языке программирования Руthon версии 3.11. Математические операции над матрицами и векторами реализованы с помощью библиотеки NumPy версии 1.26.4, численные методы интегрирования взяты из библиотеки SciPy версии 1.12.0, работа с файлами формата STL осуществлялась функциями библиотек Trimesh версии 4.2.0 и numpy-stl версии 3.1.2. Для визуализации кривых и облаков точек применялись библиотеки Matplotlib версии 3.8.3 и Open3D версии 0.18.0. Исходный код функций разработанного алгоритма представлен в репозитарии на платформе GitHub<sup>2</sup>.

#### Обсуждение

Для оценки эффективности предложенного алгоритма планирования многомерных траекторий, были проведены тесты на нескольких типах 3D-моделей с различной геометрией. Модели включали как простые формы, такие как сферы и цилиндры, так и сложные объекты. Результаты тестирования показали, что алгоритм стабильно справляется с созданием траекторий для объектов с различной степенью кривизны.

Тем не менее, алгоритм имеет ограничения. Одной из основных проблем является зависимость точности печати от параметров материала и характеристик принтера. Например, изменение ширины линии или толщины слоя может повлиять на равномерность нанесения материала и качество поверхности. В дальнейшем необходимо провести более глубокие исследования, связанные с адаптацией алгоритма под различные материалы и конфигурации принтеров. Отметим, что на данном этапе разработки возможна работа только с одной моделью внутри STL-файла.

Можно выдвинуть следующие предложения по дальнейшему совершенствованию алгоритма:

 необходима оптимизация времени работы алгоритма за счет использования многопоточности и распараллеливания обработки слоев модели;

- возможна реализация функции генерации заполнения модели паттерном, например, решетчатой структурой (латисой) для уменьшения веса и расхода материала без значительного снижения прочности напечатанного объекта;
- требуется реализация процедуры спрямления траектории на холостых ходах перемещения, а также обхода оснастки печатающей головкой, не допускающая их взаимных соударений.

Также можно рассмотреть возможность многоматериальной печати для формирования поддерживающих структур. Предполагается использование растворимого материала. На данном этапе развития технологии печати методом послойного наплавления пластика легче всего добиться этого за счет применения устройств автоматической смены материала. С одной стороны, одним из преимуществ 5D-печати является отсутствие необходимости формирования поддерживающих структур. С другой стороны, применение подобных структур именно в рассматриваемом подходе позволит работать с еще более сложной геометрией моделей, упростить оптимизацию холостых ходов и даст возможность работать с STL-файлами, включающими несколько моделей.

#### Заключение

В работе предложен и реализован новый подход к планированию многомерных траекторий для 5D-принтера, ориентированный на аддитивное производство сложных геометрических объектов из пластика. Основной особенностью предложенного алгоритма является использование сферических спиральных слоев, что позволяет значительно повысить качество напечатанных объектов за счет равномерного распределения материала и минимизации необходимости использования поддерживающих структур.

Традиционные методы нарезки для 3D-принтеров основываются на плоских слоях, что приводит к ряду ограничений, таких как низкая механическая прочность в вертикальной плоскости и неравномерное распределение нагрузки. В отличие от этого, предложенный алгоритм планирует траектории таким образом, чтобы слои следовали за кривизной объекта, что позволяет улучшить адгезию между слоями. Это особенно важно при печати объектов с криволинейной поверхностью или с элементами сложной формы.

Выполненное компьютерное моделирование подтвердило работоспособность алгоритма. Полученные траектории соответствуют заданной модели. Таким образом, предложенный подход может быть применен в широком спектре задач, связанных с 5D-печатью, включая создание деталей для авиационной и автомобильной промышленностей, архитектурных моделей и других сложных объектов, требующих высокой механической прочности.

В целом, предложенный алгоритм планирования траекторий открывает новые возможности для применения 5D-принтеров в различных областях и может способствовать развитию технологий аддитивного производства, позволяя создавать более качественные и прочные изделия с меньшими затратами времени и ресурсов.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> ISO 6983-1:2009. Automation systems and integration — Numerical control of machines — Program format and definitions of address words — Part 1: Data format for positioning, line motion and contouring control systems. Geneva: International Organization for Standardization, 2009. 32 p.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Sphere Slicer [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://github.com/futoke/sphere\_slicer. Яз. англ. (дата обращения: 18.12.2024).

#### Литература

- Yigit I.E., Lazoglu I. Spherical slicing method and its application on robotic additive manufacturing // Progress in Additive Manufacturing. 2020. V. 5. N 4. P. 387–394. https://doi.org/10.1007/s40964-020-00135-5
- Munasinghe N., Paul G. Radial slicing for helical-shaped advanced manufacturing applications // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. V. 112. N 3-4. P. 1089–1100. https://doi.org/10.1007/s00170-020-05999-z
- Popov A.Y., Gushchin I.A., Drobotov A.V. Model preparation algorithm for 3D printing with discrete rotation // Proc. of the International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2019. P. 1–5. https://doi.org/10.1109/ ICIEAM.2019.8742958
- Kaplan D., Rorberg S., Ben-Chen M., Sterman Y. NozMod: Nozzle Modification for efficient FDM 3D printing // Proc. of the 7<sup>th</sup> Annual ACM Symposium on Computational Fabrication. 2022. P. 1–9. https://doi.org/10.1145/3559400.3561999
- Feng X., Cui B., Liu Y., Li L., Shi X., Zhang X. Curved-layered material extrusion modeling for thin-walled parts by a 5-axis machine // Rapid Prototyping Journal. 2021. V. 27. N 7. P. 1378–1387. https:// doi.org/10.1108/RPJ-11-2020-0272
- Insero F., Furlan V., Giberti H. Non-planar slicing for filled free-form geometries in robot-based FDM // Journal of Intelligent Manufacturing. 2023. in press. https://doi.org/10.1007/s10845-023-02250-w
- Liu B., Feng J., Lin Z., Wu S., He Y., Fu J. Spherical path planning for multi axis support free additive manufacturing of truss structures // Journal of Manufacturing Processes. 2024. V. 109. P. 198–212. https:// doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.12.011
- Mitropoulou I., Bernhard M., Dillenburger B. Print paths keyframing: design for non-planar layered robotic FDM printing // Proc. of the 5<sup>th</sup> Annual ACM symposium on computational fabrication. 2020. P. 1–10. https://doi.org/10.1145/3424630.3425408
- Hong F., Hodges S., Myant C., Boyle D. Open5x: Accessible 5-axis 3D printing and conformal slicing // Extended Abstracts of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 2022. P. 1–6. https://doi.org/10.1145/3491101.3519782
- Hong F., Lampret B., Myant C., Hodges S., Boyle D. 5-axis multimaterial 3D printing of curved electrical traces // Additive Manufacturing. 2023. V. 70. P. 103546. https://doi.org/10.1016/j. addma.2023.103546
- Nayyeri P., Zareinia K., Bougherara H. Planar and nonplanar slicing algorithms for fused deposition modeling technology: A critical review // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. V. 119. N 5-6. P. 2785–2810. https://doi. org/10.1007/s00170-021-08347-x
- Shan Y., Shui Y., Hua J., Mao H. Additive manufacturing of nonplanar layers using isothermal surface slicing // Journal of Manufacturing Processes. 2023. V. 86. P. 326–335. https://doi. org/10.1016/j.jmapro.2022.12.054
- Neel T.L., Mesto T., Hascoet J.-Y. A novel slicing strategy for continuous printing with a helix 3D printer // Journal of Machine Engineering. 2022. V. 22. N 3. P. 31–43. http://dx.doi.org/10.36897/ jme/151119
- Tang J., Dong Y., Cai L., Zhu Q., Shi J. Conformal 3D printing algorithm for surfaces and its in situ repair applications // Micromachines. 2024. V. 15. N 7. P. 920. https://doi.org/10.3390/ mi15070920
- Nisja G.A., Cao A., Gao C. Short review of nonplanar fused deposition modeling printing // Material Design & Processing Communications. 2021. V. 3. N 4. P. e221. https://doi.org/10.1002/ mdp2.221
- Fortunato G.M., Nicoletta M., Batoni E., Vozzi G., De Maria C. A fully automatic non-planar slicing algorithm for the additive manufacturing of complex geometries // Additive Manufacturing. 2023. V. 69. P. 103541. https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103541
- Srinivas G.L., Laux M., Nair V.P., Brandstotter M. Multi-axis additive manufacturing: development of slicer and toolpath for 2.5 D/3D/5D printing // Advances in Service and Industrial Robotics. 2024. V. 157. P. 337–346. https://doi.org/10.1007/978-3-031-59257-7 34
- Алексеев А.А., Кирсанов А.Е., Шишов О.В. 3D-печать керамических изделий при использовании спиральной печати тела вращения с волнообразной поверхностью и эффектом «плетения» // Огарёв-Online. 2020. N. 15(152). С. 1–8.

#### References

- Yigit I.E., Lazoglu I. Spherical slicing method and its application on robotic additive manufacturing. *Progress in Additive Manufacturing*, 2020, vol. 5, no. 4, pp. 387–394. https://doi.org/10.1007/s40964-020-00135-5
- Munasinghe N., Paul G. Radial slicing for helical-shaped advanced manufacturing applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 112, no. 3-4, pp. 1089–1100. https://doi.org/10.1007/s00170-020-05999-z
- Popov A.Y., Gushchin I.A., Drobotov A.V. Model preparation algorithm for 3D printing with discrete rotation. Proc. of the International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2019, pp. 1–5. https://doi.org/10.1109/ ICIEAM.2019.8742958
- Kaplan D., Rorberg S., Ben-Chen M., Sterman Y. NozMod: Nozzle Modification for efficient FDM 3D printing. *Proc. of the 7<sup>th</sup> Annual ACM Symposium on Computational Fabrication*, 2022, pp. 1–9. https://doi.org/10.1145/3559400.3561999
- Feng X., Cui B., Liu Y., Li L., Shi X., Zhang X. Curved-layered material extrusion modeling for thin-walled parts by a 5-axis machine. *Rapid Prototyping Journal*, 2021, vol. 27, no. 7, pp. 1378–1387. https://doi.org/10.1108/RPJ-11-2020-0272
- Insero F., Furlan V., Giberti H. Non-planar slicing for filled freeform geometries in robot-based FDM. Journal of Intelligent Manufacturing, 2023, in press. https://doi.org/10.1007/s10845-023-02250-w
- Liu B., Feng J., Lin Z., Wu S., He Y., Fu J. Spherical path planning for multi axis support free additive manufacturing of truss structures. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, vol. 109, pp. 198–212. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.12.011
- Mitropoulou I., Bernhard M., Dillenburger B. Print paths keyframing: design for non-planar layered robotic FDM printing. *Proc.* of the 5<sup>th</sup> Annual ACM symposium on computational fabrication, 2020, pp. 1–10. https://doi.org/10.1145/3424630.3425408
- Hong F., Hodges S., Myant C., Boyle D. Open5x: Accessible 5-axis 3D printing and conformal slicing. *Extended Abstracts of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2022, pp. 1–6. https://doi.org/10.1145/3491101.3519782
- Hong F., Lampret B., Myant C., Hodges S., Boyle D. 5-axis multimaterial 3D printing of curved electrical traces. *Additive Manufacturing*, 2023, vol. 70, pp. 103546. https://doi.org/10.1016/j. addma.2023.103546
- Nayyeri P., Zareinia K., Bougherara H. Planar and nonplanar slicing algorithms for fused deposition modeling technology: A critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, vol. 119, no. 5-6, pp. 2785–2810. https://doi. org/10.1007/s00170-021-08347-x
- Shan Y., Shui Y., Hua J., Mao H. Additive manufacturing of nonplanar layers using isothermal surface slicing. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, vol. 86, pp. 326–335. https://doi. org/10.1016/j.jmapro.2022.12.054
- Neel T.L., Mesto T., Hascoet J.-Y. A novel slicing strategy for continuous printing with a helix 3D printer. *Journal of Machine Engineering*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 31–43. http://dx.doi. org/10.36897/jme/151119
- Tang J., Dong Y., Cai L., Zhu Q., Shi J. Conformal 3D printing algorithm for surfaces and its in situ repair applications. *Micromachines*, 2024, vol. 15, no. 7, pp. 920. https://doi.org/10.3390/ mi15070920
- Nisja G.A., Cao A., Gao C. Short review of nonplanar fused deposition modeling printing. *Material Design & Processing Communications*, 2021, vol. 3, no. 4, pp. e221. https://doi. org/10.1002/mdp2.221
- Fortunato G.M., Nicoletta M., Batoni E., Vozzi G., De Maria C. A fully automatic non-planar slicing algorithm for the additive manufacturing of complex geometries. *Additive Manufacturing*, 2023, vol. 69. pp. 103541. https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103541
- Srinivas G.L., Laux M., Nair V.P., Brandstotter M. Multi-axis additive manufacturing: development of slicer and toolpath for 2.5 D/3D/5D printing. Advances in Service and Industrial Robotics, 2024, vol. 157, pp. 337–346. https://doi.org/10.1007/978-3-031-59257-7\_34
- Alekseev A.A., Kirsanov A.E., Shishov O.V. 3D-PRINTING of ceramic products using spiral printing of the body of rotation with a wavy surface and the effect of "Weaving". *Ogarev-online*, 2020, no. 15 (152), pp. 1–8. (in Russian)

- Кирсанов А.Е., Шишов О.В. 3D-печать керамических изделий при использовании спиральной печати тела вращения с волнообразной поверхностью и эффектом «плетения» // Микроэлектроника и информатика — 2020. 27-я Всероссийская межвузовская конференция студентов и аспирантов: тезисы докладов. М.: МИЭТ, 2020. С. 147.
- Козлова А.Д., Крауиньш П.Я. Синтез алгоритмов управления рабочим столом 5D-принтера с параллельной кинематикой // Форум молодых ученых. 2018. N 10 (26). С. 573–576.
- Lebedev V.A., Solovjov V.P., Webb B.W. View factors of spherical, conic, and cylindrical spiral surfaces // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2021. V. 274. P. 107866. https:// doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107866
- Hüttig C., Stemmer K. The spiral grid: A new approach to discretize the sphere and its application to mantle convection // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2008. V. 9. N 2. P. Q02018. https://doi. org/10.1029/2007GC001581

#### Авторы

Афанасьев Максим Яковлевич — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, вс 57194081345, https://orcid.org/0000-0003-4061-1407, higonokami@yandex.ru

Соловьев Михаил Романович — программист, ГК «Геоскан», Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, https://orcid. org/0009-0006-0787-5573, onisoris@niuitmo.ru

Крылова Анастасия Андреевна — кандидат технических наук, преподаватель, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; программист, ЗАО «Биоград», Санкт-Петербург, 197110, Российская Федерация, https://orcid.org/0000-0002-5822-6702, ananasn94@yandex.ru

Шорохов Сергей Александрович — ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, https://orcid. org/0000-0002-5412-7723, stratumxspb@gmail.com

Федосов Юрий Валерьевич — кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; инженер, ОАО «Российский институт мощного радиостроения», Санкт-Петербург, 199048, Российская Федерация, https://orcid.org/0000-0003-1869-0081, yf01@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 30.09.2024 Одобрена после рецензирования 20.12.2024 Принята к печати 24.01.2025



 Kirsanov A.E., Shishov O.V. 3D-PRINTING of ceramic products using spiral printing of the body of rotation with a wavy surface and the effect of "Weaving". *Microelectronics and Computer Science*. *Proc. of the 27th All-Russian Interuniversity Conference of Students* and Postgraduates: Abstracts. Moscow, MIET Publ., 2020, pp. 147. (in Russian)

- Kozlova A.D., Krauinsh P.Y. Synthesis of control algorithms desk 5D printer with parallel kinematics. *Young Scientists Forum*, 2018, no. 10 (26), pp. 573–576. (in Russian)
- Lebedev V.A., Solovjov V.P., Webb B.W. View factors of spherical, conic, and cylindrical spiral surfaces. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2021. vol. 274, pp. 107866. https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107866
- Hüttig C., Stemmer K. The spiral grid: A new approach to discretize the sphere and its application to mantle convection. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008. vol. 9, no. 2, pp. Q02018. https://doi. org/10.1029/2007GC001581

#### Authors

Maksim Ya. Afanasiev — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, se 57194081345, https://orcid.org/0000-0003-4061-1407, higonokami@yandex.ru

Michael R. Solovev — Software Developer, Geoscan Corporate Group, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, https://orcid.org/0009-0006-0787-5573, onisoris@niuitmo.ru

Anastasiia A. Krylova — PhD, Lecturer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Software Developer, JSC "Biograd", Saint Petersburg, 197110, Russian Federation, https://orcid. org/0000-0002-5822-6702, ananasn94@yandex.ru

Sergey A. Shorokhov — Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0002-5412-7723, stratumxspb@gmail.com

Yuri V. Fedosov — PhD, Head of Laboratory, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Engineer, JSC "Russian Institute for Power Radiobuilding", Saint Petersburg, 199048, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0003-1869-0081, yf01@yandex.ru

Received 30.09.2024 Approved after reviewing 20.12.2024 Accepted 24.01.2025

Работа доступна по лицензии Creative Commons «Attribution-NonCommercial» **I/İTMO** 

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ январь-февраль 2025 Том 25 № 1 http://ntv.ifmo.ru/ SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS January-February 2025 Vol. 25 No 1 http://ntv.ifmo.ru/en/ ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-106-113 УДК 65.012.122

### Планирование распределенных вычислений в недетерминированных системах

# Николай Викторович Колесов<sup>1</sup>, Елизавета Геннадьевна Литуненко<sup>2</sup><sup>∞</sup>, Марина Владимировна Толмачева<sup>3</sup>, Виктор Сергеевич Тюльников<sup>4</sup>

1,2,3,4 АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация

1 kolesovnv@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3287-7504

<sup>2</sup> lisa.litunenko@gmail.com<sup>\Box</sup>, https://orcid.org/0000-0001-5280-0593

<sup>3</sup> marina-tolm@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-0795-7617

<sup>4</sup> viktor.tyulnikov@gmail.com, https://orcid.org/0009-0005-5414-1567

#### Аннотация

Введение. Планирование вычислений занимает важное место в процессе проектирования распределенных систем обработки информации и управления. Эффективные алгоритмы планирования позволяют находить технические решения, адекватные существующим ограничениям. Это становится особенно актуально для вычислителей, размещенных на автономных носителях, таких как беспилотные летательные аппараты, необитаемые подводные аппараты и другие подвижные объекты. В работе предложены и исследованы алгоритмы планирования заданий для распределенной вычислительной недетерминированной системы в случае, когда время выполнения заданий известно неточно и задано в виде временных интервалов. Метод. Решение поставленной задачи достигается путем сведения ее к известной задаче flow shop планирования с последующим применением формализма разрешимых классов распределенных вычислительных систем. Основные результаты. Предложены два алгоритма планирования заданий для недетерминированной распределенной вычислительной системы. Алгоритмы допускают отсутствие изоморфизмов между графами заданий и графом межпроцессорных связей. В этом случае невозможно применение известных алгоритмов flow shop планирования. Алгоритмы предполагают предварительное приведение рассматриваемой системы к требуемому виду и базируются на положениях интервального анализа и понятии разрешимого класса распределенных вычислительных систем. Критерием оптимальности предложенных алгоритмов служит минимум среднего времени пребывания задания в системе. Дополнительно для второго алгоритма используется критерий минимума максимального отклонения от заданных директивных сроков. Для введенных разрешимых классов систем для обоих критериев сформулированы оптимальные алгоритмы планирования полиномиальной сложности. Обсуждение. Предложенные решения могут быть применены при планировании вычислений в распределенных вычислительных системах при неточно известных длительностях решаемых задач, в частности, при планировании экономических процессов.

#### Ключевые слова

планирование вычислений, распределенная вычислительная система реального времени, flow shop планирование, разрешимый класс систем, время пребывания задания в системе, директивный срок

Ссылка для цитирования: Колесов Н.В., Литуненко Е.Г., Толмачева М.В., Тюльников В.С. Планирование распределенных вычислений в недетерминированных системах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 1. С. 106–113. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-106-113

### Scheduling distributed computations in non-deterministic systems

Nikolai V. Kolesov<sup>1</sup>, Elisaveta G. Litunenko<sup>2</sup>, Marina V. Tolmacheva<sup>3</sup>, Viktor S. Tiulnikov<sup>4</sup>

1,2,3,4 Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation

<sup>2</sup> lisa.litunenko@gmail.com<sup>\Box</sup>, https://orcid.org/0000-0001-5280-0593

<sup>3</sup> marina-tolm@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-0795-7617

<sup>4</sup> viktor.tyulnikov@gmail.com, https://orcid.org/0009-0005-5414-1567

© Колесов Н.В., Литуненко Е.Г., Толмачева М.В., Тюльников В.С., 2025

<sup>1</sup> kolesovnv@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3287-7504

#### Abstract

Computation scheduling is very important in the design of distributed information processing and control systems. Effective scheduling algorithms allow developer to find technical solutions that are adequate to the existing constraints. This is especially important for computers located on autonomous carriers, such as unmanned aerial vehicles, autonomous underwater vehicles, and other vehicles. Scheduling algorithms for tasks in the distributed non-deterministic computing system, when the task execution time is known inaccurately and described as time interval, are proposed and researched. The solution of the problem is achieved by reducing it to a known problem of flow shop scheduling with subsequent application of the formalism of solvable classes of distributed computing systems. Authors propose two algorithms for scheduling tasks for a non-deterministic distributed computing system. Algorithms allow the absence of isomorphisms between task graphs and the graph of interprocessor communications for the system, and the presence of many information outputs and branches between tasks. In these conditions, it is impossible to use known algorithms of flow shop scheduling. Proposed algorithms assume preliminary reduction of the considered system to the required form and base on the provisions of interval analysis and the concept of a solvable class of distributed computing systems. Optimality criterion for proposed algorithms is the criterion of minimum average time a task remains in the system. Additionally, the criterion of minimum of maximum deviation from directive terms is used. For the introduced solvable classes of systems, optimal scheduling algorithms of polynomial complexity are proposed. These algorithms allow us to schedule computations in real distributed computing systems when the system deviates from the canonical form and when the durations of the tasks are not precisely known. Proposed algorithms can be applied when scheduling computations in real distributed computing systems and solving tasks with not precisely known durations and also, for example, in scheduling economic processes.

#### Keywords

computation scheduling, distributed real-time computing system, (flow shop)-scheduling, solvable class of systems, task residence time in the system

For citation: Kolesov N.V., Litunenko E.G., Tolmacheva M.V., Tiulnikov V.S. Scheduling distributed computations in non-deterministic systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 1, pp. 106–113 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-106-113

#### Введение

Вопросы организации вычислений остаются в центре внимания разработчиков вычислительной техники. При этом для решения возникающих проблем привлекаются методы теории планирования. Здесь можно выделить планирование как в центрах коллективного пользования [1, 2], так и в системах реального времени [3–7]. В настоящей работе рассматривается направление планирования вычислений в распределенных системах реального времени. В качестве критериев могут быть использованы, например, минимум общего времени выполнения или минимум максимального отклонения от заданных директивных сроков. Отметим, что данными критериями не исчерпываются важные аспекты проектирования вычислительных систем.

Обсуждаемый подход принадлежит к области так называемого flow shop планирования [8-11]. В качестве практической интерпретации этой задачи часто называют обработку информации в многоканальных системах, когда в распределенной системе на общих процессорах выполняется совокупность алгоритмов, каждый из которых использует информацию со своего набора датчиков. Оптимальное решение проблемы планирования в общем случае может быть получено переборными алгоритмами, которые характеризуются экспоненциальной вычислительной сложностью, и в силу этого их применение в целом ряде приложений оказывается невозможным. По этой причине широкое распространение на практике получили приближенные алгоритмы, которые применены в работе. При этом если в классической постановке flow shop планирования рассматриваемая система представляет собой конвейер с линейным графом информационных связей, то в настоящей работе этот граф — ациклический и

используемый подход основан на так называемых разрешимых классах систем — РКС-подход. Этот выбор не является случайным, так как РКС-подход в отличие от известных проявил достаточную эффективность при использовании различных критериев оптимальности. Так в работе [10] показано, что базовая идея РКС-подхода, предложенного для flow shop планирования с минимизацией общей длительности плана или максимального отклонения от заданных директивных сроков, оказывается эффективной и при минимизации среднего по заданиям времени пребывания задания в системе. Заметим, что это время складывается из двух составляющих — времени ожидания в очереди и времени исполнения. В результате разработаны два алгоритма flow shop планирования в недетерминированных системах. В первом алгоритме использован критерий минимума среднего по заданиям времени пребывания задания в системе, во втором алгоритме дополнительно добавлен критерий минимума максимального отклонения от заданных директивных сроков.

В настоящей работе приведены предварительные сведения о flow shop планировании и РКС-подходе. Сформулирована постановка проблемы и описаны предлагаемые алгоритмы планирования вычислений.

## Предварительные сведения и постановка проблемы

Рассматриваемая распределенная вычислительная система включает процессоры, имеющие индивидуальную память для хранения кода программ и обменивающиеся информацией через каналы передачи данных. При этом рассматриваемое множество задач задано информационным графом G(V, E), содержащим n компонент связности (задания). Каждое задание  $\tau_i$ ,  $j = \overline{1, n}$ 

состоит из множества задач. Графы заданий изоморфны графу межпроцессорных связей системы. Считаем, что порядок выполнения заданий на процессорах одинаков. Планированию подлежат *n* независимых равноприоритетных заданий, каждое из которых состоит из множества задач  $\tau_i = {\tau_{i,k} | k = 1, m, j = 1, n}$ , где  $\tau_{i,k} - k$ -я задача *j*-го задания; *m* — число задач в каждом задании (равное числу процессоров). Предположим, что для каждой задачи т<sub>і.k</sub> известна длительность ее выполнения по верхней границе  $e_{i,k}$ . Произведенное назначение заданий соответствует случаю flow shop системы. Это означает, что имеется *m* изоморфизмов  $\varphi_i: G_i(S_i, T_i) \rightarrow$  $\rightarrow H(Q, P) j = 1, m,$  где  $G_j(S_j, T_j)$  — граф межзадачных связей *j*-го задания; S<sub>j</sub> — множество ребер графа  $G_i; T_i$  — множество вершин (задач); H(Q, P) — граф межпроцессорных связей; Q — множество ребер (информационных связей) графа Н; Р — множество процессоров. Все введенные графы являются направленными, ациклическими, содержащими в общем случае не один путь между любыми вершинами. Графы характеризуются выделенным подмножеством входных вершин и одной выходной вершиной. Далее для рассматриваемой системы используется обозначение  $C(P, \tau)$ . Предполагается, что время решения задачи известно неточно и задается временным интервалом  $\tilde{e}_i = [\underline{e}_i, \bar{e}_i],$ где <u>е</u><sub>*i*</sub> и *ē*<sub>*i*</sub> — нижняя и верхняя границы временного интервала соответственно. Пусть поставлена задача определить такой порядок выполнения заданий, чтобы оптимизировать заданный критерий. Для решения задачи используем критерий — минимум среднего времени пребывания заданий в системе.

Каждый входной процессор  $P_i$  связан с выходным процессором  $P_0$  некоторым вычислительным путем (последовательностью процессоров)  $p_k = P_i, P_j, ..., P_0$ . Обозначим интервал  $\tilde{E}_j(p_k)$  как время выполнения пути  $p_k$  на *j*-м задании. Это время определяется как сумма длительностей интервалов  $\tilde{e}_{j,i}$  выполнения задач *j*-го задания процессорами, которые находятся на этом пути. Используя нумерацию процессоров вдоль пути  $p_k$ , выражение для  $\tilde{E}_j(p_k)$  можно записать следующим образом:

$$\tilde{E}_{j}(p_{k}) = \sum_{i=1}^{m_{k}} \tilde{e}_{j,i}, \qquad (1)$$

где  $m_k$  — число процессоров, принадлежащих пути  $p_k$ , а при суммировании используется интервальная операция [12]:

$$\tilde{e}_i + \tilde{e}_j = [\underline{e}_i, \, \bar{e}_i] + [\underline{e}_j, \, \bar{e}_j] = [\underline{e}_i + \underline{e}_j, \, \bar{e}_i + \bar{e}_j].$$

Определение 1. Интервал  $\tilde{e}_i = [\underline{e}_i, \bar{e}_i]$  не меньше интервала  $\tilde{e}_i = [\underline{e}_i, \bar{e}_i]$  ( $\tilde{e}_i \ge \tilde{e}_i$ ), если  $\underline{e}_i \ge \bar{e}_i$ .

Таким образом, зоны неопределенности сравниваемых интервалов не должны пересекаться.

Назовем вычислительный путь  $p_j^*$  критическим для *j*-го задания, если время его выполнения на *j*-м задании является наибольшим среди всех остальных путей в системе. Очевидно, что для разных заданий, выполняемых в одной и той же системе, критические пути могут быть различными. Для определения разрешимых классов потребуется ввести понятие доминирования на множестве процессоров.

**Определение 2.** Процессор  $P_q$  доминирует над процессором  $P_r$  ( $P_q > P_r$ ), если

$$\min_{i} \underline{e}_{q,j} \ge \max_{i} \bar{e}_{r,j}.$$

Рассмотрим разрешимые классы систем, общее свойство которых заключается в следующем: для любого задания, выполняемого в системе, критический путь проходит через одни и те же процессоры. При этом определяющие свойства классов следующие.

Определение 3 (класс 1). Множество процессоров критического пути представляет собой последовательность  $P_1 > P_2 > ... > P_{m^*}$ , убывающую по отношению доминирования.

Определение 4 (класс 2). Множество процессоров критического пути представляет собой последовательность  $P_1 < P_2 < \ldots < P_{m^*}$ , возрастающую по отношению доминирования.

Определение 5 (класс 3). Множество процессоров критического пути представляет собой пару соединенных последовательностей:

$$P_1 < P_2 < \ldots < P_{h^*} > \ldots > P_{m^*-1} > P_{m^*}, \ 1 < h^* < m^*,$$

первая из которых возрастает, а вторая убывает по отношению доминирования ( $h^*$  — номер процессора стыковки двух последовательностей).

## Приведение модели системы к каноническому виду

Как следует из раздела «Предварительные сведения и постановка проблемы», возможность применения известных алгоритмов flow shop планирования ограничена некоторыми требованиями, предъявляемыми к рассматриваемой системе: существование изоморфизмов между графами заданий (требование 1) и графом межпроцессорных связей (требование 2).

На практике эти требования могут не выполняться. В этом случае говорят о job shop системе. Однако это не всегда означает неприменимость к подобным системам известных алгоритмов flow shop планирования. Зачастую они могут быть применены после некоторых преобразований модели системы к требуемому каноническому виду. Приведем пример преобразования. На рис. 1 представлены четыре ациклических графа заданий. Вершины каждого графа соответствуют задачам, входящим в данное задание. Номер вершины является номером процессора, исполняющего данную задачу. Сплошной линией выделены задачи, решаемые в данном задании. Только первое задание (рис. 1, *a*) изоморфно графу межпроцессорных связей. Остальные задания неизоморфны, а значит, система не является flow shop системой. Отметим, что рассматриваемый случай сводится к flow shop системе. Для этого достаточно задания на рис. 1, *b*-*d* достроить до задания на рис. 1, а, введя в каждое из них соответствующие задачи нулевой длительности (изображены штриховой линией). Так, например, в задание (рис. 1, b) необходимо ввести задачи 2, 4, 5 нулевой длительности.
#### Условия оптимальности планов в системах из разрешимых классов

Приведем условия оптимальности flow shop планов при неопределенных длительностях задач и при использовании в качестве критерия минимума среднего по заданиям времени пребывания заданий в системе. Эти условия с точностью до обозначений совпадают с соответствующими условиями для случая, когда длительности задач известны точно [10]. Таким образом, для любого набора представителей из этих интервалов, а значит, и для интервалов в целом, алгоритм, основанный на известных условиях, будет формировать оптимальный план.

Для системы из класса 1 минимальное значение среднего по заданиям времени  $\overline{F_1}(\pi)$  пребывания заданий в системе достигается в плане  $\pi$ , в котором задания упорядочены по неубыванию длительностей временных интервалов первых задач критического пути, т. е.

$$\tilde{e}_{1,1}^* \le \tilde{e}_{2,1}^* \le \dots \le \tilde{e}_{n,1}^*.$$
 (2)

Для системы из класса 2 минимальное значение среднего по заданиям времени  $\overline{F_2}(\pi)$  пребывания заданий в системе достигается в плане  $\pi$ , который удовлетворяет двум условиям:

 задания упорядочены по неубыванию длительностей временных интервалов последних задач критического пути, т. е.

$$\tilde{e}_{1,m^*}^* \le \tilde{e}_{2,m^*}^* \le \dots \le \tilde{e}_{n,m^*}^*;$$
 (3)

$$j^* = \arg\min_{j} \sum_{i=1}^{m^*-1} \tilde{e}_{j,i}^*.$$
 (4)



Рис. 1. Примеры заданий job shop системы (a), сводящейся к flow shop системе: отсутствуют задачи, решаемые процессорами 2, 4 и 5 (b); отсутствует задача, решаемая процессором 6 (c); отсутствуют задачи, решаемые процессорами 1, 2, 4 и 5 (d)

*Fig. 1.* Examples of jobs for job shop system adductable to flow shop system (*a*): no tasks for processors 2, 4, 5 to solve (*b*); no task for processor 6 to solve (*c*); no tasks for processors 1, 2, 4, 5 to solve (*d*)

Для системы из класса 3 минимальное значение среднего по заданиям времени  $\overline{F_3}(\pi)$  пребывания заданий в системе достигается в плане  $\pi$ , который удовлетворяет двум условиям:

 задания упорядочены по неубыванию длительностей временных интервалов задач стыковки критического пути, т. е.

$$\tilde{e}_{1,h^*}^* \le \tilde{e}_{2,h^*}^* \le \dots \le \tilde{e}_{n,h^*}^*; \tag{5}$$

— первое задание плана π удовлетворяет условию

$$j^* = \arg\min_{j} \sum_{i=1}^{h^*-1} \tilde{e}_{j,i}^*.$$
 (6)

#### Алгоритм планирования в системах общего вида

Предварительно отметим, что для недетерминированной системы может не существовать оптимального плана, поскольку описание ее экземпляров может значительно различаться. Детерминированные экземпляры системы получаются из недетерминированных систем путем замены интервала времени выполнения каждой задачи на конкретное значение из этого интервала. В результате в неблагополучном случае разным экземплярам системы могут соответствовать разные оптимальные планы.

Очевидно, что на практике для flow shop системы общего вида, описанной в постановке задачи, условия ее принадлежности к тому или иному разрешимому классу чаще всего не выполняются. В частности, могут не совпадать критические пути разных работ, может нарушаться отношение доминирования между машинами, а если оно и выполняется, то может не быть упорядоченных по этому отношению цепочек машин, характерных для разрешимых классов. В результате исчезают гарантии оптимальности алгоритмов, описанных в разделе «Условия оптимальности планов в системах из разрешимых классов». В связи с этим для системы общего вида, не принадлежащей ни к одному из разрешимых классов, планирование осуществляется в соответствии с положениями РКС-подхода [3]. При этом алгоритмы планирования являются приближенными, но справедливыми для любой из рассматриваемых систем. Они имеют рекурсивный характер и выполняются за число шагов, не большее, чем число заданий.

## Алгоритм 1.

Шаг 1. Найти в системе  $C' = (P, \tau')$  (при условии  $\tau' = \tau, C' = C$ ) на каждом шаге рекурсии вычислительный путь  $p_k$ , который характеризуется наибольшим значением суммы  $\tilde{E}(p_k) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{m_k} \tilde{e}_{j,i}$ . Шаг 2. Определить, к какому разрешимому классу

Шаг 2. Определить, к какому разрешимому классу наиболее близка рассматриваемая на шаге 1 система  $C' = (P, \tau')$  на основе геометрического классификационного правила [3], предполагающего аппроксимацию зависимости средней длительности решаемых задач от номера машины и формирование оценки  $\delta$  точности аппроксимации (достоверности классификации). В случае, если достигнутая на *k*-ом шаге достоверность классификации окажется меньше значения достоверности на предыдущем шаге, то планирование завершается с сохранением упорядоченности (k-1)-го шага, иначе перейти к шагу 3.

Шаг 3. Определить с использованием соответствующих алгоритмов, основанных на условиях оптимальности (раздел «Условия оптимальности планов в системах из разрешимых классов»), упорядоченность оставшихся заданий на интервале свободных позиций формируемого плана. Исключить первое задание в этой упорядоченности из множества т' планируемых заданий. Если результирующее множество планируемых заданий непустое, то перейти к шагу 1, иначе конец.

#### Двухкритериальный алгоритм планирования

С учетом алгоритма 1 рассмотрим более сложную задачу, когда при планировании вместо одного используются два критерия оптимальности. В данном случае к критерию минимума среднего времени пребывания задания в системе добавляется критерий минимума максимального отклонения моментов завершения заданий от их директивных сроков. Далее для этой ситуации предлагается приближенный алгоритм flow shop планирования. Рассмотрим суть алгоритма. В соответствии с правилами РКС-подхода, продемонстрированными выше (раздел «Алгоритм планирования в системах общего вида»), построим план для критерия минимума максимального отклонения от заданных директивных сроков. Выполним корректировку плана, стремясь удовлетворить условия (2)–(6), не нарушая определенных для заданий директивных сроков. Корректировку плана осуществим с использованием допустимых перестановок заданий. При этом может оказаться, что в полной мере желаемое упорядочение получить невозможно. В этом случае необходимо допустить пониженное качество плана. Рассмотрим сначала проблему flow shop планирования для критерия минимума максимального отклонения от заданных директивных сроков.

Предположим, что для каждого задания из исходного списка определен директивный срок  $\{d_i | i = 1, n\}$ их завершения. Рассмотрим некоторый план  $\pi = (\tau_1, \tau_2, ..., \tau_n)$  выполнения этих заданий. Каждое задание при этом будет характеризоваться временным интервалом завершения  $\{\tilde{t}_{i}| j = 1, n\}, \underline{для}$  которого может быть определено отклонение { $\hat{\delta}_{j}|j=1, n$ } относительно заданного директивного срока:  $\tilde{\delta}_i = \tilde{t}_i - d_i$ . Будем считать, что директивный срок для *j*-го задания выполняется, если  $\delta_i \leq 0$ . Проблема состоит в поиске алгоритма составления плана, минимизирующего максимальное отклонение  $\tilde{\delta}_{\max} = \max \tilde{\delta}_{j}$ .

Воспользовавшись известными результатами для детерминированных систем [3], приведем условия оптимальности планов для рассматриваемых разрешимых классов недетерминированных систем. Приближенный алгоритм, рассчитанный на системы общего вида, будет совпадать с алгоритмом 1. Условия оптимальности требуют упорядочивания заданий по возрастанию значений либо директивных сроков (класс 2), либо некоторых функций от директивных сроков и длительностей задач (виртуальных директивных сроков) в виде:

- класс 1 — 
$$\tilde{d}_{j}' = d_{j} - \sum_{i=2}^{m^{*}} \tilde{e}_{i,j}^{*}$$
;  
- класс 2 — заданные директивные сроки;  
- класс 3 —  $\tilde{d}_{j}'' = d_{j} - \sum_{i=1,i+1}^{m^{*}} \tilde{e}_{i,j}^{*}$ .

В данном случае, при упорядочивании заданий классов 1 и 3 (подобно ситуации заданий (2), (3) и (5)) можно столкнуться с ситуацией несравнимости интервальных величин, что также может привести к отсутствию оптимального плана.

 $i=h^{*}+1$ 

Рассматриваемая проблема является более сложной, поскольку оптимизация по критерию минимума среднего времени пребывания задания в системе должна осуществляться при ограничениях, определяемых директивными сроками для заданий. Напомним, что в общем случае поиск оптимального решения не будет выполнен. При этом в качестве основы алгоритма используем сортировку задач по соответствующим значениям (2)-(6).

Предварительно определим основные понятия и докажем утверждения, которые послужат теоретическим основанием для предлагаемого алгоритма.

Определение 6. Перестановка — преобразование плана, при котором перемещается в новую позицию одно задание исходного плана.

Определение 7. Соседняя парная перестановка преобразование плана, при котором два соседних задания исходного плана меняются местами.

Определение 8. Допустимая (недопустимая) парная перестановка — перестановка, при которой не нарушаются (нарушаются) директивные сроки всех планируемых заданий.

Заметим, что используемая далее в предлагаемом алгоритме процедура обменной (пузырьковой) сортировки представляет собой последовательность соседних парных перестановок.

Утверждение 1. Каждая соседняя парная перестановка, реализуемая в рамках обменной сортировки заданий по значению длительности соответствующих задач (2)–(6), уменьшает среднее время пребывания задания в системе для получаемого плана.

Доказательство. Запишем известное выражение для среднего по заданиям времени пребывания задания в системе  $F_1(\pi)$  в случае системы из класса 1 [13]:

$$\overline{F}_{1}(\pi) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} \left[ \sum_{j=1}^{k} \tilde{e}_{j,1} + \sum_{i=2}^{m} \tilde{e}_{k,i} \right] = \frac{1}{n} \left[ \sum_{k=1}^{n} \sum_{j=1}^{k} \tilde{e}_{j,1} + \sum_{k=1}^{n} \sum_{i=2}^{m} \tilde{e}_{k,i} \right].$$
(7)

Проанализируем второе слагаемое в скобках выражения (7). Каждое k-е слагаемое ее внешней суммы представляет собой сумму длительностей всех стадий, кроме первой, выполняемых в *k*-м процессе. Поскольку такая сумма длительностей присутствует в двойной сумме для каждого процесса, ее значение не зависит от упорядоченности процессов, а значит, при последующем анализе второе слагаемое можно исключить из (7) и перейти к минимизации выражения

$$\overline{F'}_{1}(\pi) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} \sum_{j=1}^{k} \tilde{e}_{j,1}.$$
(8)

Если далее в выражении (8) развернуть внутреннюю сумму и привести подобные члены, то получим

$$\overline{F'}_{1}(\pi) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} \left[ (n-k+1)\tilde{e}_{k,1} \right].$$
(9)

Предположим, что в результате перестановки меняются местами задания с q-ой и q + 1-ой позиций. Для результирующего плана  $\hat{\pi}$  выражение (9) имеет вид

$$\overline{F'}_{1}(\hat{\pi}) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} \left[ (n-k+1)\hat{e}_{k,1} \right].$$
(10)

Вычислим и проанализируем разность выражений (9) и (10). Поскольку в суммах, входящих в эти выражения все слагаемые, кроме двух участвующих в перестановке, совпадают, получим

$$\overline{F'}_{1}(\pi) - \overline{F'}_{1}(\hat{\pi}) = \frac{1}{n} [(n-q+1)\tilde{e}_{q,1} - (n-q-1+1)\tilde{e}_{q+1,1} - (n-q+1)\tilde{e}_{q+1,1} + (n-q-1+1)\tilde{e}_{q,1}] =$$

$$= \frac{1}{n} [(n-q+1)(\tilde{e}_{q,1} - \tilde{e}_{q+1,1}) - (n-q+1+1)(\tilde{e}_{q,1} - \tilde{e}_{q+1,1})] =$$

$$= \frac{1}{n} [\tilde{e}_{q,1} - \tilde{e}_{q+1,1}] > 0.$$

Таким образом, значение критерия в результате перестановки уменьшается.

По изложенной схеме можно получить аналогичный результат для разрешимых классов 2 и 3. Этот результат позволяет рассчитывать, что алгоритм планирования, основанный на процедуре обменной сортировки, будет достаточно эффективен.

Содержание предлагаемого алгоритма планирования в упрощенном виде выглядит следующим образом. Алгоритм 2.

#### AJIOPHIM 2.

Шаг 1. Построить план  $\pi_{dc}$  с использованием критерия минимума максимального отклонения от заданных директивных сроков.

Шаг 2. Построить план  $\pi_{B\Pi}$  с использованием критерия минимума среднего времени пребывания задания в системе.

Шаг 3. Осуществить переупорядочивание (сортировку) заданий плана  $\pi_{\rm dc}$  методом обменной сортировки, следуя упорядоченности заданий в плане  $\pi_{\rm BII}$  до первого нарушения директивных сроков.



- Рис. 2. Пример системы (жирными линиями выделены процессоры критического пути)
- *Fig. 2.* Example of the system (processors of critical path marked with bold frames)

#### Пример реализации

Рассмотрим пример, иллюстрирующий работу алгоритма 1. Построим план для четырех заданий, выполняющихся в системе, показанной на рис. 2, и включающей восемь процессоров.

В табл. 1 приведены интервальные значения длительностей задач, входящих в выполняемые задания и выраженные в условных единицах.

Как уже отмечалось в разделе «Предварительные сведения и постановка проблемы», в любой flow shop системе каждый процессор выполняет одну и только одну задачу из каждого конкретного задания. В рассматриваемой системе это не так. Действительно, в некоторых клетках табл. 1 присутствуют прочерки. Они свидетельствуют о том, что процессор, соответствующий данному столбцу табл. 1, не участвует в выполнении задания, соответствующего данной строке табл. 1. Отсюда следует, что система не удовлетворяет указанному требованию. В таком виде к системе невозможно применить алгоритмы планирования. Решить эту проблему можно путем приведения системы к каноническому виду, введя задачи нулевой длительности как показано в табл. 2.

Это преобразование позволяет рассчитать время выполнения каждого вычислительного пути в соответствии с выражением (1):

$$\tilde{E}_1(1, 2, 4, 8) = [301; 360], \tilde{E}_2(3, 5, 8) = [199; 214],$$
  
 $\tilde{E}_3(6, 8) = [60; 80], \tilde{E}_4(4, 7, 8) = [130; 160].$ 

*Таблица 1.* Интервалы значений длительности [минимальная; максимальная] выполнения задач на процессорах исходной системы, усл. ед.

Table 1. Duration value intervals [minimum; maximum], for processors of initial system, in conventional units

| 20 202020 | Процессоры |            |            |           |          |          |          |          |
|-----------|------------|------------|------------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| задания   | 1          | 2          | 3          | 4         | 5        | 6        | 7        | 8        |
| 1         | [115; 120] | [137; 140] | [110; 114] | —         | [70; 71] | [50; 55] | —        | [10; 12] |
| 2         | [110; 112] | [135; 136] |            | [96; 100] | [76; 77] | —        | [32; 36] | [16; 18] |
| 3         | [90; 94]   | [131; 132] | _          | [92; 98]  | [72; 74] | [56; 58] | [35; 40] | [12; 17] |
| 4         | [95; 100]  | [133; 134] | _          | [94; 100] | [77; 80] | _        | [34; 38] | [19; 20] |

Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2025, том 25, № 1 Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2025, vol. 25, no 1

*Таблица 2*. Интервалы значений длительности [минимальная; максимальная] выполнения задач на процессорах преобразованной системы, усл. ед.

| 20 101110 |            | Процессоры |            |           |          |          |          |          |
|-----------|------------|------------|------------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| Задания   | 1          | 2          | 3          | 4         | 5        | 6        | 7        | 8        |
| 1         | [115; 120] | [137; 140] | [110; 114] | [0; 0]    | [70; 71] | [50; 55] | [0; 0]   | [10; 12] |
| 2         | [110; 112] | [135; 136] | [0; 0]     | [96; 100] | [76; 77] | [0; 0]   | [32; 36] | [16; 18] |
| 3         | [90; 94]   | [131; 132] | [0; 0]     | [92; 98]  | [72; 74] | [56; 58] | [35; 40] | [12; 17] |
| 4         | [95; 100]  | [133; 134] | [0; 0]     | [94; 100] | [77; 80] | [0; 0]   | [34; 38] | [19; 20] |

Table 2. Duration value intervals [minimum; maximum], for processors of transformed system, in conventional units

Примечание. Серым цветом отмечены процессоры критического пути.

В соответствии с полученными значениями  $\tilde{E}_{j}$ , наиболее загруженным — критическим вычислительным путем — является путь, включающий в себя процессоры 1, 2, 5, 8:  $p_k = P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_5$ ,  $P_8$ . На рис. 2 процессоры критического пути выделены жирной рамкой.

Рассматриваемая система относится к классу 3. В данном случае оптимальный план существует и в соответствии с (5) имеет вид

$$\pi_1 = \tau_3 \tau_4 \tau_2 \tau_1,$$

поскольку условие (6) тоже выполняется. Таким образом, в данном случае оптимальный по критерию минимума среднего по заданиям времени пребывания заданий в системе план формируется за один шаг. При этом важно отметить, что оптимальный результат получен с использованием алгоритма 1, обладающего полиномиальной вычислительной сложностью, в отличие от алгоритма полного перебора факториальной сложности.

#### Обсуждение результатов

Важно отметить, что проблема планирования каких-либо действий возникает в разных приложениях и в разнообразных постановках. Среди возможных приложений, кроме вычислительных процессов, необходимо выделить планирование бизнес-процессов, технологических процессов [13, 14], движения транспорта [15], и т. п. При этом разнообразие представленных задач весьма велико. Часто рассматриваемые в раз-

#### Литература

- Toporkov V., Yemelyanov D., Toporkova A. Coordinated global and private job-flow scheduling in grid virtual organizations // Simulation Modelling Practice and Theory. 2021. V. 107. P. 102228. https://doi. org/10.1016/j.simpat.2020.102228
- Малашенко Ю.Е., Назарова И.А. Управление ресурсоемкими разнородными вычислительными заданиями с директивными сроками окончания // Известия РАН. Теория и системы управления. 2012. № 5. С. 15–22.
- Колесов Н.В., Толмачева М.В., Юхта П.В. Системы реального времени. Планирование, анализ, диагностирование // СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2014. 180 с.
- 4. Liu J.W.S. Real-Time Systems. Prentice Hall, 2000. 610 p.
- Cottet F., Delacroix J., Kaiser C., Mammeri Z. Scheduling in Real-Time Systems. J. Wiley, 2002. 288 p.

личных приложениях математические постановки задачи оказываются близки или даже идентичны, что способствует перетеканию предлагаемых решений из одной прикладной области в другую. По этой причине выполненное исследование может быть использовано и в экономических приложениях, и в планировании движения каких-либо объектов.

Исследована вычислительная сложность предложенных алгоритмов, которая в обоих случаях характеризуется полиномиальной зависимостью. Это можно утверждать на том основании, что базовой процедурой для алгоритмов служит процедура сортировки полиномиальной сложности.

#### Заключение

В работе рассмотрены вопросы планирования вычислительных процессов в распределенных недетерминированных системах реального времени, т. е. системах, для которых время решения задач известно неточно и задано интервалами. Общей особенностью предложенных приближенных алгоритмов являются их простота и учет неопределенности длительности выполнения заданий. В процессе планирования на основе алгоритма 1 использован критерий минимума среднего времени пребывания заданий в системе. При планировании на основе алгоритма 2 использовано два критерия — минимум среднего времени пребывания заданий в системе и минимум максимального отклонения моментов завершения заданий от их директивных сроков.

#### References

- Toporkov V., Yemelyanov D., Toporkova A. Coordinated global and private job-flow scheduling in grid virtual organizations. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2021, vol. 107, pp. 102228. https:// doi.org/10.1016/j.simpat.2020.102228
- Malashenko Y.E., Nazarova I.A. Controlling computationally intensive heterogeneous computational tasks with directive deadlines. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2012, vol. 51, no. 5, pp. 628–635. https://doi.org/10.1134/ S1064230712050024
- Kolesov N.V., Tolmacheva M.V., Iukhta P.V. Real-time Systems. Planning, Analysis, Diagnostics. St. Petersburg, CSRI ELEKTROPRIBOR Publ., 2014, 180 p. (in Russian)
- 4. Liu J.W.S. Real-Time Systems. Prentice Hall, 2000, 610 p.
- Cottet F., Delacroix J., Kaiser C., Mammeri Z. Scheduling in Real-Time Systems. J. Wiley, 2002, 288 p.

- 6. Cheng A.M.K. Real-Time Systems: Scheduling, Analysis, and Verification. Wiley-Interscience, 2002. 552 p.
- Глонина А.Б., Балашов В.В. О корректности моделирования модульных вычислительных систем реального времени с помощью сетей временных автоматов // Моделирование и анализ информационных систем. 2018. Т. 25. № 2. С. 174–192. https://doi. org/10.18255/1818-1015-2018-2-174-192
- Choudhari, S.D., Khanna R. Flow shop scheduling problem with loading and unloading time // International Journal of Mathematics Research. 2017. V. 9. N 1. P. 13–26.
- Kurniawan D., Radja A.C., Suprayogi, Halim A.H. A Flow Shop Batch Scheduling and Operator Assignment Model to Minimise Actual Flow Time // Proc. of the Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference. 2017. P. 1–6.
- Грузликов А.М., Колесов Н.В., Литуненко Е.Г., Скородумов Ю.М. Маршрутизация в сетях автономных необитаемых подводных аппаратов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21. № 6. С. 984–990. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-6-984-990
- Колесов Н.В., Литуненко Е.Г., Скородумов Ю.М., Толмачева М.В. Планирование заданий в распределенной вычислительной системе на кристалле с минимизацией потребляемой мощности // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23. № 5. С. 1001–1008. https://doi. org/10.17586/2226-1494-2023-23-5-1001-1008
- Жолен Л., Кифер М., Дидри О., Вальтер Э. Прикладной интервальный анализ: с примерами по оцениванию параметров и состояний, робастному управлению и робототехнике. Москва; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. 467 с.
- 13. Brucker P. Scheduling Algorithms. Springer, 2007. 371 p.
- Лазарев А.А. Метрики в задачах теории расписаний // Математическая теория управления и ее приложения. 15-я мультиконференция по проблемам управления. СПб, 2022. С.146–148.
- Белоусов Ф.А., Неволин И.В., Хачатрян Н.К. Моделирование и оптимизация планов грузовых железнодорожных перевозок, выполняемых транспортным оператором // Бизнес-информатика. 2020. Т. 14. № 2. С. 21–35. https://doi.org/10.17323/2587-814X.2020.2.21.35

#### Авторы

Колесов Николай Викторович — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, вс 6602000556, https://orcid.org/0000-0003-3287-7504, kolesovnv@ mail.ru

**Литуненко Елизавета Геннадьевна** — младший научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, **SC** 57796319900, https://orcid.org/0000-0001-5280-0593, lisa.litunenko@gmail.com

Толмачева Марина Владимировна — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, то 16305525100, https://orcid.org/0000-0003-0795-7617, marina-tolm@ yandex.ru

Тюльников Виктор Сергеевич — инженер-программист, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, https://orcid.org/0009-0005-5414-1567, viktor. tyulnikov@gmail.com

Статья поступила в редакцию 07.11.2025 Одобрена после рецензирования 25.12.2025 Принята к печати 26.01.2025

- 6. Cheng A.M.K. *Real-Time Systems: Scheduling, Analysis, and Verification*. Wiley-Interscience, 2002, 552 p.
- Glonina A.B., Balashov V.V. On the correctness of Real-Time Modular Computer Systems Modeling with stopwatch automata networks. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2018, vol. 52, no. 7, pp. 817–827. (in Russian). https://doi.org/10.3103/ S0146411618070271
- 8. Choudhari, S.D., Khanna R. Flow shop scheduling problem with loading and unloading time. *International Journal of Mathematics Research*, 2017, vol. 9, no. 1, pp. 13–26.
- Kurniawan D., Radja A.C., Suprayogi, Halim A.H. A Flow Shop Batch Scheduling and Operator Assignment Model to Minimise Actual Flow Time. *Proc. of the Asia Pacific Industrial Engineering* & Management Systems Conference, 2017, pp. 1–6.
- Gruzlikov A.M., Kolesov N.V., Litunenko E.G., Skorodumov Yu.M. Routing in networks of autonomous underwater vehicles. *Scientific* and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2021, vol. 21, no. 6, pp. 984–990. (in Russian). https://doi. org/10.17586/2226-1494-2021-21-6-984-990
- Kolesov N.V., Litunenko E.G., Skorodumov Iu.M., Tolmacheva M.V. Job scheduling in a distributed computing system on a chip with power consumption minimization. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 5, pp. 1001–1008. (in Russian). https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-5-1001-1008
- Jaulin L., Kieffer M., Didrit O, Walter É. Applied Interval Analysis With Examples in Parameter and State Estimation, Robust Control and Robotics. Springer, 2001, 379 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0249-6
- 13. Brucker P. Scheduling Algorithms. Springer, 2007, 371 p.
- Lazarev A.A. Metrics for problem of scheduling theory. *Mathematical* Control Theory and Its Applications. 15<sup>th</sup> Multiconference on Control Problems. St. Petersburg, 2022, pp. 146–148. (in Russian)
- Belousov F.A., Nevolin I.V., Khachatryan N.K. Modeling and optimization of plans for railway freight transport performed by a transport operator. *Business Informatics*, 2020, vol. 14, no. 2, pp. 21– 35. (in Russian). https://doi.org/10.17323/2587-814X.2020.2.21.35

#### Authors

Nikolai V. Kolesov — D.Sc., Professor, Chief Researcher, Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, 197046, Российская Федерация, вс 6602000556, https://orcid.org/0000-0003-3287-7504, kolesovnv@mail.ru

Elisaveta G. Litunenko — Junior Researcher, Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, SC 57796319900, https://orcid.org/0000-0001-5280-0593, lisa.litunenko@ gmail.com

Marina V. Tolmacheva — PhD, Senior Researcher, Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, Sc 16305525100, https://orcid.org/0000-0003-0795-7617, marina-tolm@ yandex.ru

Viktor S. Tiulnikov — Software Engineer, Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, https://orcid.org/0009-0005-5414-1567, viktor.tyulnikov@gmail.com

Received 07.11.2025 Approved after reviewing 25.12.2025 Accepted 26.01.2025



Работа доступна по лицензии Creative Commons «Attribution-NonCommercial» **I/İTMO** 

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ январь-февраль 2025 Том 25 № 1 http://ntv.ifmo.ru/ SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS January–February 2025 Vol. 25 No 1 http://ntv.ifmo.ru/en/ ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-114-127

## Enhancing and extending CatBoost for accurate detection and classification of DoS and DDoS attack subtypes in network traffic Abdulkader Hajjouz<sup>1⊠</sup>, Elena Yu. Avksentieva<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

<sup>1</sup> hajjouz@itmo.ru⊠, https://orcid.org/0000-0002-8256-6790

<sup>2</sup> eavksenteva@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0001-5000-4868

#### Abstract

In the ever changing digital world, the rise of sophisticated cyber threats, especially DoS and DDoS attacks, is a big challenge to Information Security. This paper addresses the problem of classifying malicious from benign network traffic using CatBoost classifier, a machine learning algorithm optimized for categorical data and imbalanced datasets. We used CIC-IDS2017 and CSE-CIC-IDS2018 datasets which simulate various cyberattack scenarios, our research optimized CatBoost to identify specific subtypes of DoS and DDoS attacks including Hulk, SlowHTTPTest, GoldenEye, Slowloris, HOIC, LOIC-UDP-HTTP, LOIT. The methodology involved data preparation, feature selection and model configuration, normalizing outliers, correcting negative values, and refining dataset structures. Stratified sampling ensured a balanced representation of classes in training, validation, and testing sets. The CatBoost model performed well with overall accuracy of 0.999922, high precision, recall, and F1-scores across all categories, and it can process over 3.4 million samples per second. These results show the model is robust and reliable for real-time intrusion detection. By classifying specific attack types, our model improves the precision of the Intrusion Detection Systems (IDS) and allows for targeted response to different threats. The big gain in detection accuracy solves the problem of imbalanced datasets and the need for granular attack types detection. Use CatBoost in advanced Information Security frameworks for critical infrastructure, cloud services, and enterprise networks to defend against digital threats. This paper provides a fast, accurate and scalable solution for network IDS and shows the importance of custom machine learning models in Information Security. Future work should explore CatBoost on more datasets and integrate it with other machine learning techniques to improve robustness and detection.

#### Keywords

information security, network intrusion detection, DoS attacks, DDoS attacks, machine learning, real-time detection, feature selection, model optimization

**For citation:** Hajjouz A., Avksentieva E.Yu. Enhancing and extending CatBoost for accurate detection and classification of DoS and DDoS attack subtypes in network traffic. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 1, pp. 114–127. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-114-127

УДК 004.492.3

## Улучшение и расширение CatBoost для точного обнаружения и классификации подтипов DoS и DDoS атак в сетевом трафике Абдулкадер Хажжуз<sup>1⊠</sup>, Елена Юрьевна Авксентьева<sup>2</sup>

1,2 Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

<sup>1</sup> hajjouz@itmo.ru<sup>\overline</sup>, https://orcid.org/0000-0002-8256-6790

<sup>2</sup> eavksenteva@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0001-5000-4868

#### Аннотация

В постоянно меняющемся цифровом мире рост сложных киберугроз, особенно атак DoS (отказ в обслуживании) и DDoS (распределенный отказ в обслуживании), представляет собой серьезную проблему для информационной безопасности. В работе рассматривается задача классификации вредоносного и безопасного сетевого трафика с

© Hajjouz A., Avksentieva E.Yu., 2025

использованием применением классификатора CatBoost — алгоритма машинного обучения, оптимизированного для категориальных данных и несбалансированных наборов данных. Использованы наборы данных СІС-IDS2017 и CSE-CIC-IDS2018, которые имитируют различные сценарии кибератак. оптимизация классификатора CatBoost для распознавания конкретных подтипов атак DoS и DDoS, включая Hulk, SlowHTTPTest, GoldenEye, Slowloris, HOIC, LOIC-UDP-HTTP, LOIT. Разработана методика работы CatBoost для подготовки данных, отбора признаков и настройки модели, нормализации выбросов, корректировки отрицательных значений и улучшения структуры наборов данных. Стратифицированная выборка обеспечила сбалансированное представление классов в обучающих, валидационных и тестовых наборах. Разработанная модель CatBoost продемонстрировала отличные результаты с общей точностью 0,999922, высокой полнотой и значениями F1-меры по всем категориям и способностью обрабатывать более 3,4 млн образцов в секунду. Эти результаты показывают, что модель является надежной и подходит для обнаружения вторжений в реальном времени. Классификация конкретных типов атак улучшает точность системы обнаружения вторжений (Intrusion Detection Systems, IDS) и позволяет целенаправленно реагировать на различные угрозы. Существенное повышение точности обнаружения решает проблему несбалансированных наборов данных и необходимость детектирования различных типов атак. CatBoost рекомендуется к использованию в передовых рамках информационной безопасности для критической инфраструктуры, облачных сервисов и корпоративных сетей для защиты от цифровых угроз. Данная работа предлагает быстрое, точное и масштабируемое решение для сетевой IDS и подчеркивает важность использования кастомизированных моделей машинного обучения в информационной безопасности. В дальнейшем предполагается изучить применение CatBoost на большем количестве наборов данных и его интеграцию с другими методами машинного обучения для повышения устойчивости и точности обнаружения.

#### Ключевые слова

информационная безопасность, обнаружение сетевых вторжений, атаки DoS, атаки DDoS, машинное обучение, обнаружение в реальном времени, отбор признаков, оптимизация модели

Ссылка для цитирования: Хажжуз А., Авксентьева Е.Ю. Улучшение и расширение CatBoost для точного обнаружения и классификации подтипов DoS и DDoS атак в сетевом трафике // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 1. С. 114–127 (на англ. яз.). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-114-127

#### Introduction

In today's connected world DoS (Denial of Service) and DDoS (Distributed Denial of Service) attacks are a big threat to information security [1-5]. The frequency and complexity of these attacks are increasing, and it's hard to differentiate between malicious and normal traffic. This is further complicated by data imbalance where normal traffic is much more than attack instances, making it difficult to detect and requiring robust solutions [1, 6, 7].

Research has proposed approaches using machine learning and deep learning. To summarize the recent approaches, Table 1 below is a comparison of various studies, including the datasets used, the methodologies applied, key findings, and the challenges faced. The table uses three popular datasets to test network intrusion detection systems. KDD CUP from 1999 is a well known benchmark dataset to develop and compare intrusion detection models. CSE-CIC-IDS from 2018 is more recent and larger dataset of network attacks. CIS-IDS is an additional dataset for research purpose in intrusion detection. These datasets are used to evaluate and validate different intrusion detection methods.

While many significant ones have made a lot of progress in combating DDoS attacks in recent years, existing methods fail because of imbalanced network traffic datasets and the difficulty in processing categorical data [1]. In various research and review papers, there's a lot of focus on a general approach to detect DoS and DDoS attacks rather than classifying specific types of

| References | Dataset Used                     | Approach                                     | Key Findings   | Challenges   |
|------------|----------------------------------|--|--|--|
| [8]        | KDD CUP 1999,<br>CSE-CIC-IDS2018 | CNN with image-<br>based (RGB and grayscale) | CNN outperformed RNN in DoS detection; better performance on simpler datasets like KDD compared to CSE-CIC-IDS2018 | Lower performance on complex<br>datasets; requires careful tuning<br>of hyperparameters (image type,<br>kernel size, number of layers) |
| [9]        | CIC-IDS2017                      | CNN, LSTM                                    | Shows potential in intrusion detection using deep learning   | Real-time deployment challenges  |
| [10]       | CIC-IDS2017                      | Agent-based                                  | automatic feature extraction and selection, High accuracy achieved   | High computational resource utilization  |
| [11]       | CIC-IDS2017                      | XGBoost                                      | Effective for DoS/DDoS detection   | Limited detection range, real-time detectability   |
| [12]       | CIC-IDS2017                      | Deep Belief Network                          | Deep learning shows promise in cyber threat detection  | Imbalanced datasets, categorical data handling   |

| Table 1. | Comparison | of | approaches | in | literature | review |
|----------|------------|----|------------|----|------------|--------|
|          | 1          |    | 11         |    |            |        |

NOTE. CNN — Convolutional Neural Network, LSTM — Long Short-Term Memory

attacks. This general approach misses the nuances and details of DoS and DDoS, hindering the development of countermeasures. According to Cloudflare's Q3 2024 report<sup>1</sup>, DDoS attacks were up 49 % from last quarter with almost 6 million attacks, financial services was the most targeted and China was the most affected region. Gcore's H1 2024 report<sup>2</sup> showed 46 % increase in DDoS attacks compared to 2023, with 445,000 attacks in Q2 alone and the largest attack was 1.7 terabits per second. StormWall's analysis showed 102 % year-over-year increase in DDoS incidents, 29 % of which were targeted at government infrastructure — a 116 % increase in this sector — mostly due to election-related motives<sup>3</sup>. So we need more sophisticated detection and mitigation for these threats.

In our previous work [1], we optimized the CatBoost classifier for DoS and DDoS attack detection in network traffic and got significant improvements in detection accuracy and performance. However that work was general attack classification without considering different attack subtypes. Since each subtype of DoS and DDoS attacks exploits different vulnerabilities and requires different mitigation strategies [13–20], we realized the need to extend our work. To address these limitations and improve the effectiveness of intrusion detection systems, this paper builds upon our previous work [1] by introducing an improved methodology that uses the strengths of the CatBoost classifier to detect and classify specific attack subtypes - Hulk, SlowHTTPTest, GoldenEye, Slowloris (DoS) and HOIC, LOIC-UDP-HTTP, LOIT (DDoS). While most of the existing research is focused on general DoS and DDoS attack detection without considering specific subtypes, our approach addresses this gap by using the varied and extensive scenarios in CIC-IDS2017 and CSE-CIC-IDS2018 datasets [21, 22] to enhance the accuracy and performance of intrusion detection systems so they can respond to specific threats better. The code for this work is available on GitHub<sup>4</sup>.

Detecting these subtypes is important because different attack subtypes require different mitigation strategies. For example, the Slowloris attack [13, 14], which targets web servers by keeping connections open, requires different defenses than the Hulk attack [15] which floods the network with a high volume of requests. Similarly the SlowHTTPTest attack<sup>5</sup> which sends incomplete HTTP requests to exhaust server resources requires different mitigation than the GoldenEye attack [16] which also floods the server with HTTP requests but in a different pattern. The High Orbit Ion Cannon (HOIC) attack<sup>6</sup> which floods the network with high volume HTTP requests requires rate limiting and IP blocking whereas the Low Orbit Ion Cannon (LOIC) attacks [17] which can use both UDP (User Datagram Protocol) and HTTP floods requires different filtering rules for each protocol. Moreover the LOIT (Low Orbit Ion Torrent) attack [18] which uses different methods to overwhelm network resources requires advanced traffic analysis and dynamic defense mechanisms to counter its multi-faceted attack vectors.

By tuning the CatBoost classifier to detect these specific attack types, our model allows intrusion detection systems to respond to specific threats more effectively. Initial results show a big improvement in detection accuracy setting a new benchmark for real-time intrusion detection. This paper describes our full methodology from data analysis and feature selection to model tuning and evaluation. We have made a big progress in dealing with imbalanced and complex datasets of cyber threats. Our results provide a scalable, accurate, and efficient way to strengthen Information Security against evolving digital threats, the demand for which is critical and growing.

## Overview of DoS and DDoS attack subtypes in the dataset

We used the CIC-IDS2017 and CSE-CIC-IDS2018 datasets created by the Canadian Institute for Information Security and the Communications Security Establishment (CSE). These datasets simulate different cyberattack scenarios and have benign and malicious network traffic to develop strong intrusion detection systems [1].

CIC-IDS2017 is a one week simulation of different attacks like DoS and DDoS attacks. CSE-CIC-IDS2018 has more advanced Cyber threats with more kinds of attacks and also has 79 features of different aspects of network traffic<sup>7</sup>, so we can classify each kind of network activity more in detail [1, 19, 20].

This will help us to distinguish between malicious and benign traffic. Table 2 shows the instance counts for each class in the datasets.

| Class                     | Number of Instances<br>CIC-IDS2017 +<br>+ CSE-CIC-IDS2018 |
|---------------------------|---|
| Benign                    | 9,713,988   |
| DoS attacks-Hulk          | 692,985   |
| DDoS attack-HOIC          | 686,012   |
| DDoS attack-LOIC-UDP-HTTP | 577,921   |
| DoS attacks-SlowHTTPTest  | 145,389   |
| DDdoS LOIT                | 128,027   |
| DoS attacks-GoldenEye     | 51,801  |
| DoS attacks-Slowloris     | 16,786  |
|                           |   |

Table 2. Distribution of Instances by Attack Type in CIC-IDS2017 and CSE-CIC-IDS2018

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Available at: https://radar.cloudflare.com/reports/ddos-2024-q3 (accessed: 10.10.2024).

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Available at: https://gcore.com/blog/radar-q1-q2-2024insights (accessed: 14.10.2024).

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Available at: https://stormwall.network/ddos-report-h1-2024 (accessed: 12.10.2024).

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Available at: https://github.com/abdulkaderhajjouz/DDoS-DoS-Attack-Detection (accessed: 12.11.2024).

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Available at: https://github.com/shekyan/slowhttptest (accessed: 01.03.2024).

<sup>6</sup> Available at: https://sourceforge.net/projects/ highorbitioncannon/ (accessed: 05.03.2024).

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Canadian Institute for Cybersecurity. A Realistic Cyber Defense Dataset (CSE-CIC-IDS2018). 2018. Retrieved from https://registry.opendata.aws/cse-cic-ids2018/

These datasets and features we use to build a strong and effective intrusion detection model capable of identifying specific network anomalies, thus enhancing cybersecurity.

## Data cleaning and processing for selected attack subtypes

To get more accurate results from our intrusion detection, we added a data preparation process to ensure data integrity and addressed three key issues: first, we normalized outliers [21] to prevent extreme values from skewing the analysis and preserve the core data for modeling; second, we corrected negative values [22] and averaged them to keep consistency and differentiate between good and bad network behavior; third, we restructured the dataset to keep everything organized and formatted for proper classification of network activities. These are important for better detection and to make our intrusion detection more reliable and trustworthy [1].

#### Feature engineering for specific attack subtypes

When it comes to cyber intrusion detection, feature selection is key point [23]. The model can be more accurate, faster, and more interpretable when we identify the right features [24, 25]. There are several steps of careful filtering to narrow down the dataset to the best features. This filtering reduces the computational load and simplifies the model and makes it more robust and interpretable [26, 27].

Following the methodology in [1] we refined the dataset by removing non-contributory attributes, eliminating constant features, examining feature relationships, visualizing and clustering features and finally consolidating clusters to select the most informative ones. The final 32 features selected are shown in Table 3.

After applying these steps, we provide the Spearman Correlation Heatmap for the final set of features illustrating their relationships. However, due to the complexity and detail of the heatmap, it has been made available as a supplementary resource<sup>1</sup>.

Diagonal cells are perfect self-correlation with 1, off diagonal cells are correlation between different features. No strong correlation (near 1 or -1) means redundant features have been removed. Most are moderate or weak so each feature gives unique and independent information, makes computation more efficient, and reduces overfitting in the model [28].

#### Stratified sampling of DoS/DDoS subtypes

In our study involving extensive analysis, we have employed stratified sampling to partition the overall dataset into three subsets, namely, train (80 %), validation (10 %),

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Hajjouz Abdulkader, Avksentieva Elena. Spearman Correlation Heatmaps After Feature Selection // Mendeley Data. 2024. V1. https://data.mendeley.com/datasets/hxd7gmrvth/1, doi: 10.17632/hxd7gmrvth.1

| Selected Features | Description   | Selected Features | Description  |
|-------------------|---|-------------------|--|
| dst_port          | Destination port receiving the data                       | Protocol          | Protocol used (e.g., TCP, UDP)                     |
| fwd_iat_min       | Minimum inter-arrival time for forward packets            | bwd_iat_min       | Minimum inter-arrival time for backward packets    |
| flow_duration     | Total duration of the flow/session                        | fwd_psh_flags     | Number of PUSH flags in forward direction          |
| fin_flag_cnt      | Count of FIN flags in the flow                            | bwd_pkts_s        | Backward packets per second                        |
| tot_bwd_pkts      | Total packets forwarded from destination to source        | tot_fwd_pkts      | Total packets forwarded from source to destination |
| totlen_fwd_pkts   | Total length of all forward packets                       | rst_flag_cnt      | Count of RST flags in the flow                     |
| totlen_bwd_pkts   | Total length of all backward packets                      | active_std        | Standard deviation of active state duration        |
| urg_flag_cnt      | Count of URG flags in the flow                            | ack_flag_cnt      | Count of ACK flags in the flow                     |
| fwd_pkt_len_std   | Standard deviation of forward packet length               | fwd_pkt_len_mean  | Mean packet length in the forward direction        |
| bwd_pkt_len_mean  | Mean packet length in the backward direction              | down_up_ratio     | Ratio of download to upload bytes                  |
| bwd_pkt_len_std   | Standard deviation of backward packet length              | init_fwd_win_byts | Initial TCP window size in the forward direction   |
| flow_byts_s       | Bytes per second in the flow                              | flow_pkts_s       | Packets per second in the flow                     |
| init_bwd_win_byts | Initial TCP window size in the backward direction         | fwd_seg_size_min  | Minimum size of segments in the forward direction  |
| flow_iat_std      | Standard deviation of inter-arrival times between packets | active_mean       | Mean duration of active state of the flow          |
| flow_iat_min      | Minimum inter-arrival time between packets                | fwd_iat_tot       | Total inter-arrival time for forward packets       |
| psh_flag_cnt      | Count of PUSH flags in the flow                           | idle_mean         | Mean duration of idle state of the flow            |

Table 3. List of Selected Features

| Class                     | Set     |            |         |  |  |
|---------------------------|---------|------------|---------|--|--|
| Class                     | Train   | Validation | Test    |  |  |
| Benign                    | 777,119 | 971,399    | 971,399 |  |  |
| DoS attacks-Hulk          | 554,388 | 69,299     | 69,298  |  |  |
| DDoS attack-HOIC          | 548,809 | 68,602     | 68,601  |  |  |
| DDoS attack-LOIC-UDP-HTTP | 462,337 | 57,792     | 57,792  |  |  |
| DoS attacks-SlowHTTPTest  | 116,311 | 14,539     | 14,539  |  |  |
| DDoS LOIT                 | 102,422 | 12,802     | 12,803  |  |  |
| DoS attacks-GoldenEye     | 41,441  | 5,180      | 5,180   |  |  |
| DoS attacks-Slowloris     | 13,429  | 1,678      | 1,679   |  |  |

Table 4. Network Traffic Class Distribution Across Training, Validation, and Testing Sets

and test (10 %), which are denoted in Table 4. We selected this sampling approach in order to maintain the same proportional ratios in these data subsets [1], as stratified sampling contains a component of balanced allocation:

$$n_k = (N \times N_k) / N_{tot},$$

where  $n_k$  represents the sample size allocated to each class k within a given subset, N is the total number of samples in that subset,  $N_k$  indicates the total number of samples for class k across the dataset, and  $N_{tot}$  is the total number of samples in the dataset.

Stratified sampling was used to ensure each class is represented proportionally across the training, validation, and test sets. This is important for our study as it allows the model to be trained and tested on data that reflects the overall class distribution [29], including less common attack subtypes like DoS Slowloris and DDoS LOIT. By keeping the class distribution consistent, we avoid bias towards majority classes and don't introduce artificial noise by oversampling or undersampling. This also allows for more accurate metrics like precision, recall, and F1-score for each attack subtype [30].

#### **Understanding CatBoost**

CatBoost is a library based on Gradient Boosting specifically designed to work with categorical and complex data [31], so it's perfect for applications that require high accuracy and speed, like cyber threat detection and imbalanced data classification. It uses "Ordered Boosting" which trains trees in a specific order to prevent overfitting and reduce bias [32]. CatBoost also uses "Ordered Statistics" to process categorical data directly without need for traditional complex encoding, so it reduces computational cost and preserves data accuracy [33, 34].

CatBoost training process starts by processing categorical features with ordered statistics, then applies ordered boosting in multiple stages of "weak learners". Class weights are adjusted at each stage to handle imbalanced data. At each step errors from previous stage are corrected and finally the "strong learner" is produced which gives the final prediction. This structure gives high accuracy and speed so CatBoost is perfect for applications that require top performance and speed in data analysis [32–34]. CatBoost outperforms other gradient boosting libraries like XGBoost and LightGBM in terms of prediction quality and speed, and also has native support for both numerical and categorical features [32]. It also has builtin visualization tools to understand model performance and interpret results, fast training with multiple GPUs and distributed training via Apache Spark and Command-Line Interface which makes training fast and reproducible [33, 34]. Although it requires significant resources for large and complex datasets, experiments have shown that CatBoost outperforms others across different data types [33], so it's the best choice for classifying DoS and DDoS attack subtypes in this research.

#### Model configuration, training, and validation

When we are doing machine learning for cybersecurity, especially for network intrusion detection, the model configuration and training are everything [1]. We chose to use the CatBoostClassifier, a decision tree based ensemble model, because it performs well with categorical data and imbalanced datasets, which is important for detecting specific attack subtypes [33–35].

We assigned specific class weights to each attack type to address the data imbalance in our dataset. The weights for each class were calculated using:

Weight for each class = (Total number of samples) / (Number of samples in the class).

For example, the weights were: {'Benign': 1.2367, 'DDoS LOIT': 93.8307, 'DDoS attack-HOIC': 17.5112, 'DDoS attack-LOIC-UDP-HTTP': 20.7864, 'DoS attacks-GoldenEye': 231.9038, 'DoS attacks-Hulk': 17.3350, 'DoS attacks-SlowHTTPTest': 82.6261, 'DoS attacks-Slowloris': 715.6398}. These were set using the class\_weights parameter in the CatBoost algorithm which gives more importance to the less frequent classes, not increasing the overall accuracy of the model but making it more sensitive to the rare and critical attacks. Results showed that using class\_weights reduced the number of instances where attacks were misclassified as "Benign" (false negatives) and thus made the model more able to detect rare attack patterns. This is important in cybersecurity where reducing false negatives is key to responding to critical threats [35].

The key parameters for the model were: 1330 iterations to balance learning and computation, 0.1 learning rate to prevent overfitting, 6 depths to capture the complex patterns, MultiClass loss function for multi-class classification, trained on a GPU with random seed 42 for reproducibility. Other parameters were: L2 leaf regularization of 4 to balance accuracy and speed; border count of 512 to balance speed and accuracy; early stopping rounds of 250 to prevent overfitting by stopping training when no improvement was seen. Total F1-score was used as the evaluation metric suitable for imbalanced data and gives a balanced measure of the model ability to detect each attack subtype.

During training, the model was evaluated on a separate validation set with early stopping based on Total F1-score to prevent overfitting and get the best performance. In this way we could monitor the model ability to detect each subtype across iterations and make sure no subtype is compromised. Our hyperparameter tuning showed that CatBoost can handle complex imbalanced data. The best Total F1-score was 0.99979 at iteration 835, so the model is very good at detecting the subtypes in our dataset.

By using stratified sampling and fine tuning the model we built an intrusion detection model that can detect multiple types of network intrusions. We focused on specific DoS and DDoS attack subtypes, so the model can detect more specific and give tailored response to each type of attack. Our results show that model configuration and training matter in Information Security.

#### **Result analysis and discussion**

Confusion matrices are used to measure the performance of machine learning algorithms [36] for network intrusion detection systems. Matrices are important to measure system classification skill for types of network activity, such as Benign traffic, DoS attacks-Hulk, DdoS attacks-HOIC, DdoS attacks-LOIC-UDP-HTTP, DoS attacks-SlowHTTPTest, DdoS LOIT, DoS attacks-GoldenEye, DoS attacks-Slowloris showed as in Fig. 1.

Using the confusion matrix as in Fig. 1 we get important metrics to evaluate each class in our network intrusion detection [1]:

 $\begin{aligned} Accuracy &= ((TP + TN) / (TP + FP + FN + TN)) \times 100 \% \\ Precision &= TP / (FP + TP) \\ Recall &= TP / (FN + TP) \\ F1\text{-score} &= 2 \times (Precision \times Recall) / (Precision + Recall) \\ FAR &= FP/(FP + TN) \end{aligned}$ 

- Accuracy: This is the percentage of true cases (true positives and true negatives) out of total cases.
   Accuracy doesn't give more info but just tells us how often the model is right.
- Precision: Precision is true positives out of total positive predictions made by the model. Precision tells us how well the model is in distinguishing useful positives from non-informative false positives.
- Recall: Also known as sensitivity, Recall shows how well the model finds all actual positives, i.e., how many true positives out of all actual positives which means how well the model did in finding the presence of a positive.
- F1-score: F1-score is the average of Precision and Recall. F1-score is good for overall model, especially when class distribution is not equal.
- False Alarm Rate (FAR): FAR measures how often the system generates false alerts when there is no threat. Lower FAR means the system is better in avoiding false positives and filtering out false alerts.

The CatBoost classifier performance on the test set is impressive with an overall accuracy of 0.999922. It can clearly differentiate between benign traffic, DDoS and DoS attacks as shown by high precision, recall, and F1-scores across all categories. As we can see from Table 5, the model has near perfect F1-scores 0.999955 for Benign traffic, 0.999688 for DdoS LOIT and 0.999978 for DdoS attack-HOIC and many others. This shows that the model is robust and reliable in classifying different types of network traffic, a great tool to enhance Information Security. This is very important in imbalanced classes where the consequences of false prediction are big. The support column in Table 5 indicates the number of actual instances for each class in the test data, which helps provide context for the precision, recall, and F1-scores calculated for each category. The high scores across all attack types means minimal false positives and false negatives, the model is useful in maintaining strong Information Security defenses.

Fig. 2, *a*, shows the Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve and Fig. 2, *b*, shows the Precision-Recall curve for the CatBoost model which is for multi-class classification of benign, DDoS, DoS traffic in a network intrusion detection system. The ROC Curve shows macro-average Area Under the Curve (AUC) of 1.00 which means the model is performing ideally and also means AUC

| Class                     | Precision | Recall   | F1-score | Support |
|---------------------------|-----------|----------|----------|---------|
| Benign                    | 0.999999  | 0.999911 | 0.999955 | 971,399 |
| DDOS LOIT                 | 0.999454  | 0.999922 | 0.999688 | 12,803  |
| DDOS attack-HOIC          | 0.999956  | 1.000000 | 0.999978 | 68,601  |
| DDOS attack-LOIC-UDP-HTTP | 0.999792  | 1.000000 | 0.999896 | 57,792  |
| DoS attacks-GoldenEye     | 0.997688  | 0.999807 | 0.998747 | 5,180   |
| DoS attacks-Hulk          | 0.999423  | 0.999971 | 0.999697 | 69,298  |
| DoS attacks-SlowHTTPTest  | 0.999656  | 0.999862 | 0.999759 | 14,539  |
| DoS attacks-Slowloris     | 0.991721  | 0.998809 | 0.995252 | 1,679   |

Table 5. Performance metrics of CatBoost classifier on test data

NOTE: Overall Accuracy — 0.999922, False Alarm Rate — 0.000374.

Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2025, том 25, № 1 Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2025, vol. 25, no 1



Fig. 1. Confusion Matrix of Predictions by CatBoost classifier on test set

values of the model across all traffic types. The model is balanced as verified by the Precision-Recall curves, shown in Fig. 2, *b*, which demonstrates almost ideal Average

Precision (AP), indicating excellent precision and recall scores for class classification. All results show the model capabilities and stability in identifying multiple types of



Fig. 2. ROC Curve (a) and Precision-Recall Curve (b) for CatBoost classifier

Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2025, том 25, № 1 Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2025, vol. 25, no 1

| Class                     | MCC      |
|---------------------------|----------|
| Benign                    | 0.999766 |
| DoS attacks-Hulk          | 0.999684 |
| DDoS attack-HOIC          | 0.999977 |
| DDoS attack-LOIC-UDP-HTTP | 0.999891 |
| DoS attacks-SlowHTTPTest  | 0.998742 |
| DDoS LOIT                 | 0.999679 |
| DoS attacks-GoldenEye     | 0.999756 |
| DoS attacks-Slowloris     | 0.995252 |

Table 6. Matthews correlation coefficient scores for CatBoost classifier

network intrusion and it can be used to advance some aspects of Information Security.

The Matthews Correlation Coefficient (MCC) scores in Table 6 show our classifier is doing great in multi-class classification of Benign, DDoS and DoS traffic. MCC is very useful in imbalanced datasets [37] and our model scores are high, which means precision and correlation between predicted and actual labels is good. This defines how reliable and accurate our model is and can be deployed in real world network intrusion detection.

We looked at our results and found the top parameters to the model. The top parameters are flow\_iat\_min (Minimum Flow Interarrival Time), fwd\_seg\_size\_min (Minimum Forward Segment Size), and fwd\_pkt\_len\_mean (Mean Forward Packet Length) as they contributed the most to network intrusion prediction. Fig. 3 represents feature importance and displays the ranking of features based on their overall impact on the model. The SHAP (SHapley Additive exPlanations) value summary allows us to see the effect of a parameter on the model predictions across all classes. The SHAP values show the importance of parameters on the classes of interest, for example, dst\_port, fwd\_seg\_size\_min, and init\_fwd\_win\_byts (Initial Forward Window Bytes) have high SHAP values across multiple classes in Fig. 4.

SHAP value and feature importance show us the important features and how much they contribute to the model, so we can see how the model is making decisions and how reliable it is for network intrusion detection [38–40].

Fig. 5 shows the CatBoost classifier performance on our dataset, classifying network traffic into Benign, DoS (Hulk, SlowHTTPTest, GoldenEye, Slowloris) and DDoS (HOIC, LOIC-UDP-HTTP, LOIT) categories. Using a dataset of 12,012,909 samples, the classifier ran 100 iterations on hardware with an RTX 3080 GPU, Intel Core i7 13700k CPU, and 32 GB of DDR5 RAM [1], with an average of 3,408,673.13 samples per second. The consistent speed across iterations shows the classifier is stable and works well for real-time intrusion detection systems.



Fig. 3. Feature importance for analyzing feature impact



*Fig. 4.* SHAP value summary for analyzing feature impact where benign situation corresponds class 0, DDoS LOIT corresponds class 1, DDoS attack-HOIC corresponds class 2, DDoS attack-LOIC-UDP-HTTP corresponds class 3, DoS attacks-GoldenEye corresponds class 4, DoS attacks-Hulk corresponds class 5, DoS attacks-SlowHTTPTest corresponds class 6, and DoS attacks-SlowITTPTest corresponds class 6, and DoS attacks-SlowITTPTest corresponds class 7





Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2025, том 25, № 1 Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2025, vol. 25, no 1



accuracy Precision Recall 1-Score

Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2025, том 25, № 1 Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2025, vol. 25, no 1

| Fold | Accuracy | Precision | Recall   | F1-score | ROC AUC  |
|------|----------|-----------|----------|----------|----------|
| 1    | 0.994072 | 0.994826  | 0.994072 | 0.994283 | 0.999915 |
| 2    | 0.992342 | 0.993351  | 0.992342 | 0.99262  | 0.999929 |
| 3    | 0.989641 | 0.991059  | 0.989641 | 0.990012 | 0.999912 |
| 4    | 0.994425 | 0.995107  | 0.994425 | 0.994621 | 0.999938 |
| 5    | 0.995427 | 0.996099  | 0.995427 | 0.995633 | 0.999974 |
| 6    | 0.996599 | 0.99703   | 0.996599 | 0.996726 | 0.999989 |
| 7    | 0.995264 | 0.99594   | 0.995264 | 0.995468 | 0.999963 |
| 8    | 0.994993 | 0.995512  | 0.994993 | 0.995139 | 0.999949 |
| 9    | 0.998675 | 0.998701  | 0.998675 | 0.998681 | 0.999999 |
| 10   | 0.989773 | 0.991204  | 0.989773 | 0.990149 | 0.999884 |

Table 7. Accuracy and performance metrics over 10-fold cross-validation

The cross-validation results [41, 42] for the CatBoost model in Table 7 show good performance across 10 folds. The model gets near perfect scores for all metrics, accuracy, precision, recall, and F1-score. However there are some small variations in some folds, especially in accuracy and recall where it dips below 0.99 in folds 3 and 10. This might be due to not applying stratified sampling during cross-validation which can lead to imbalanced distribution of attack and normal instances across the folds. But the ROC AUC scores are consistently close to 1.0, which shows the model is very good at discrimination. These results show the robustness and reliability of the CatBoost classifier for network intrusion detection.

We used CatBoost on combined CIC-IDS2017 and CSE-CIC-IDS2018 datasets and got very good results in network intrusion detection. Unlike previous methods which only identified benign, DoS, and DDoS traffic without identifying subtypes, our model can identify these variations. With a very low False Alarm Rate of 0.000374 it reduced false positives. As shown in Fig. 6, other models like DBN, SVM, RF and XGBoost [8–12] performed good results but none of them performed overall precision and reliability of CatBoost.

We also re-divided the data into 70 % for training, 15 % for validation, and 15 % for testing. The results remained stable and consistent with previous outcomes, even without using class weights, although there was a slight increase in the number of attacks misclassified as "Benign". This confirms that our model configuration is robust and effective without signs of overfitting.

These results show CatBoost is ready for real-world Information Security use cases. Consistency across all metrics means our model and approach is working. CatBoost is effective in various network intrusion detection tasks including classifying different types of attacks so it's ready for use.

#### Conclusion

In summary, our work advances network intrusion detection by using the CatBoost classifier to tackle imbalanced datasets and categorical data. The main results show CatBoost performance in identifying various network traffic types including specific subtypes of DoS and DDoS attacks. The classifier had an overall accuracy of 0.999922 with near perfect precision, recall, and F1-score across all traffic categories. It can distinguish between benign traffic and multiple attack types, so we can have tailored and effective mitigation strategies. A feature selection process refined the dataset to the top 32 features and class weights addressed the imbalance in the dataset. Also the model is very fast, so it's suitable for real-time intrusion detection. CatBoost performance proves it can be used to enhance network intrusion detection systems and respond to Information Security threats in time. Future work should be done on CatBoost with more diverse and changing datasets and combining it with other Machine Learning techniques like anomaly detection to detect new types of attacks. Expanding the dataset and hybrid approaches will make the model more robust and adaptable to dynamic environments. Practical applications are building advanced Information Security frameworks for critical infrastructure, cloud services, and enterprise networks to defend against emerging digital threats. Our work provides a scalable, accurate, and efficient solution to Information Security, to fill the need for better intrusion detection and to lay the ground for future work on securing digital environments from evolving cyber threats.

#### References

#### Hajjouz A., Avksentieva E.Y. An approach to configuring CatBoost for advanced detection of DoS and DDoS attacks in network traffic. *Vestnik* of Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer science and informatics, 2024, vol. 2024, no. 3, pp. 64–74. https://doi.org/10.24143/2072-9502-2024-3-65-74

2. Zhou L., Zhu Y., Zong T, Xiang Y. A feature selection-based method for DDoS attack flow classification. *Future Generation Computer* 

Литература

- Hajjouz A., Avksentieva E.Y. An approach to configuring CatBoost for advanced detection of DoS and DDoS attacks in network traffic // Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer science and informatics. 2024. V. 2024. N 3. P. 64–74. https://doi.org/10.24143/2072-9502-2024-3-65-74
- Zhou L., Zhu Y., Zong T, Xiang Y. A feature selection-based method for DDoS attack flow classification // Future Generation Computer

Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2025, том 25, № 1 Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2025, vol. 25, no 1 Systems, 2022, vol. 132, pp. 67–79. https://doi.org/10.1016/j. future.2022.02.006

- Eliyan L.F., Di Pietro R. DoS and DDoS attacks in Software Defined Networks: A survey of existing solutions and research challenges. *Future Generation Computer Systems*, 2021, vol. 122, pp. 149–171. https://doi.org/10.1016/j.future.2021.03.011
- Ignatev N.A., Tursunmurotov D.X. Censoring training samples using regularization of connectivity relations of class objects. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 2, pp. 322–329. (in Russian). https://doi. org/10.17586/2226-1494-2024-24-2-322-329
- Alhijawi B., Almajali S., Elgala H., Salameh H.B., Ayyash M. A survey on DoS/DDoS mitigation techniques in SDNs: Classification, comparison, solutions, testing tools and datasets. *Computers and Electrical Engineering*, 2022, vol. 99, pp. 107706. https://doi. org/10.1016/j.compeleceng.2022.107706
- Li Y., Liu Q. A comprehensive review study of cyber-attacks and cyber security; Emerging trends and recent developments. *Energy Reports*, 2021, vol. 7, pp. 8176–8186. https://doi.org/10.1016/j. egyr.2021.08.126
- Karatas G., Demir O., Sahingoz O.K. Increasing the performance of machine learning-based IDSs on an imbalanced and up-to-date dataset. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 32150–32162. https://doi. org/10.1109/ACCESS.2020.2973219
- Kim J., Kim J., Kim H., Shim M., Choi E. CNN-based network intrusion detection against denial-of-service attacks. Electronics, 2020, vol. 9, no. 6, pp. 916. https://doi.org/10.3390/ electronics9060916
- Dora V.R.S., Lakshmi V.N. Optimal feature selection with CNNfeature learning for DDoS attack detection using meta-heuristic-based LSTM. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, 2022, vol. 6, no. 2, pp. 323–349. https://doi.org/10.1007/s41315-022-00224-4
- Abu Bakar R., Huang X., Javed M.S., Hussain S., Majeed M.F. An intelligent agent-based detection system for DDoS attacks using automatic feature extraction and selection. *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 6, pp. 3333. https://doi.org/10.3390/s23063333
- Farhat S., Abdelkader M., Meddeb-Makhlouf A., Zarai F. Evaluation of DoS/DDoS Attack Detection with ML Techniques on CIC-IDS2017 Dataset. Proc. of the 9<sup>th</sup> International Conference on Information Systems Security and Privacy ICISSP, 2023, vol. 1, pp. 287–295. https://doi.org/10.5220/0011605700003405
- Manimurugan S., Al-Mutairi S., Aborokbah M.M., Chilamkurti N., Ganesan S., Patan R. Effective attack detection in internet of medical things smart environment using a deep belief neural network. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 77396–77404. https://doi.org/10.1109/ ACCESS.2020.2986013
- Rios V.D.M., Inácio P.R., Magoni D., Freire M.M. Detection and mitigation of low-rate denial-of-service attacks: A survey. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 76648–76668. https://doi.org/10.1109/ ACCESS.2022.3191430
- Faria V.D.S., Gonçalves J.A., Silva C.A.M.D., Vieira G.D.B., Mascarenhas D.M. SDToW: a slowloris detecting tool for WMNs. *Information*, 2020, vol. 11, no. 12. pp. 544. https://doi.org/10.3390/ info11120544
- Mahjabin S. Implementation of DoS and DDoS attacks on cloud servers. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 2018, vol. 6, no. 2, pp. 148–158. https://doi.org/10.21533/pen.v6i2.170
- Kshirsagar D., Kumar S. An ontology approach for proactive detection of HTTP flood DoS attack. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 2023, vol. 14, suppl. 3, pp. 840–847. https://doi.org/10.1007/s13198-021-01170-3
- Cai Y.X., Chen S.C., Wang C.C. An Implementation of feature selection for detecting LOIC-based DDoS attack. *Proc. of the International Conference on Consumer Electronics — Taiwan (ICCE-Taiwan)*, 2023, pp. 607–608. https://doi.org/10.1109/ICCE-Taiwan58799.2023.10226733
- Nayyar S., Arora S., Singh M. Recurrent neural network based intrusion detection system. *Proc. of the International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*, 2020, pp. 136–140. https://doi.org/10.1109/ICCSP48568.2020.9182099
- Hajjouz A., Avksentieva E. Evaluating the effectiveness of the CatBoost classifier in distinguishing benign traffic, FTP BruteForce and SSH BruteForce traffic. *Proc. of the 9<sup>th</sup> International Conference* on Signal and Image Processing (ICSIP), 2024, pp. 351–358. https:// doi.org/10.1109/ICSIP61881.2024.10671552

Systems. 2022. V. 132. P. 67-79. https://doi.org/10.1016/j. future.2022.02.006

- Eliyan L.F., Di Pietro R. DoS and DDoS attacks in Software Defined Networks: A survey of existing solutions and research challenges // Future Generation Computer Systems. 2021. V. 122. P. 149–171. https://doi.org/10.1016/j.future.2021.03.011
- Игнатьев Н.А., Турсунмуротов Д.Х. Цензурирование обучающих выборок с использованием регуляризации отношений связанности объектов классов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24. № 2. С. 322–329. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2024-24-2-322-329
- Alhijawi B., Almajali S., Elgala H., Salameh H.B., Ayyash M. A survey on DoS/DDoS mitigation techniques in SDNs: Classification, comparison, solutions, testing tools and datasets // Computers and Electrical Engineering. 2022. V. 99. P. 107706. https://doi. org/10.1016/j.compeleceng.2022.107706
- Li Y., Liu Q. A comprehensive review study of cyber-attacks and cyber security; Emerging trends and recent developments // Energy Reports. 2021. V. 7. P. 8176–8186. https://doi.org/10.1016/j. egyr.2021.08.126
- Karatas G., Demir O., Sahingoz O.K. Increasing the performance of machine learning-based IDSs on an imbalanced and up-to-date dataset // IEEE Access. 2020. V. 8. P. 32150–32162. https://doi. org/10.1109/ACCESS.2020.2973219
- Kim J., Kim J., Kim H., Shim M., Choi E. CNN-based network intrusion detection against denial-of-service attacks // Electronics. 2020. V. 9. N 6. P. 916. https://doi.org/10.3390/electronics9060916
- Dora V.R.S., Lakshmi V.N. Optimal feature selection with CNNfeature learning for DDoS attack detection using meta-heuristic-based LSTM // International Journal of Intelligent Robotics and Applications. 2022. V. 6. N 2. P. 323–349. https://doi.org/10.1007/ s41315-022-00224-4
- Abu Bakar R., Huang X., Javed M.S., Hussain S., Majeed M.F. An intelligent agent-based detection system for DDoS attacks using automatic feature extraction and selection // Sensors. 2023. V. 23. N 6. P. 3333. https://doi.org/10.3390/s23063333
- Farhat S., Abdelkader M., Meddeb-Makhlouf A., Zarai F. Evaluation of DoS/DDoS Attack Detection with ML Techniques on CIC-IDS2017 Dataset // Proc. of the 9th International Conference on Information Systems Security and Privacy ICISSP. 2023. V. 1. P. 287– 295. https://doi.org/10.5220/0011605700003405
- Manimurugan S., Al-Mutairi S., Aborokbah M.M., Chilamkurti N., Ganesan S., Patan R. Effective attack detection in internet of medical things smart environment using a deep belief neural network // IEEE Access. 2020. V. 8. P. 77396–77404. https://doi.org/10.1109/ ACCESS.2020.2986013
- Rios V.D.M., Inácio P.R., Magoni D., Freire M.M. Detection and mitigation of low-rate denial-of-service attacks: A survey // IEEE Access. 2022. V. 10. P. 76648–76668. https://doi.org/10.1109/ ACCESS.2022.3191430
- Faria V.D.S., Gonçalves J.A., Silva C.A.M.D., Vieira G.D.B., Mascarenhas D.M. SDToW: a slowloris detecting tool for WMNs // Information, 2020. V. 11. N 12. P. 544. https://doi.org/10.3390/ info11120544
- Mahjabin S. Implementation of DoS and DDoS attacks on cloud servers // Periodicals of Engineering and Natural Sciences. 2018. V. 6. N 2. P. 148–158. https://doi.org/10.21533/pen.v6i2.170
- Kshirsagar D., Kumar S. An ontology approach for proactive detection of HTTP flood DoS attack // International Journal of System Assurance Engineering and Management. 2023. V. 14. Suppl. 3. P. 840–847. https://doi.org/10.1007/s13198-021-01170-3
- Cai Y.X., Chen S.C., Wang C.C. An Implementation of feature selection for detecting LOIC-based DDoS attack // Proc. of the International Conference on Consumer Electronics — Taiwan (ICCE-Taiwan). 2023. P. 607–608. https://doi.org/10.1109/ICCE-Taiwan58799.2023.10226733
- Nayyar S., Arora S., Singh M. Recurrent neural network based intrusion detection system // Proc. of the International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP). 2020. P. 136–140. https://doi.org/10.1109/ICCSP48568.2020.9182099
- Hajjouz A., Avksentieva E. Evaluating the effectiveness of the CatBoost classifier in distinguishing benign traffic, FTP BruteForce and SSH BruteForce traffic // Proc. of the 9<sup>th</sup> International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP). 2024. P. 351–358. https:// doi.org/10.1109/ICSIP61881.2024.10671552

- Sharafaldin I., Lashkari A.H., Ghorbani A.A. Toward generating a new intrusion detection dataset and intrusion traffic characterization. *Proc. of the 4<sup>th</sup> International Conference on Information Systems Security and Privacy (ICISSP)*, 2018, vol. 1, pp. 108–116. https://doi. org/10.5220/0006639801080116
- Cabello-Solorzano K., Ortigosa de Araujo I., Peña M., Correia, L., Tallón-Ballesteros A.J., The impact of data normalization on the accuracy of machine learning algorithms: a comparative analysis. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2023, vol. 750, pp. 344–353. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42536-3\_33
- Oleghe O. A predictive noise correction methodology for manufacturing process datasets. *Journal of Big Data*, 2020, vol. 7, no. 1, pp. 89. https://doi.org/10.1186/s40537-020-00367-w
- Umar M.A., Chen Z., Shuaib K., Liu Y. Effects of feature selection and normalization on network intrusion detection. *Data Science and Management*, 2025, vol. 8, no. 1, pp. 23–39. https://doi.org/10.1016/j. dsm.2024.08.001
- Chandrashekar G., Sahin F. A survey on feature selection methods. *Computers & Electrical Engineering*, 2014, vol. 40, no. 1, pp. 16–28. https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2013.11.024
- Palo H.K., Sahoo S., Subudhi A.K. Dimensionality reduction techniques: Principles, benefits, and limitations. *Data Analytics in Bioinformatics: A Machine Learning Perspective*, 2021, pp. 79–107. https://doi.org/10.1002/9781119785620.ch4
- Dunn J., Mingardi L., Zhuo Y.D. Comparing interpretability and explainability for feature selection. *arXiv*, 2021, arXiv:2105.05328. https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.05328
- Li J., Cheng K., Wang S., Morstatter F., Trevino R.P., Tang J., Liu H. Feature selection: A data perspective. *ACM computing surveys*, 2017, vol. 50, no. 6, pp. 1–45. https://doi.org/10.1145/3136625
- Kathiravan P., Shanmugavadivu P., Saranya R. Mitigating imbalanced data in online social networks using Stratified K-Means Sampling. *Proc. of the 8<sup>th</sup> International Conference on Business and Industrial Research (ICBIR)*, 2023, pp. 883–888. https://doi.org/10.1109/ ICBIR57571.2023.10147677
- Qi J., Ko T.W., Wood B.C., Pham T.A., Ong S.P. Robust training of machine learning interatomic potentials with dimensionality reduction and stratified sampling. *npj Computational Materials*, 2024, vol. 10, no. 1, pp. 43. https://doi.org/10.1038/s41524-024-01227-4
- Siblini W., Fréry J., He-Guelton L., Oblé F., Wang Y.Q. Master your metrics with calibration. *Lecture Notes in Computer Science*, 2020, vol. 12080, pp. 457–469. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44584-3\_36
- Salakhutdinova K.I., Lebedev I.S., Krivtsova I.E. Gradient boosting trees method in the task of software identification. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 6, pp. 1016–1022. (in Russian). https://doi. org/10.17586/2226-1494-2018-18-6-1016-1022
- Prokhorenkova L., Gusev G., Vorobev A., Dorogush A. V., Gulin A. CatBoost: unbiased boosting with categorical features. *Proc. of the Advances in neural information processing systems 31 (NeurIPS* 2018). 2018.
- Dorogush A.V., Gulin A., Gusev G., Kazeev N., Prokhorenkova L.O., Vorobev A. 2017. Fighting biases with dynamic boosting. arXiv, 2017, arXiv:1706.09516. https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.09516
- Dorogush A.V., Ershov V., Gulin A. CatBoost: gradient boosting with categorical features support. *arXiv*, 2018, arXiv:1810.11363. https:// doi.org/10.48550/arXiv.1810.11363
- 35. Ami A.S., Moran K., Poshyvanyk D., Nadkarni A. «False negativethat one is going to kill you»: Understanding Industry Perspectives of Static Analysis based Security Testing. *Proc. of the IEEE Symposium on Security and Privacy (SP)*, 2024, pp. 3979–3997. https://doi.org/10.1109/SP54263.2024.00019
- Heydarian M., Doyle T.E., Samavi R., MLCM: Multi-label confusion matrix. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 19083–19095. https://doi. org/10.1109/ACCESS.2022.3151048
- Chicco D., Jurman G. The advantages of the Matthews correlation coefficient (MCC) over F1 score and accuracy in binary classification evaluation. *BMC genomics*. 2020, vol. 21, no. 1, pp. 1–13. https://doi. org/10.1186/s12864-019-6413-7
- Bowen D., Ungar L. Generalized SHAP: Generating multiple types of explanations in machine learning. *arXiv*, 2020, arXiv:2006.07155. https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.07155
- 39. Lee Y.G., Oh J.Y., Kim D., Kim G. SHAP value-based feature importance analysis for short-term load forecasting. *Journal of*

- Sharafaldin I., Lashkari A.H., Ghorbani A.A. Toward generating a new intrusion detection dataset and intrusion traffic characterization // Proc. of the 4<sup>th</sup> International Conference on Information Systems Security and Privacy (ICISSP). 2018. V. 1. P. 108–116. https://doi. org/10.5220/0006639801080116
- Cabello-Solorzano K., Ortigosa de Araujo I., Peña M., Correia, L., Tallón-Ballesteros A.J., The impact of data normalization on the accuracy of machine learning algorithms: a comparative analysis // Lecture Notes in Networks and Systems. 2023. V. 750. P. 344–353. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42536-3\_33
- Oleghe O. A predictive noise correction methodology for manufacturing process datasets // Journal of Big Data. 2020. V. 7. N 1. P. 89. https://doi.org/10.1186/s40537-020-00367-w
- Umar M.A., Chen Z., Shuaib K., Liu Y. Effects of feature selection and normalization on network intrusion detection // Data Science and Management. 2025. V. 8. N 1. P. 23–39. https://doi.org/10.1016/j. dsm.2024.08.001
- Chandrashekar G., Sahin F. A survey on feature selection methods // Computers & electrical engineering. 2014. V. 40. N 1. P. 16–28. https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2013.11.024
- Palo H.K., Sahoo S., Subudhi A.K. Dimensionality reduction techniques: Principles, benefits, and limitations // Data Analytics in Bioinformatics: A Machine Learning Perspective. 2021. P. 79–107. https://doi.org/10.1002/9781119785620.ch4
- Dunn J., Mingardi L., Zhuo Y.D. Comparing interpretability and explainability for feature selection // arXiv. 2021. arXiv:2105.05328. https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.05328
- Li J., Cheng K., Wang S., Morstatter F., Trevino R.P., Tang J., Liu H. Feature selection: A data perspective // ACM computing surveys. 2017. V. 50. N 6. P. 1–45. https://doi.org/10.1145/3136625
- Kathiravan P., Shanmugavadivu P., Saranya R. Mitigating imbalanced data in online social networks using Stratified K-Means Sampling // Proc. of the 8th International Conference on Business and Industrial Research (ICBIR). 2023. P. 883–888. https://doi.org/10.1109/ ICBIR57571.2023.10147677
- Qi J., Ko T.W., Wood B.C., Pham T.A., Ong S.P. Robust training of machine learning interatomic potentials with dimensionality reduction and stratified sampling // npj Computational Materials. 2024. V. 10. N 1. P. 43. https://doi.org/10.1038/s41524-024-01227-4
- Siblini W., Fréry J., He-Guelton L., Oblé F., Wang Y.Q. Master your metrics with calibration // Lecture Notes in Computer Science. 2020. V. 12080. P. 457–469. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44584-3\_36
- 31. Салахутдинова К.И., Лебедев И.С., Кривцова И.Е. Алгоритм градиентного бустинга деревьев решений в задаче идентификации программного обеспечения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 6. С. 1016–1022. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2018-18-6-1016-1022
- Prokhorenkova L., Gusev G., Vorobev A., Dorogush A. V., Gulin A. CatBoost: unbiased boosting with categorical features // Proc. of the Advances in neural information processing systems 31 (NeurIPS 2018). 2018.
- Dorogush A.V., Gulin A., Gusev G., Kazeev N., Prokhorenkova L.O., Vorobev A. 2017. Fighting biases with dynamic boosting // arXiv. 2017. arXiv:1706.09516. https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.09516
- Dorogush A.V., Ershov V., Gulin A. CatBoost: gradient boosting with categorical features support // arXiv. 2018. arXiv:1810.11363. https:// doi.org/10.48550/arXiv.1810.11363
- 35. Ami A.S., Moran K., Poshyvanyk D., Nadkarni A. «False negativethat one is going to kill you»: Understanding Industry Perspectives of Static Analysis based Security Testing // Proc. of the IEEE Symposium on Security and Privacy (SP). 2024. P. 3979–3997. https://doi.org/10.1109/SP54263.2024.00019
- Heydarian M., Doyle T.E., Samavi R., MLCM: Multi-label confusion matrix // IEEE Access. 2022. V. 10. P. 19083–19095. https://doi. org/10.1109/ACCESS.2022.3151048
- Chicco D., Jurman G. The advantages of the Matthews correlation coefficient (MCC) over F1 score and accuracy in binary classification evaluation // BMC genomics. 2020. V. 21. N 1. P. 1–13. https://doi. org/10.1186/s12864-019-6413-7
- Bowen D., Ungar L. Generalized SHAP: Generating multiple types of explanations in machine learning // arXiv. 2020. arXiv:2006.07155. https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.07155
- 39. Lee Y.G., Oh J.Y., Kim D., Kim G. SHAP value-based feature importance analysis for short-term load forecasting // Journal of

*Electrical Engineering & Technology*, 2023, vol. 18, no. 1, pp. 579–588. https://doi.org/10.1007/s42835-022-01161-9

- Hamilton R.I., Papadopoulos P.N. Using SHAP values and machine learning to understand trends in the transient stability limit. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, vol. 39, no. 1, pp. 1384–1397. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2023.3248941
- Berrar D. Cross-validation. Encyclopedia of Bioinformatics and Computational Biology, 2019, vol.1, pp. 542–545. https://doi. org/10.1016/B978-0-12-809633-8.20349-X
- Tougui I., Jilbab A., El Mhamdi J. Impact of the choice of crossvalidation techniques on the results of machine learning-based diagnostic applications. *Healthcare informatics research*, 2021, vol. 27, no. 3, pp. 189–199. https://doi.org/10.4258/hir.2021.27.3.189

#### Authors

Abdulkader Hajjouz — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, sc 59362756700, https://orcid. org/0000-0002-8256-6790, hajjouz@itmo.ru

Elena Yu. Avksentieva — PhD (Education Science), Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, sc 57190830859, https://orcid.org/0000-0001-5000-4868, eavksenteva@itmo.ru

Received 28.07.2024 Approved after reviewing 27.12.2024 Accepted 25.01.2025 Electrical Engineering & Technology. 2023. V. 18. N 1. P. 579–588. https://doi.org/10.1007/s42835-022-01161-9

- Hamilton R.I., Papadopoulos P.N. Using SHAP values and machine learning to understand trends in the transient stability limit // IEEE Transactions on Power Systems. 2023. V. 39. N 1. P. 1384–1397. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2023.3248941
- Berrar D. Cross-validation // Encyclopedia of Bioinformatics and Computational Biology. 2019. V. 1. P. 542–545. https://doi. org/10.1016/B978-0-12-809633-8.20349-X
- Tougui I., Jilbab A., El Mhamdi J. Impact of the choice of crossvalidation techniques on the results of machine learning-based diagnostic applications // Healthcare informatics research. 2021. V. 27. N 3. P. 189–199. https://doi.org/10.4258/hir.2021.27.3.189

#### Авторы

Хажжуз Абдулкадер — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, sc 59362756700, https:// orcid.org/0000-0002-8256-6790, hajjouz@itmo.ru

Авксентьева Елена Юрьевна — кандидат педагогических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, sc 57190830859, https://orcid.org/0000-0001-5000-4868, eavksenteva@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 28.07.2024 Одобрена после рецензирования 27.12.2024 Принята к печати 25.01.2025



Работа доступна по лицензии Creative Commons «Attribution-NonCommercial» **I/İTMO** 

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ январь-февраль 2025 Том 25 № 1 http://ntv.ifmo.ru/ SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS January-February 2025 Vol. 25 No 1 http://ntv.ifmo.ru/en/ ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-128-139

## Detection of L<sub>0</sub>-optimized attacks via anomaly scores distribution analysis Dmitry A. Esipov<sup>1⊠</sup>, Mark I. Basov<sup>2</sup>, Alyona D. Kletenkova<sup>3</sup>

1,2,3 ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

<sup>1</sup> some1else.d.ma@gmail.com<sup>\Box</sup>, https://orcid.org/0000-0003-4467-5117

<sup>2</sup> basovmark@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-0844-6881

<sup>3</sup> alyonka8855@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-8148-6764

#### Abstract

The spread of artificial intelligence and machine learning is accompanied by an increase in the number of vulnerabilities and threats in systems implementing such technologies. Attacks based on malicious perturbations pose a significant threat to such systems. Various solutions have been developed to protect against them, including an approach to detecting  $L_0$ optimized attacks on neural image processing networks using statistical analysis methods and an algorithm for detecting such attacks by threshold clipping. The disadvantage of the threshold clipping algorithm is the need to determine the value of the parameter (cutoff threshold) to detect various attacks and take into account the specifics of the data sets, which makes it difficult to apply in practice. This article describes a method for detecting  $L_0$ -optimized attacks on neural image processing networks through statistical analysis of the distribution of anomaly scores. To identify the distortion inherent in L<sub>0</sub>-optimized attacks, deviations from the nearest neighbors and Mahalanobis distances are determined. Based on their values, a matrix of pixel anomaly scores is calculated. It is assumed that the statistical distribution of pixel anomaly scores is different for attacked and non-attacked images and for perturbations embedded in various attacks. In this case, attacks can be detected by analyzing the statistical characteristics of the distribution of anomaly scores. The obtained characteristics are used as predictors for training anomaly detection and image classification models. The method was tested on the CIFAR-10, MNIST and ImageNet datasets. The developed method demonstrated the high quality of attack detection and classification. On the CIFAR-10 dataset, the accuracy of detecting attacks (anomalies) was 98.43 %, while the binary and multiclass classifications were 99.51 % and 99.07 %, respectively. Despite the fact that the accuracy of anomaly detection is lower than that of a multiclass classification, the method allows it to be used to distinguish fundamentally similar attacks that are not contained in the training sample. Only input data is used to detect and classify attacks, as a result of which the proposed method can potentially be used regardless of the architecture of the model or the presence of the target neural network. The method can be applied for detecting images distorted by  $L_0$ -optimized attacks in a training sample.

#### Keywords

artificial neural network, image processing, adversarial attack, attack detection, pseudonorm  $L_0$ , malicious perturbation, statistical analysis, anomaly score

**For citation:** Esipov D.A., Basov M.I., Kletenkova A.D. Detection of  $L_0$ -optimized attacks via anomaly scores distribution analysis. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 1, pp. 128–139. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-128-139

#### УДК 004.056

# Обнаружение неконвенциональных пиксельных атак посредством статистического анализа распределения оценок аномальности

## Дмитрий Андреевич Есипов<sup>1</sup><sup>∞</sup>, Марк Игоревич Басов<sup>2</sup>, Алёна Дмитриевна Клетенкова<sup>3</sup>

1,2,3 Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

<sup>1</sup> some1else.d.ma@gmail.com<sup>\Box</sup>, https://orcid.org/0000-0003-4467-5117

<sup>2</sup> basovmark@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-0844-6881

<sup>3</sup> alyonka8855@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-8148-6764

© Esipov D.A., Basov M.I., Kletenkova A.D., 2025

#### Аннотация

Введение. Распространение искусственного интеллекта и методов машинного обучения сопровождается увеличением количества уязвимостей и угроз в системах, реализующих подобные технологии. Значительную опасность для таких систем представляют атаки на основе вредоносных возмущений. Для защиты от них разработаны различные решения, к числу которых относятся подход к обнаружению неконвенциональной пиксельной атаки на нейронные сети обработки изображений методами статистического анализа и алгоритм обнаружения таких атак посредством отсечения по порогу. Недостатком алгоритма отсечения по порогу является необходимость определения значения параметра (порога отсечения) для обнаружения различных атак и учета специфики наборов данных, что затрудняет его применение на практике. В работе изложен метод обнаружения неконвенциональных пиксельных атак на нейронные сети обработки изображений посредством статистического анализа распределения оценок аномальности. Метод. Для выявления искажения, свойственного неконвенциональным пиксельным атакам, определяются отклонения от ближайших соседей и расстояния Махаланобиса. По их значениям вычисляется матрица оценок аномальности пикселов изображения. Предполагается, что статистическое распределение оценок аномальности пикселов различно для атакованных и неатакованных изображений и для возмущений, встраиваемых при различных атаках. В этом случае атаки могут быть обнаружены посредством анализа статистических характеристик распределения оценок аномальности. Полученные характеристики используются в качестве предикторов для обучения моделей обнаружения аномалий и классификации изображений. Основные результаты. Апробация метода выполнена на наборах данных CIFAR-10, MNIST и ImageNet. Разработанный метод продемонстрировал высокое качество обнаружения и классификации атак. На наборе данных CIFAR-10 точность (accuracy) обнаружения атак (аномалий) составила 98,43 %, а бинарной и многоклассовой классификаций — 99,51 % и 99,07 % соответственно. Обсуждение. Несмотря на то, что точность обнаружения аномалий ниже аналогичного показателя многоклассовой классификации, предложенный метод позволяет успешно применять его для распознавания принципиально схожих атак, не содержащихся в обучающей выборке. Для обнаружения и классификации атак используются только входные данные, в результате чего предложенный метод потенциально может быть использован независимо от архитектуры модели или наличия целевой нейронной сети. Метод может быть рекомендован для обнаружения изображений, искаженных неконвенциональными пиксельными атаками в обучающей выборке.

#### Ключевые слова

искусственная нейронная сеть, обработка изображений, состязательная атака, обнаружение атак, вредоносное возмущение, псевдонорма возмущения  $L_0$ , статистический анализ, оценка аномальности

Ссылка для цитирования: Есипов Д.А., Басов М.И., Клетенкова А.Д. Обнаружение неконвенциональных пиксельных атак посредством статистического анализа распределения оценок аномальности // Научнотехнический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 1. С. 128–139 (на англ. яз.). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-128-139

## Introduction

According to previous work [1, 2], high efficiency in solving various applied tasks has led to an increase in the spread of Machine Learning (ML) and Artificial Intelligence (AI). However, along with the growing popularity of AI and ML, the number of vulnerabilities and threats in systems implementing these technologies has also increased.

Due to the urgency of model evasion and backdoor, ML model threats through these attacks based on malicious perturbations, various approaches and methods have been developed [2, 3–7]. In previous work [2], an approach was proposed to detect  $L_0$ -optimized attacks on neural networks of image processing using statistical analysis methods, and a detection method was developed based on the approach. This method leads to the following disadvantages: different values of the cutoff threshold for different attacks, the need to classify attacks in order to detect perturbations. The elimination of indications is possible by analyzing the statistical distribution of the obtained pixel estimates of anomalies and their characteristics.

#### **Proposed method**

The main idea. The proposed method is based on the assumption that the pixel anomaly scores matrices obtained from the preprocessing stage [2] have different frequency

distributions for attacked [8–10] and clean (non-attacked) images. Then the task of detecting and classifying images can be shifted to the task of classifying distributions.

Examples of obtained pixel anomaly scores matrices [2] frequency distribution graphs for different classes of images are shown in Fig. 1.

According to Fig. 1, frequency distributions of clean and attacked images are similar, but have the following differences:

- One-pixel attack is characterized by the presence of a single value corresponding to a perturbed pixel significantly exceeding the rest;
- multi-pixel attacks (Jacobian Saliency Map Attack, JSMA; Localized and Visible Adversarial Noise, LaVAN) are characterized by a set of values that are out of the distribution characteristic of a clean image. Then it is possible to detect and classify an attack based
- on the difference in distributions.

**Considered statistical characteristics.** The difference in distributions can be identified as a difference in their statistical characteristics. The list of considered statistical characteristics is given in Table 1.

Along with the known statistical characteristics, outliers beyond  $5\sigma$ , outliers beyond  $7\sigma$ , outliers beyond 3 interquantile range, outliers beyond 6 interquantile range were introduced and considered.

**Anomaly detection.** The detection of attacks can be performed as the detection of deviations of the listed



Fig. 1. Frequency distribution graphs: clean image (a); One-pixel attack (b); JSMA (c)

statistical characteristics from the values inherent in clean images (anomaly detection). Various types of unsupervised ML algorithms have been considered, including Support Vector Machine (SVM), density-based and tensor-based methods. SVM includes two unsupervised ML algorithms: One-Class Support Vector Machine (OCSVM) [11, 12] and Support Vector Data Description (SVDD) [11, 13]. Since SVDD calculates a hypersphere that includes norm objects (points), it can be attributed to tensor-based methods.

| Name                                   | Abbreviation<br>in the text | Description  |
|--|-----------------------------|--|
| Mean, µ                                | mean                        | The arithmetic mean of obtained values                                   |
| Median                                 | median                      | A value that divides an ordered list of values into two equal parts      |
| Max                                    | max                         | The maximum value in the image   |
| Range                                  | range                       | The difference between the maximum and minimum values                    |
| Variance                               | var                         | A measure of the spread of values relative to the mean                   |
| Standard deviation, $\sigma$           | std                         | The square root of the variance  |
| 25th quantile                          | 25q                         | The value below which 25 % of the data is located                        |
| 75th quantile                          | 75q                         | The value below which 75 % of the data is located                        |
| 95th quantile                          | 95q                         | The value below which 95 % of the data is located                        |
| 97th quantile                          | 97q                         | The value below which 97 % of the data is located                        |
| 99th quantile                          | 99q                         | The value below which 99 % of the data is located                        |
| Interquantile range                    | iqr                         | The difference between the 75th and 25th quantiles                       |
| Coefficient of variation, $c_v$        | cv                          | The ratio of the standard deviation to the mean                          |
| Outliers beyond 3 <sub>5</sub>         | 3sigma_cnt                  | The number of values exceeding 3 standard deviations from the mean       |
| Outliers beyond $5\sigma$              | 5sigma_cnt                  | The number of values exceeding 5 standard deviations from the mean       |
| Outliers beyond $7\sigma$              | 7sigma_cnt                  | The number of values exceeding 7 standard deviations from the mean       |
| Outliers beyond 3 interquantile ranges | 3iqr_cnt                    | The number of values beyond 3 interquantile ranges from the 75q          |
| Outliers beyond 6 interquantile ranges | 6iqr_cnt                    | The number of values beyond 6 interquantile ranges from the 75q          |
| Skewness                               | skew                        | A measure of the asymmetry of the data distribution relative to its mean |
| Kurtosis                               | kurt                        | A measure of the severity of the peak of the data distribution           |

| <i>Table 1.</i> Considered statistical characteristic | Table 1. | 21. Considere | d statistical | l characteristic |
|---|----------|---------------|---------------|------------------|
|---|----------|---------------|---------------|------------------|

Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2025, том 25, № 1 Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2025, vol. 25, no 1 Following density-based ML algorithms were considered: *k*-Nearest Neighbors, Local Outlier Factor and Isolation Forest (IF). According to a comparative analysis of algorithms [14], the IF demonstrates higher efficiency when working with multidimensional data.

SVDD and Elliptic Envelope (EE) were considered from tensor-based ML algorithms [15–17]. Both algorithms are fundamentally similar, however, SVDD calculates a hypersphere, and EE calculates a multidimensional ellipsoid. However, the sphere is a special case of an ellipsoid, so EE was chosen.

Attack classification. For subsequent correction [2], the binary (single-pixel attack and JSMA) classification of detected attacks (anomalies) was also considered.

As an alternative, multiclass (clean, One-pixel attack and JSMA) image classification was also considered. In this case, anomaly detection is not required. The detection and classification of attacks are implemented by a single model. However, then it is possible to detect only those attacks that were present in the training sample of the model. Then it is impossible to detect attacks that are unknown at the time of training or missing from the sample.

The following ML algorithms are considered for model training: SVM [18] and Random Forest (RF) [19]. The selection of methods was performed similarly to the detection of anomalies. The Logistic Regression (LR) algorithm was also considered [20].

#### Design of the experiment

Attack algorithms. Three attack algorithms were chosen as  $L_0$ -optimized attacks: One-pixel attack [8], JSMA [9], and LaVAN [10].

**Datasets used.** Datasets from previous work were used to conduct the experiment [2]. In the current work, all the distorted images obtained were used.

The ImageNet<sup>1</sup> dataset was used to address the LaVAN attack. The publicly available part of the specified dataset contains 1,281,167 training, 50,000 validation and 100,000 test color images with an average size of  $469 \times 387$  pixels corresponding to 1000 classes. The images used are 299 × 299 pixels in size. The area of the malicious patch is a rectangle of random size, covering no more than 10 % of the pixels of the image. 14,636 perturbed and the same count of clean images used in experiment.

All the data obtained were used to train and evaluate the model. The sets of perturbated images used in further experiments are available on GitHub<sup>2</sup>.

**Evaluation metrics.** Because there is a class disbalance in the dataset being used, F1-score is selected as quality indicator of anomaly detection and binary classification. Accuracy was also calculated for comparison with analogues. For the multiclass classification, similar metrices were selected as quality indicators: macro F1-score and accuracy.

**Model development.** The Scikit-learn [21] library of the Python programming language was chosen for model training. The dataset used was divided as follows:

— training sample — 80 %;

— test sample — 20 %.

Program code, trained models, and calculation results are available on GitHub<sup>3</sup>.

#### **Results and analysis**

Selection of statistical characteristics. To assess the significance of statistical characteristics for model training, correlation matrices were constructed for the considered datasets. The calculation of the correlation matrix is possible through various methods [22–24]. According to the comparative analysis [25], Kendall's method was chosen. It is important to note that a low correlation between the parameters does not necessarily indicate independence between them. In this case dependence may be more complex.

ML models using various sets of predictors were trained and evaluated to assess the significance of statistical characteristics. This method was used for ambiguous situations:

- high correlation between parameters;

— low correlation with the target variable (flag).

Fig. 2 introduces a Kendall correlation matrix for the CIFAR-10 dataset. Correlation matrices for other considered datasets are available on GitHub<sup>3</sup>.

According to the correlation matrix (Fig. 2), there is a strong relationship between some parameters. Each group of parameters with a correlation coefficient 0.75 or greater was tested using model training and evaluation. Statistical characteristics with correlation coefficient less than 0.25 with flag were tested in the similar manner.

The final sets of statistical characteristics for each dataset are given in Table 2.

Max, range, cv, 7sigma\_cnt were selected for each dataset. At the same time, iqr, 3iqr\_cnt, 6iqr\_cnt were excluded for most datasets. All proposed characteristics demonstrated their significance and were chosen for at least one dataset.

The quality of anomaly detection and attack classification was tested using both the selected parameters and all the considered ones. Obtained quality indicators for both sets of statistical characteristics (selected and all) are available on GitHub<sup>3</sup>.

**Anomaly detection.** Models were trained for each dataset based on the selected anomaly detection algorithms. Confusion matrices for detecting anomalies are shown in Fig. 3. The highest quality indicators for each model are shown in Table 3.

According to Table 3, the highest quality indicators on each of the considered datasets, except CIFAR-10, correspond to the IF algorithm. For CIFAR-10, the highest

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> ImageNet. Available at: https://www.image-net.org/ index.php, free access (accessed: 03.03.2024). http:// arxiv.org/ abs/1711.04596 (accessed: 21.10.2024).

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> GitHub. iNDm3802 / L0-optimized\_attack\_detection. Available at: https://github.com/iNDm3802/L0-optimized\_attack\_detection, free access (accessed: 02.10.2024).

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> GitHub. iNDm3802 / L0-optimized\_attack\_detection\_method: https://github.com/iNDm3802/L0-optimized\_attack\_detection\_method, free access (accessed: 18.01.2024).

| mean -       | 1      | 0.26     | 0.37   | 0.37    | 0.62   | 0.62   | 0.39    | 0.17    | 0.69    | 0.71  | 0.63   | 0.41   | 0.2    | 0.24        | 0.31         | 0.19         | 0.26       | 0.35       | 0.088   | 0.066  | 0.64   |
|--------------|--------|----------|--------|---------|--------|--------|---------|---------|---------|-------|--------|--------|--------|-------------|--------------|--------------|------------|------------|---------|--------|--------|
| median -     | 0.26   | 1        | -0.036 | -0.036  | -0.014 | -0.014 | 0.7     | 0.76    | 0.16    | 0.085 | 0.0042 |        | -0.27  | -0.021      | -0.075       | -0.088       | -0.34      | -0.28      | -0.085  | -0.077 | 0.024  |
| max -        | 0.37   | -0.036   | 1      | 1       | 0.66   | 0.66   | 0.037   | -0.071  | 0.25    | 0.32  | 0.51   | 0.063  | 0.69   | -0.16       | 0.27         | 0.41         | 0.2        | 0.25       | 0.66    | 0.63   | 0.59   |
| range -      | 0.37   | -0.036   |        |         |        |        | 0.037   | -0.071  | 0.25    | 0.32  | 0.51   | 0.063  |        | -0.16       | 0.27         | 0.41         | 0.2        | 0.25       |         |        |        |
| var -        |        | -0.014   | 0.66   | 0.66    | 1      |        | 0.094   | -0.073  | 0.48    |       | 0.77   | 0.13   |        | 0.11        | 0.38         | 0.35         | 0.32       | 0.41       | 0.36    | 0.31   |        |
| std -        |        | -0.014   |        |         |        |        | 0.094   | -0.073  | 0.48    |       |        | 0.13   |        | 0.11        | 0.38         | 0.35         | 0.32       | 0.41       | 0.36    | 0.31   |        |
| 75q -        | 0.39   | 0.7      | 0.037  | 0.037   | 0.094  | 0.094  | 1       | 0.5     | 0.33    | 0.23  | 0.099  | 0.88   | -0.21  | 0.019       | -0.059       | -0.09        | -0.21      | -0.17      | -0.064  | -0.06  | 0.11   |
| 25q -        | 0.17   |          | -0.071 | -0.071  | -0.073 | -0.073 | 0.5     | 1       | 0.064   | 0.011 | -0.047 | 0.38   | -0.26  | -0.033      | -0.069       | -0.073       | -0.31      | -0.26      | -0.078  | -0.069 | -0.014 |
| 95q -        | 0.69   | 0.16     | 0.25   | 0.25    | 0.48   | 0.48   | 0.33    | 0.064   | 1       | 0.79  | 0.5    | 0.37   | 0.13   | 0.32        | 0.2          | 0.049        | 0.39       | 0.46       | -0.0062 | -0.022 | 0.48   |
| 97q -        |        | 0.085    | 0.32   | 0.32    |        |        | 0.23    | 0.011   | 0.79    |       | 0.64   | 0.26   | 0.25   | 0.39        | 0.32         | 0.14         | 0.41       | 0.51       | 0.043   | 0.015  |        |
| 99q -        |        | 0.0042   | 0.51   | 0.51    |        |        | 0.099   | -0.047  | 0.5     |       | 1      | 0.13   | 0.49   | 0.23        | 0.56         | 0.4          | 0.33       | 0.43       | 0.25    | 0.21   |        |
| iqr -        | 0.41   |          | 0.063  | 0.063   | 0.13   | 0.13   | 0.88    | 0.38    | 0.37    | 0.26  | 0.13   |        | -0.17  | 0.032       | -0.049       | -0.084       | -0.16      | -0.13      | -0.054  | -0.051 | 0.13   |
| cv -         | 0.2    | -0.27    |        |         |        |        | -0.21   | -0.26   | 0.13    | 0.25  | 0.49   | -0.17  | 1      | -0.088      | 0.39         | 0.49         | 0.3        | 0.34       |         |        |        |
| sigma_cnt -  | 0.24   | -0.021   | -0.16  | -0.16   | 0.11   | 0.11   | 0.019   | -0.033  | 0.32    | 0.39  | 0.23   | 0.032  | -0.088 | 1           | 0.22         | -0.15        | 0.27       | 0.33       | -0.39   | -0.43  | 0.087  |
| ōsigma_cnt - | 0.31   | -0.075   | 0.27   | 0.27    | 0.38   | 0.38   | -0.059  | -0.069  | 0.2     | 0.32  | 0.56   | -0.049 | 0.39   | 0.22        | 1            | 0.49         | 0.24       | 0.32       | 0.23    | 0.18   | 0.49   |
| 7sigma_cnt - | 0.19   | -0.088   | 0.41   | 0.41    | 0.35   | 0.35   | -0.09   | -0.073  | 0.049   | 0.14  | 0.4    | -0.084 | 0.49   | -0.15       | 0.49         | 1            | 0.13       | 0.17       | 0.51    | 0.49   | 0.52   |
| 3iqr_cnt -   | 0.26   | -0.34    | 0.2    | 0.2     | 0.32   | 0.32   | -0.21   | -0.31   | 0.39    | 0.41  | 0.33   | -0.16  | 0.3    | 0.27        | 0.24         | 0.13         |            | 0.79       | 0.096   | 0.071  | 0.35   |
| 6iqr_cnt -   | 0.35   | -0.28    | 0.25   | 0.25    | 0.41   | 0.41   | -0.17   | -0.26   | 0.46    | 0.51  | 0.43   | -0.13  | 0.34   | 0.33        | 0.32         | 0.17         | 0.79       | 1          | 0.11    | 0.075  | 0.45   |
| skew -       | 0.088  | -0.085   |        |         | 0.36   | 0.36   | -0.064  | -0.078  | -0.0062 | 0.043 | 0.25   | -0.054 |        | -0.39       | 0.23         | 0.51         | 0.096      | 0.11       |         | 0.93   | 0.46   |
| kurt -       | 0.066  | -0.077   |        |         | 0.31   | 0.31   | -0.06   | -0.069  | -0.022  | 0.015 | 0.21   | -0.051 |        | -0.43       | 0.18         | 0.49         | 0.071      | 0.075      | 0.93    | 1      | 0.41   |
| flag -       | 0.64   | 0.024    | 0.59   | 0.59    | 0.67   | 0.67   | 0.11    | -0.014  | 0.48    | 0.57  | 0.67   | 0.13   | 0.6    | 0.087       | 0.49         | 0.52         | 0.35       | 0.45       | 0.46    | 0.41   | 1      |
|              | mean - | - median | - max  | - range | var -  | std -  | - 75q - | - 25q - | - 95q - | - p7q | - b66  | iqr -  | S      | sigma_cnt - | 5sigma_cnt - | 7sigma_cnt - | 3iqr_cnt - | 6iqr_cnt - | skew    | kurt - | flag - |

Fig. 2. Kendall correlation matrix – CIFAR-10

quality indicators correspond to the OCSVM algorithm. The proposed method demonstrates an anomaly detection accuracy of 98.43 % and F1-score of 97.71 % for CIFAR-10. There is a decrease in the detection quality for contrast images (MNIST) due to the limitations of the approach used.

**Binary classification.** Binary classification models (One-pixel attack and JSMA) were trained for each dataset

Table 2. Selected statistical characteristics

| Dataset                  | CIFAR-10   | CIFAR-10-G  | MNIST   | ImageNet   |
|--------------------------|--|---|---|--|
| Selected characteristics | mean, max, rang, std,<br>75q, 95q, 99q, cv,<br>5sigma_cnt, 7sigma_cnt,<br>skew | median, max, range,<br>var, 25q, 95q, 99q, cv,<br>3sigma_cnt, 5sigma_cnt,<br>7sigma_cnt, kurt | mean, median, max,<br>range, var, std, 25q, 97q,<br>99q, iqr, cv, 3sigma_cnt,<br>7sigma_cnt, skew, kurt | mean, median, max,<br>range, var, std, 75q, 25q,<br>95q, 97q, 99q, iqr, cv,<br>3sigma, 5sigma, 7sigma,<br>3iqr, 6iqr, skew, kurt |

Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2025, том 25, № 1 Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2025, vol. 25, no 1



Fig. 3. Confusion matrices: CIFAR-10 (a); CIFAR-10-G (b); MNIST (c); ImageNet (d)

based on the selected algorithms. The confusion matrices of the binary classification are shown in Fig. 4. The highest quality indicators for each model are shown in Table 4.

According to Table 4, the highest quality indicators on each of the considered datasets correspond to the RF ML algorithm. The accuracy of the binary attack classification for the considered datasets varies from 95.31 % (MNIST) to 99.51 % (CIFAR-10), and the F1-score ranges from 97.27 % (MNIST) to 99.73 % (CIFAR-10). On each dataset the quality indicators, when using selected characteristics, are slightly less than when using all the parameters considered.

**Multiclass classification.** Multiclass classification models (clean, One-pixel attack and JSMA) were trained for each dataset based on the selected algorithms. The single-pixel attack is not relevant for ImageNet and is not represented in the sample for this dataset, so the specified dataset was not used for multiclass classification. The confusion matrices of the multiclass classification are shown in Fig. 5. The highest quality indicators for each model are given in Table 5.

According to Table 5, the highest quality indicators on each of the considered datasets correspond to the RF algorithm. There is a decrease in the classification quality for contrast images (MNIST) due to the limitations of the approach used.

**Performance evaluation.** The estimation of the computational complexity of calculation of statistical characteristics is O(n), where *n* corresponds to the number of pixels of the image taking into account the number of color channels, that is, its shape. Model forward propagation performance depends on the parameters of the model as well as on the ML algorithm. For performance evaluation, models with the highest quality indicators of anomaly detection or classification were used.

Calculations were performed on the following hardware:

- CPU: Intel(R) Core (TM) i7-10700 CPU @ 2.90GHz, 2904 MHz, cores: 8, logical processors: 16;
- RAM: 32.0 GB.

Performance evaluation of the proposed method is shown in Table 6.



**Predicted labels** 

0

Fig. 5. Multiclass classification confusion matrices: CIFAR-10 (a); CIFAR-10-G (b); MNIST (c)

**Predicted labels** 

0

Predicted labels

- 0

Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2025, том 25, № 1 Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2025, vol. 25, no 1

| Detect     | Algorithm         | Deremetera                            | Obtained quality indicators |             |  |  |
|------------|-------------------|---------------------------------------|-----------------------------|-------------|--|--|
| Dataset    | (characteristics) | Farameters                            | Accuracy, %                 | F1-score, % |  |  |
| CIFAR-10   | OCSVM (selected)  | nu=0.02<br>kernel= 'rbf'              | 98.43                       | 97.71       |  |  |
|            | IF (selected)     | n_estimators=10<br>random_state=3,802 | 95.44                       | 92.87       |  |  |
|            | EE (selected)     | random_state=3,802                    | 96.38                       | 94.43       |  |  |
| CIFAR-10-G | OCSVM (all)       | nu=0.14<br>kernel='rbf'               | 87.58                       | 78.79       |  |  |
|            | IF (selected)     | n_estimators=63<br>random_state=3,802 | 93.40                       | 87.83       |  |  |
|            | EE (all)          | random_state=3,802                    | 91.86                       | 85.57       |  |  |
| MNIST      | OCSVM (all)       | nu=0.05<br>kernel= 'rbf'              | 62.42                       | 73.86       |  |  |
|            | IF (selected)     | n_estimators=23<br>random_state=3,802 | 76.44                       | 80.48       |  |  |
|            | EE (selected)     | random_state=3,802                    | 62.71                       | 72.95       |  |  |
| ImageNet   | OCSVM (all)       | nu=0.01<br>kernel='rbf'               | 50.64                       | 66.72       |  |  |
|            | IF (all)          | n_estimators=25<br>random_state=3,802 | 88.48                       | 88.43       |  |  |
|            | EE (all)          | random_state=3,802                    | 85.62                       | 86.23       |  |  |

| T 1 1 2  | 0.114  | 1. 11      | C   | 1       | 1         |
|----------|--------|------------|-----|---------|-----------|
| Table 3. | Quanty | indicators | IOL | anomaly | detection |

According to Table 6, the method demonstrated attack detection speed from 0.19 to 65.51 images per second for ImageNet and MNIST, respectively, depending on their characteristics and parameters of a model. Similar patterns are observed for binary and multiclass classification.

## Discussion

A comparative analysis of the developed  $L_0$ -optimized attack detection method with previous method [2] is shown in Table 7.

| Deteast    | Algorithm         | Domenators  | Obtained quality indicators |             |  |  |
|------------|-------------------|---|-----------------------------|-------------|--|--|
| Dataset    | (characteristics) | Parameters  | Accuracy, %                 | F1-score, % |  |  |
| CIFAR-10   | SVM<br>(all)      | kernel='linear'   | 98.82                       | 99.35       |  |  |
|            | RF<br>(all)       | all: n_estimators=12  | 99.51                       | 99.73       |  |  |
|            | LR<br>(all)       | penalty='12',<br>solver=' 'newton- cholesky',<br>random_state=3,802 | 98.79                       | 99.33       |  |  |
| CIFAR-10-G | SVM<br>(all)      | kernel='linear'   | 98.40                       | 99.08       |  |  |
|            | RF<br>(all)       | n_estimators=69   | 99.23                       | 99.56       |  |  |
|            | LR<br>(all)       | penalty='12',<br>solver='liblinear',<br>random_state=3,802          | 98.20                       | 98.97       |  |  |
| MNIST      | SVM<br>(all)      | kernel='linear'   | 93.74                       | 96.36       |  |  |
|            | RF<br>(all)       | n_estimators=68   | 95.31                       | 97.27       |  |  |
|            | LR<br>(all)       | penalty='12',<br>solver='newton-cg',<br>random_state=3,802          | 93.25                       | 96.09       |  |  |

Table 4. Quality indicators for binary image classification

Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2025, том 25, № 1 Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2025, vol. 25, no 1

|            | Algorithm                                   |             | Obtained quality indicators |             |                      |  |  |
|------------|---|-------------|-----------------------------|-------------|----------------------|--|--|
| Dataset    | (characteristics)<br>[parameters]           | Image class | F1-score, %                 | Accuracy, % | Macro<br>F1-score, % |  |  |
|            | SVM   | Clean       | 98.78                       |             |                      |  |  |
|            | (all)                                       | One-pixel   | 90.84                       | 98.45       | 96.22                |  |  |
|            | [kernel='linear']                           | JSMA        | 99.05                       |             |                      |  |  |
|            | RF  | Clean       | 99.11                       |             |                      |  |  |
| CIFAR-10   | (all)                                       | One-pixel   | 93.74                       | 99.07       | 97.47                |  |  |
| CHIMC-10   | [n_estimators=56]                           | JSMA        | 99.58                       |             |                      |  |  |
|            | LR  | Clean       | 98.69                       |             |                      |  |  |
|            | (all)<br>[penalty='12',<br>solve="newtones" | One-pixel   | 90.50                       | 98.38       | 96.07                |  |  |
|            | random_state=3,802]                         | JSMA        | 99.01                       |             |                      |  |  |
|            | SVM   | Clean       | 91.19                       |             |                      |  |  |
|            | (all)                                       | One-pixel   | 88.61                       | 94.44       | 92.17                |  |  |
|            | [kernel='linear']                           | JSMA        | 96.72                       |             |                      |  |  |
|            | RF  | Clean       | 95.02                       |             |                      |  |  |
| CIEAP 10 G | (all)                                       | One-pixel   | 91.10                       | 97.02       | 94.95                |  |  |
| CITAR-10-0 | [n_estimators=96]                           | JSMA        | 98.72                       |             |                      |  |  |
|            | LR<br>(all)                                 | Clean       | 89.97                       |             |                      |  |  |
|            | [penalty='12',                              | One-pixel   | 86.22                       | 93.64       | 90.83                |  |  |
|            | solver='newton-cg',<br>random_state=3,802]  | JSMA        | 96.31                       |             |                      |  |  |
|            | SVM   | Clean       | 88.61                       |             |                      |  |  |
|            | (all)                                       | One-pixel   | 76.51                       | 85.05       | 81.92                |  |  |
|            | [kernel= linear ]                           | JSMA        | 80.65                       |             |                      |  |  |
|            | RF  | Clean       | 91.36                       |             |                      |  |  |
| MNIST      | (all)                                       | One-pixel   | 79.66                       | 88.96       | 85.91                |  |  |
|            | [n_estimators=//]                           | JSMA        | 86.71                       |             |                      |  |  |
|            | LR<br>(all)                                 | Clean       | 88.40                       |             |                      |  |  |
|            | [penalty='12',                              | One-pixel   | 75.39                       | 84.79       | 81.45                |  |  |
|            | random_state=3,802]                         | JSMA        | 80.55                       |             |                      |  |  |

| Table 5  | Quality | indiantara | for | maultialaga | imagan | aloggification |
|----------|---------|------------|-----|-------------|--------|----------------|
| Table 5. | Quanty  | indicators | IOI | municiass   | image  | classification |
|          | ×       |            |     |             |        |                |

Table 6. Performance evaluation of the  $L_0$ -optimized attack detection method

| Teals                     | Detect     | Count of images | Image          | Time             |           |  |
|---------------------------|------------|-----------------|----------------|------------------|-----------|--|
| Task                      | Dataset    | Count of images | color channels | pixels           | l lime, s |  |
| Anomaly detection         | CIFAR-10   | 10,000          | 3              | 32 × 32          | 547.53    |  |
|                           | CIFAR-10-G |                 | 1              | $32 \times 32$   | 227.08    |  |
|                           | MNIST      |                 | 1              | $28 \times 28$   | 152.64    |  |
|                           | ImageNet   |                 | 3              | $299 \times 299$ | 51,911.74 |  |
| Binary classification     | CIFAR-10   |                 | 3              | $32 \times 32$   | 576.26    |  |
|                           | CIFAR-10-G |                 | 1              | 32 × 32          | 277.48    |  |
|                           | MNIST      |                 | 1              | $28 \times 28$   | 223.44    |  |
| Multiclass classification | CIFAR-10   |                 | 3              | $32 \times 32$   | 606.29    |  |
|                           | CIFAR-10-G | ]               | 1              | 32 × 32          | 299.09    |  |
|                           | MNIST      |                 | 1              | $28 \times 28$   | 209.33    |  |

| Method                     | Dataset  | Attack                         | Accuracy, % | F1-score, % |
|----------------------------|----------|--------------------------------|-------------|-------------|
| Esipov D. [2]              | CIFAR-10 | Both One-pixel attack and JSMA | 96.94       | 96.92       |
|                            | MNIST    |                                | 75.14       | 74.43       |
| Developed                  | CIFAR-10 | Both One-pixel attack and JSMA | 98.43       | 97.71       |
| (selected characteristics) | MNIST    |                                | 76.44       | 80.48       |
|                            | ImageNet | LaVAN                          | 84.73       | 85.50       |
| Developed                  | CIFAR-10 | Both One-pixel attack and JSMA | 97.82       | 96.84       |
| (all characteristics)      | MNIST    |                                | 72.95       | 77.80       |
|                            | ImageNet | LaVAN                          | 88.48       | 88.43       |

Table 7. Comparative analysis of  $L_0$ -optimized attack detection methods

The developed method demonstrates quality indicators comparable to analogues [2–7]. Since the developed method uses only input data to detect and classify  $L_0$ -optimized attacks, it can potentially be used regardless of the architecture of the model or the presence of a target neural network. In addition, the method allows detecting various  $L_0$ -optimized attacks (One-pixel attack and JSMA). Due to the use of anomaly detection, the method can also detect other fundamentally similar attacks that are not represented in the data sets used and are not considered in the current work.

Unlike the previous method [2], the current one does not have such limitations, as need for different algorithm parameters (cut-off threshold) for detecting different attacks and its parameters (gamma). The developed method also performs classification for further perturbation detection. The disadvantage of the developed method is a decline in attack detection and image classification quality on contrasting images. This disadvantage is due to the limitations of the approach used.

#### References

- Esipov D.A., Buchaev A.Y., Kerimbay A., Puzikova Y.V., Saidumarov S.K., Sulimenko N.S., Popov I.Yu., Karmanovskiy N.S. Attacks based on malicious perturbations on image processing systems and defense methods against them. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 4, pp. 720–733. (in Russian). https://doi. org/10.17586/2226-1494-2023-23-4-720-733
- Esipov D.A. An approach to detecting L<sub>0</sub>-optimized attacks on image processing neural networks via means of mathematical statistics. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 3, pp. 490–499. https://doi. org/10.17586/2226-1494-2024-24-3-490-499
- Nguyen-Son H.Q., Thao T.P., Hidano S., Bracamonte V., Kiyomoto S., Yamaguchi R.S. Opa2d: One-pixel attack, detection, and defense in deep neural networks. *Proc. of the International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 2021, pp. 1–10. https://doi.org/10.1109/ IJCNN52387.2021.9534332
- Alatalo J., Sipola T., Kokkonen T. Detecting One-Pixel Attacks Using Variational Autoencoders. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2022, vol. 468, pp. 611–623. https://doi.org/10.1007/978-3-031-04826-5\_60
- Wang P., Cai Z., Kim D., Li W. Detection mechanisms of one-pixel attack. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2021, vol. 2021, no. 1, pp. 8891204. https://doi.org/10.1155/2021/8891204
- Grosse K., Manoharan P., Papernot N., Backes M., McDaniel P. On the (statistical) detection of adversarial examples. *arXiv*, 2017, arXiv:1702.06280. https://doi.org/10.48550/arXiv.1702.06280

#### Conclusion

The proposed method allows detecting the fact of an attack based on  $L_0$ -optimized perturbation as well as the classification of specified attacks. The method demonstrates high accuracy and F1-score when detecting various  $L_0$ -optimized attacks. The use of anomaly detection allows detecting other similar attacks. The classification of attacks allows selecting the parameters of the algorithm to detect the perturbation introduced by these attacks. Since the developed method uses only input data to detect and classify  $L_0$ -optimized attacks, it can potentially be used regardless of the architecture of the model or the presence of a target neural network.

The direction of further work is to enhance the algorithm for detecting perturbed pixels by the use the statistical distribution of the obtained pixel anomaly scores and its characteristics along with the values of the obtained values. Another direction is to develop approaches, algorithms or methods for detecting other types of attacks based on malicious perturbation on image processing neural networks.

#### Литература

- Есипов Д.А., Бучаев А.Я., Керимбай А., Пузикова Я.В., Сайдумаров С.К., Сулименко Н.С., Попов И.Ю., Кармановский Н.С. Атаки на основе вредоносных возмущений на системы обработки изображений и методы защиты от них // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23. № 4. С. 720–733. https://doi. org/10.17586/2226-1494-2023-23-4-720-733
- Esipov D.A. An approach to detecting L<sub>0</sub>-optimized attacks on image processing neural networks via means of mathematical statistics // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2024. V. 24. N 3. P. 490–499. https://doi. org/10.17586/2226-1494-2024-24-3-490-499f
- Nguyen-Son H.Q., Thao T.P., Hidano S., Bracamonte V., Kiyomoto S., Yamaguchi R.S. Opa2d: One-pixel attack, detection, and defense in deep neural networks // Proc. of the International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). 2021. P. 1–10. https://doi.org/10.1109/ IJCNN52387.2021.9534332
- Alatalo J., Sipola T., Kokkonen T. Detecting One-Pixel Attacks Using Variational Autoencoders // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. V. 468 P. 611–623. https://doi.org/10.1007/978-3-031-04826-5\_60
- Wang P., Cai Z., Kim D., Li W. Detection mechanisms of one-pixel attack // Wireless Communications and Mobile Computing. 2021. V. 2021. N 1. P. 8891204. https://doi.org/10.1155/2021/8891204
- Grosse K., Manoharan P., Papernot N., Backes M., McDaniel P. On the (statistical) detection of adversarial examples // arXiv. 2017. arXiv:1702.06280. https://doi.org/10.48550/arXiv.1702.06280

- Guo F., Zhao Q., Li X., Kuang X., Zhang J., Han Y., Tan Y.A. Detecting adversarial examples via prediction difference for deep neural networks. *Information Sciences*, 2019, vol. 501, pp. 182–192. https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.05.084
- Su J., Vargas D.V., Sakurai K. One pixel attack for fooling deep neural networks. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2019, vol. 23, no. 5, pp. 828–841. https://doi.org/10.1109/ TEVC.2019.2890858
- Papernot N., McDaniel P., Jha S., Fredrikson M., Celik Z.B., Swami A. The limitations of deep learning in adversarial settings. *Proc. of the IEEE European symposium on security and privacy* (*EuroS&P*), 2016, pp. 372–387. https://doi.org/10.1109/ EuroSP.2016.36
- Karmon D., Zoran D., Goldberg Y. Lavan: Localized and visible adversarial noise. arXiv, 2018, arXiv:1801.02608. https://doi. org/10.48550/arXiv.1801.02608
- Lampert C.H. Kernel methods in computer vision. Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision, 2009, vol. 4, no. 3, pp. 193– 285. http://dx.doi.org/10.1561/0600000027
- Bounsiar A., Madden M.G. One-class support vector machines revisited. Proc. of the 5<sup>th</sup> International Conference on Information Science & Applications (ICISA), 2014, pp. 1–4. https://doi. org/10.1109/ICISA.2014.6847442
- Tax D.M.J., Duin R.P.W. Support vector data description. *Machine Learning*, 2004, vol. 54, no. 1, pp. 45–66. https://doi.org/10.1023/B:MACH.0000008084.60811.49
- Liu F.T., Ting K.M., Zhou Z.H. Isolation forest. Proc. of the 8<sup>th</sup> IEEE International Conference on Data Mining, 2008, pp. 413–422. https:// doi.org/10.1109/ICDM.2008.17
- Ji Y., Wang Q., Li X., Liu J. A survey on tensor techniques and applications in machine learning. *IEEE Access*. 2019, vol. 7, pp. 162950–162990. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2949814
- Howard S. The Elliptical Envelope. arXiv, 2007, arXiv:math/0703048. https://doi.org/10.48550/arXiv.math/0703048
- Ashrafuzzaman M., Das S., Jillepalli A.A., Chakhchoukh Y., Sheldon F.T. Elliptic envelope based detection of stealthy false data injection attacks in smart grid control systems. *Proc. of the IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*, 2020, pp. 1131–1137. https://doi.org/10.1109/SSCI47803.2020.9308523
- Hearst M.A., Dumais S.T., Osuna E., Platt J., Scholkopf B. Support vector machines. *IEEE Intelligent Systems and their applications*, 1998, vol. 13, no. 4, pp. 18–28. https://doi.org/10.1109/5254.708428
- Ho T.K. The random subspace method for constructing decision forests. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 1998, vol. 20, no. 8, pp. 832–844. https://doi. org/10.1109/34.709601
- Wright R.E. Logistic regression. *Reading and understanding* multivariate statistics. American Psychological Association, 1995, pp. 217–244.
- Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., Blondel M., Prettenhofer P., Weiss R., Dubourg V., Vanderplas J., Passos A., Cournapeau D., Brucher M., Perrot M., Duchesnay É. Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 2011, vol. 12, pp. 2825–2830.
- Sedgwick P. Pearson's correlation coefficient. British Medical Journal, 2012, vol. 345, pp. e4483. https://doi.org/10.1136/bmj.e4483
- 23. Abd Al-Hameeda K.A. Spearman's correlation coefficient in statistical analysis. *International Journal of Nonlinear Analysis and Applications*, 2022, vol. 13, no. 1, pp. 3249–3255. https://doi.org/10.22075/ijnaa.2022.6079
- Abdi H. The Kendall rank correlation coefficient. *Encyclopedia of measurement and statistics*. SAGE Publications, 2007. vol. 2, pp. 508–510.
- Xu W., Hou Y., Hung Y.S., Zou Y. A comparative analysis of Spearman's rho and Kendall's tau in normal and contaminated normal models. *Signal Processing*, 2013, vol. 93, no. 1, pp. 261–276. https:// doi.org/10.1016/j.sigpro.2012.08.005

#### Authors

**Dmitry A. Esipov** — Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, SC 57954958600, https://orcid.org/0000-0003-4467-5117, somelelse.d.ma@gmail.com

- Guo F., Zhao Q., Li X., Kuang X., Zhang J., Han Y., Tan Y.A. Detecting adversarial examples via prediction difference for deep neural networks // Information Sciences. 2019. V. 501. P. 182–192. https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.05.084
- Su J., Vargas D.V., Sakurai K. One pixel attack for fooling deep neural networks // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2019. V. 23. N 5. P. 828–841. https://doi.org/10.1109/TEVC.2019.2890858
- Papernot N., McDaniel P., Jha S., Fredrikson M., Celik Z.B., Swami A. The limitations of deep learning in adversarial settings // Proc. of the IEEE European symposium on security and privacy (EuroS&P). 2016. P. 372–387. https://doi.org/10.1109/ EuroSP.2016.36
- Karmon D., Zoran D., Goldberg Y. Lavan: Localized and visible adversarial noise // arXiv. 2018. arXiv:1801.02608. https://doi. org/10.48550/arXiv.1801.02608
- Lampert C.H. Kernel methods in computer vision // Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision. 2009. V. 4. N 3. P. 193–285. http://dx.doi.org/10.1561/0600000027
- Bounsiar A., Madden M.G. One-class support vector machines revisited // Proc. of the 5<sup>th</sup> International Conference on Information Science & Applications (ICISA). 2014. P. 1–4. https://doi. org/10.1109/ICISA.2014.6847442
- Tax D.M.J., Duin R.P.W. Support vector data description. Machine Learning. 2004. V. 54. N 1. P. 45-66. https://doi. org/10.1023/B:MACH.0000008084.60811.49
- Liu F.T., Ting K.M., Zhou Z.H. Isolation forest // Proc. of the 8<sup>th</sup> IEEE International Conference on Data Mining. 2008. P. 413–422. https:// doi.org/10.1109/ICDM.2008.17
- Ji Y., Wang Q., Li X., Liu J. A survey on tensor techniques and applications in machine learning // IEEE Access. 2019. V. 7. P. 162950-162990. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2949814
   Howard S. The Elliptical Envelope // arXiv. 2007.
- arXiv:math/0703048. https://doi.org/10.48550/arXiv.math/0703048
- Ashrafuzzaman M., Das S., Jillepalli A.A., Chakhchoukh Y., Sheldon F.T. Elliptic envelope based detection of stealthy false data injection attacks in smart grid control systems // Proc. of the IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI). 2020. P. 1131–1137. https://doi.org/10.1109/SSCI47803.2020.9308523
- Hearst M.A., Dumais S.T., Osuna E., Platt J., Scholkopf B. Support vector machines // IEEE Intelligent Systems and their applications. 1998. V. 13. N 4. P. 18–28. https://doi.org/10.1109/5254.708428
- Ho T.K. The random subspace method for constructing decision forests // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 1998. V. 20. N 8. P. 832–844. https://doi. org/10.1109/34.709601
- Wright R.E. Logistic regression // Reading and understanding multivariate statistics. American Psychological Association, 1995. P. 217–244.
- Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., Blondel M., Prettenhofer P., Weiss R., Dubourg V., Vanderplas J., Passos A., Cournapeau D., Brucher M., Perrot M., Duchesnay É. Scikit-learn: Machine learning in Python // Journal of Machine Learning Research. 2011. V. 12. P. 2825–2830.
- Sedgwick P. Pearson's correlation coefficient // British Medical Journal. 2012. V. 345. P. e4483. https://doi.org/10.1136/bmj.e4483
- Abd Al-Hameeda K.A. Spearman's correlation coefficient in statistical analysis // International Journal of Nonlinear Analysis and Applications. 2022. V. 13. N 1. P. 3249–3255. https://doi. org/10.22075/ijnaa.2022.6079
- Abdi H. The Kendall rank correlation coefficient // Encyclopedia of measurement and statistics. SAGE Publications, 2007. V. 2. P. 508– 510.
- Xu W., Hou Y., Hung Y.S., Zou Y. A comparative analysis of Spearman's rho and Kendall's tau in normal and contaminated normal models // Signal Processing. 2013. V. 93. N 1. P. 261–276. https://doi. org/10.1016/j.sigpro.2012.08.005

#### Авторы

Есипов Дмитрий Андреевич — ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, sc 57954958600, https://orcid.org/0000-0003-4467-5117, some1else.d.ma@gmail.com

Mark I. Basov — Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, https://orcid.org/0009-0000-0844-6881, basovmark@ gmail.com

Alyona D. Kletenkova — Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, https://orcid.org/0009-0001-8148-6764, alyonka8855@gmail.com

Received 02.09.2024 Approved after reviewing 04.01.2025 Accepted 24.01.2025 Басов Марк Игоревич — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, https://orcid.org/0009-0000-0844-6881, basovmark@gmail.com

Клетенкова Алёна Дмитриевна — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, https://orcid. org/0009-0001-8148-6764, alyonka8855@gmail.com

Статья поступила в редакцию 02.09.2024 Одобрена после рецензирования 04.01.2025 Принята к печати 24.01.2025



Работа доступна по лицензии Creative Commons «Attribution-NonCommercial» **I/İTMO** 

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ январь–февраль 2025 Том 25 № 1 http://ntv.ifmo.ru/ SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS January–February 2025 Vol. 25 No 1 http://ntv.ifmo.ru/en/ ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

## MATEMATИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ MODELING AND SIMULATION

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-140-150 УДК 620.191, 629.017

## Моделирование износа алюминиевого сплава частицами SiO<sub>2</sub> Евгений Александрович Строкач<sup>1⊠</sup>, Алексей Алексеевич Пожидаев<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, 125993, Российская Федерация

<sup>1</sup> evgenij.strokatsch@mai.ru<sup>\overline</sup>, https://orcid.org/0000-0001-5376-1231

<sup>2</sup> aapozhidaev@mai.ru, https://orcid.org/0000-0002-7667-5392

#### Аннотация

Введение. Современные методы моделирования процесса эрозии материалов твердыми частицами позволяют на микроуровне оценить влияние условий движения частиц, контакта с поверхностью, их формы и материала. Известные зарубежные работы по изучению пар эродента и алюминиевых, титановых сплавов и сталей не дают правильной оценки влияния трения и вращения частиц на остаточное напряженно-деформированное состояние и глубину износа при относительно высоких скоростях частиц. Мало изученным остается вопрос кратковременного нагрева приповерхностного слоя, что при высоких температурах может влиять на свойства материала. Устранение такой неопределенности повысит предиктивную точность модели абразивного износа. Метод. В работе представлены результаты двумерного конечно-элементного моделирования эрозионного износа поверхности распространенного алюминиевого сплава Аl6061-Т6 при взаимодействии с частицами двуокиси кремния (SiO<sub>2</sub>). Упругопластическое поведение материала поверхности и условия разрушения задавались моделью Джонсона-Кука. Основные результаты. Для оценки взаимовлияния следов множественных ударов частиц и изменения напряженно-деформированного состояния поверхности выполнено моделирование последовательных ударов трех групп жестких частиц диаметром 250 мкм со скоростью 155 м/с под углом 45°. Изучено изменение эквивалентных напряжений в образце после каждого удара. Проведена оценка влияния трения между частицами SiO<sub>2</sub> и поверхностью, а также вращения сферических частиц и его направления. Обсуждение. Показано, что учет трения влияет на профиль эквивалентных напряжений уже после первого удара и сохраняет влияние в дальнейшем. Зависимость результатов от направления вращения частиц при скорости 1000 об/мин проявляется только после второго удара и усиливается после удара третьей группы частиц. Предполагается, что для алюминиевых сплавов серии 6000 и сферических частиц SiO<sub>2</sub> другого размера полученные зависимости будут качественно сохраняться. Дальнейшие исследования предполагают анализ влияния формы несферических частиц SiO2 при вращении, важность учета деформируемости частиц при ударе, а также воздействие этих эффектов при большем количестве ударов и различных условиях контакта.

#### Ключевые слова

эрозия твердыми частицами, абразивный износ, FEA-моделирование эрозии, ANSYS Explicit, остаточные напряжения, модель Джонсона-Кука, Al6061

#### Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема № FSFF-2023-0006.

Ссылка для цитирования: Строкач Е.А., Пожидаев А.А. Моделирование износа алюминиевого сплава частицами SiO<sub>2</sub> // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 1. С. 140–150. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-140-150

## Numerical study of SiO<sub>2</sub> particle erosion of an aluminum alloy Evgeny A. Strokach<sup>1⊠</sup>, Alexei A. Pozhidaev<sup>2</sup>

1,2 Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation

<sup>2</sup> aapozhidaev@mai.ru, https://orcid.org/0000-0002-7667-5392

© Строкач Е.А., Пожидаев А.А., 2025

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> evgenij.strokatsch@mai.ru<sup>\top</sup>, https://orcid.org/0000-0001-5376-1231

#### Abstract

Computational methods used to simulate solid particle erosion have advanced so far being able to estimate partial effect of various processing factors on microlevel, such as particle-surface contact, its particle material, and shape, etc. The published activities taken to study different effects in this aspect for popular aluminium or titanium alloys and steels still have a gap in knowledge addressing some process parameters. The influence of particle rotation and its direction on stress-strain state and wear depth is still understudied. The impact of friction consideration in relatively high-speed contacts should also be studied, as well as the surface layer heating effect which may influence the material strength properties when the temperatures get high. Understanding these effects would increase the predictive ability of the erosion model and its accuracy — which is presented in our 2D simulation study for SiO<sub>2</sub> solid particles and a widespread Al6061-T6 alloy. The elastic-plastic and failure properties of the surface material were presented by the Johnson-Cook model. To estimate the influence of multiple impacts on the stress-strain state, three sequential rigid impacts of 250 µm particles at 45° and 155 m/s were modeled. Main attention was driven to the evolution of equivalent von-Mises stresses in the sample after each impact and its dependence on the friction and rotation of particles. It was shown that the effect of friction can be noticed after the first impact, remaining high throughout the simulation. Whereas the influence of rotation direction at 1000 rpm was noticeable after the second impact and tended to increase after the third impact. It is assumed that for other 6000 series aluminium alloys being eroded by spherical SiO<sub>2</sub> particles with differing diameters the erosive behavior would keep. However, future studies should be addressed to the analyzing of non-spherical particles rotation, consideration of particle deformation, and to studies of these parameters including more impacts and different contact properties in complex.

#### Keywords

solid particle erosion, abrasive wear, FEA erosion simulation, ANSYS Explicit, residual stresses, Johnson-Cook model, Al6061

#### Acknowledgements

The work was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, grant No. FSFF-2023-0006.

**For citation:** Strokach E.A., Pozhidaev A.A. Numerical study of SiO<sub>2</sub> particle erosion of an aluminum alloy. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 1, pp. 140–150 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-140-150

#### Введение

Эрозионный абразивный износ целых узлов и отдельных деталей является актуальной проблемой как для перспективных образцов специальной техники [1-3], так и распространенным явлением в гражданской машиностроительной отрасли. Современные подходы к моделированию абразивного износа, опираясь на обширный эмпирико-аналитический опыт его оценки и базу свойств материалов, связаны с численным моделированием, в основном двумя классами методов. Так, методы вычислительной гидрогазодинамики способны оценить распространение гетерогенного потока с частицами на уровне узла или всей машины, в зависимости от задачи и доступных ресурсов — известно множество отечественных и зарубежных расчетно-экспериментальных работ с применением этого подхода [4, 5]. Для оценки скорости износа поверхности в этой постановке в основном применяются полученные экспериментально или аналитически формулировки. Другие подходы на основе методов конечных элементов (Finite Element Analysis, FEA), или метода сглаженных частиц (Smooth Particle Hydrodynamics, SPH) и его расширений, позволяют на микроуровне рассмотреть процесс эродирования каждой частицей, для чего требуется задание механических свойств поверхности и частиц, а также условий их натекания. Это дает возможность связать микропараметры процесса и свойства материалов с режимными характеристиками работы изделия в дальнейшем, а также получить ценную информацию о процессах в приповерхностном слое детали и влиянии множества параметров частиц, потока, поверхности и т. п., что сложно, дорогостояще и, во многих случаях,

невозможно выявить экспериментально. Как и применение методов вычислительной гидрогазодинамики, FEA- и SPH-моделирование эродирования частицами получило резкое развитие в первую очередь благодаря росту вычислительных мощностей.

В работе [6] выполнено моделирование эродирования системы CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> частицами теплозащитных покрытий в двумерной осесимметричной постановке с учетом трения между частицами разной формы и поверхностью. В [7] применен расширенный метод конечных элементов для моделирования роста трещин в теплозащитном покрытии. В работе [8] изучена в 2D осесимметричной постановке эрозия сплава SS316 части разной формы. Получено, что размер частицы прямо влияет на остаточные напряжения сжатия в осевом и радиальном направлениях. Повышение скорости, и, соответственно, кинетической энергии, также приводит к росту напряжений и глубины их распространения в осевом и радиальном направлениях. Отмечено, что температура частиц оказывает меньшее влияние. В [9] проведено моделирование эродирования Ti6Al4V стальной частицей. Пластичность и условие разрушения материала поверхности задавались моделями Джонсона-Кука. Частицы представлялись абсолютно твердыми телами, а трение задавалось зависимостью Coulomb с коэффициентом 0,2. Заметим, что авторы работы [9] основывались на исследовании [10], где было показано, что размер сферической частицы слабо влияет на скорость эродирования, а для точного моделирования достаточно трех частиц. В [11] проверено воздействие частицы глиноземного песка размером от 42 до 50 мкм на основу из стали SAE213-T12 и разнообразные вольфрам-кобальтовые покрытия. Для покрытий и основы задавались упругопластичные свойства, а для частиц — упругие при скоростях 50 и 100 м/с. Для моделирования трения выбрана зависимость Coulomb. В работе [12] детально рассмотрен процесс дробления частицы при ударе и его влияние на эрозионный износ. Энергия, затрачиваемая на разрушение частицы, может составлять около 20-30 % от начальной кинетической энергии частиц [13]. В работе, применяя FEA- и SPHметоды для разных частей поверхности, изучено дробление хрупкой частицы, свойства которой задавались моделью Джонсона-Холмквиста, а для материалов образца — моделью Джонсона-Кука. Показано, что угол падения является важным фактором разрушения эродента, а абсолютно жесткие и твердые деформируемые частицы одинаково увеличивали внутреннюю энергию образца. Интересное исследование проводилось для бескислородной меди — жесткие угловатые частицы, наследуя характерные формы карбида кремния SiC, оксида алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, кварца подавались на представленную SPH-частицами поверхность с упругопластическим поведением по модели Джонсона-Кука и уравнением состояния Ми-Грюнейсена. По форме кратера и углу отскока результаты расчетов хорошо совпали с экспериментом. Получено, что механизм износа в основном зависит от положения центра масс при контакте с поверхностью, угловатости и угла падения. В работе [14] исследован износ сплава Ti6Al4V при трех значениях температур (300 К, 423 К, 623 К). Отметим, что максимальный износ был получен для средней и меньшей температуры. Еще один пример использования подхода SPH представлен в [15], где медная поверхность с упругопластическими свойствами по модели Джонсона-Кука эродировалась угловатыми частицами при скоростях до 90 м/с. Авторы показали, что учет деформируемости частиц может давать изменение скорости износа на 30 %. Ранее [5] были рассмотрены исследования в конечноэлементной (Finite Element Analysis, FEA) постановке, связанные с моделированием эрозии и исследованием свойств материала [16], эрозионной стойкости Ti-Ni покрытий и Ti6Al4V [17], высокоскоростной деформации образца [18]. Известны и другие работы по моделированию эродирования твердыми частицами в 3D- и 2D-постановках, с помощью различного программного обеспечения (Abaqus, ANSYS/LS-DYNA), различных сплавов и покрытий, композитных материалов [19-31]. Как видно, FEA- и SPH-моделирование процесса столкновения твердых частиц и поверхности применяется повсеместно, и посвящено различным вопросам отработки методики. В основном упругопластическое поведение материала описывается уравнениями Джонсона-Кука или Джонсона-Холмквиста в связке с уравнением состояния; часто учитывается трение между поверхностью и эродентом, частицы задаются как деформируемыми, так и абсолютно жесткими. Отдельно отмечался [32] недостаток знаний о влиянии вращения частиц на формирование кратера эрозии и сопутствующий унос массы. Несмотря на большой зарубежный опыт моделирования быстропротекающего процесса эродирования, разработка методологии моделирования продолжается, и остаются слабо определенные аспекты, требующие уточнения и универсализации — такие как влияние условий падения и параметров частиц, свойств материала образца и т. п.

В настоящей работе основное внимание уделено некоторым из аспектов — влиянию учета трения между частицами и поверхностью, влиянию вращения частиц, оценке степени нагрева поверхностного слоя при множественном ударе частиц одного диаметра о поверхность.

#### Материалы и методы

Для моделирования применялся коммерческий пакет Ansys Explicit Dynamics (решатель — Autodyn), была выбрана двумерная постановка задачи. Упругопластическое поведение материала определялось моделью Джонсона–Кука, связывающей напряжения и деформации с учетом высокой скорости деформаций и температуры процесса:

$$\sigma_{v} = (A + B(\overline{\epsilon}^{pl})^{n})(1 + c\ln\dot{\epsilon}^{*})(1 - T^{*m}),$$

где  $(\bar{\epsilon}^{pl})^n$  — эффективная пластическая деформация;  $\dot{\epsilon}^*$  — скорость эффективной пластической деформации;  $T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}$  — гомологическая температура,  $T_{room}$  — температура окружающей среды (или референсная температура),  $T_{melt}$  — температура плавления материала; A, B, C, n, m — константы.

Для алюминиевого сплава коэффициенты модели Джонсона–Кука получены согласно [20]. Упругое поведение материала задавалось модулем упругости  $E = 6,9 \cdot 10^{10}$  Па и коэффициентом Пуассона v = 0,3. Плотность сплава  $\rho = 2800$  кг/м<sup>3</sup>, теплоемкость составила 893 Дж/(кг·К). Условия разрушения материала также соответствует модели Джонсона–Кука с коэффициентами:

$$\overline{\varepsilon}_D^{pl} = (d_1 + d_2 \exp(-d_3\eta))(1 + d_4 \ln \overline{\varepsilon}^*)(1 + d_5T^*),$$

где  $d_1 - d_5$  — константы;  $\eta = \frac{\Sigma_h}{\Sigma_e}$ ,  $\Sigma_h$  — гидростатиче-

ская составляющая напряжений,  $\Sigma_e$  — эквивалентные напряжения по Мизесу. Частица двуокиси кремния (SiO<sub>2</sub>) представлялась абсолютно жесткой, с плотностью  $\rho = 2640 \text{ кг/м}^3$ .

Моделирование движения частиц в лагранжевых координатах, их вращения, деформации и перемещения элементов сетки проводились на базе явной разностной схемы интегрирования по времени на основе схемы, предложенной в работах [33, 34]. Система уравнений [33] представлялась (для планарной симметрии) следующим образом:

уравнение неразрывности:

$$p = \frac{\rho_0 V_0}{V} = \frac{m}{V},$$

где  $\rho_0$  и  $V_0$  — начальные плотность и объем;

уравнение сохранения импульса (для направления *x*):

$$\rho \ddot{x} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y}$$

где  $\sigma_{xx} = -(p+q) + s_{xx}p$  — гидростатический компонент тензора,  $s_{xx}$  — девиаторный компонент тензора напряжений, q — псевдо-вязкостный член;  $\sigma_{xy} = s_{xx}$ ,  $\dot{\varepsilon}_{xx} = \frac{\partial \dot{x}}{\partial x}$ ,  $\dot{\varepsilon}_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \dot{x}}{\partial y} + \frac{\partial \dot{y}}{\partial x} \right)$ ;  $\dot{s}_{xx} = 2G \left( \dot{\varepsilon}_{xx} - \frac{1}{3} \frac{\dot{V}}{V} \right)$ ;  $\dot{s}_{xy} = 2G \dot{\varepsilon}_{xy}$ , изменение объема связывалось со скоростью деформации как  $\frac{\dot{V}}{V} = \dot{\varepsilon}_{xx} + \dot{\varepsilon}_{yy}$ ; G — модуль сдвига;

— уравнение сохранение энергии описывалось в виде:

$$\dot{e} = \frac{1}{\rho} (\sigma_{xx} \dot{\varepsilon}_{xx} + \sigma_{yy} \dot{\varepsilon}_{yy} + 2\sigma_{xy} \dot{\varepsilon}_{xy})$$

Ввиду малого относительного времени контакта частиц с поверхностью контактный теплообмен не учитывался, а повышение температуры элементов связано с повышением внутренней энергии через теплоемкость материала, присваиваемого телам (областям сетки).

Полученные уравнения [33] подразумевают, что на основе заданных граничных и начальных условий при интегрировании по времени происходит движение узлов сетки. При рассчитанных ускорениях узла сетки как  $\ddot{x} = \frac{F_x}{m_p}$ , где  $m_p$  — масса, связанная с узлом;  $F_x$  —

равнодействующая сил, действующих на узел сетки. В момент времени n схема определения скорости и перемещения узла (для направления x), при  $\Delta t^n$  — инкремент по времени в момент времени (на временном шаге n), имеет вид:

$$\dot{x}^{n+1/2} = \dot{x}^{n+1/2} + \ddot{x}^n \Delta t^n, \ x^{n+1} = x^n + \ddot{x}^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2},$$
$$\Delta t^{n+1/2} = \frac{(\Delta t^n + \Delta t^{n+1})}{2}.$$

Итерационный алгоритм решения включает, после определения и исходя из начальных условий, перемещений узлов, расчет скоростей деформаций элементов сетки, расчет и обновление параметров состояния элемента (его плотности), обновление напряжений в элементах сетки. Далее, после приложения нагрузок и других граничных условий, суммируются силы, действующие на узлы сетки, рассчитываются и обновляются ускорения узлов, рассчитываются «новые» скорости узлов и снова определяются перемещения узлов.

В настоящей работе основное внимание уделено оценке напряженно-деформированного состояния и износа поверхности при последовательных ударах частиц. При оценке процесса эрозии моделирования удара одной частицы может оказаться недостаточно для проявления некоторых приповерхностных механизмов при износе, кроме того, в реальных случаях на износ может оказывать влияние образование близко лежащих кратеров после удара частиц, а также их перекрытия. Для учета некоторых сценариев таких процессов износа рассматривалось падение 9 частиц, расположенных в три ряда для моделирования трех последовательных ударов приблизительно в одну область поверхности образца. В реальных условиях частицы не располагаются так близко и, как правило, имеют меньшую концентрацию в потоке газа/жидкости. Однако на конкретную область поверхности за весь период действия эродента может приходиться множество ударов частиц с близко лежащими и перекрывающимися кратерами. Так как течение газовой среды не рассматривалось, для упрощения постановки и сокращения расчетных затрат целесообразно рассмотреть модельное расположение частиц в предложенной конфигурации (рис. 1).

Рассмотрим динамику поведения образца при одном из частных случаев натекания — расчеты с другими степенями перекрытия областей контакта частиц с поверхностью, углами падения частиц и т. п. должны быть проведены в дальнейшем и обобщены. Контактное взаимодействие задавалось только между каждой из частиц и поверхностью. На нижней поверхности представительной области образца определялось условие жесткой заделки. Все расчеты проводились при равных задаваемых горизонтальной и вертикальной компонентах скорости частиц 110 м/с при угле падения 45°.



Рис. 1. Двумерная расчетная область.

1 — линия снятия напряжений (60 мкм от поверхности) (a); расчетная сетка частиц и поверхности в области контакта (b)

Fig. 1. 2D simulation domain.

I — stress estimation line (60 µm below the surface) (*a*); particle and sample surface mesh in the contact region (*b*)

Для упрощения постановки расчета и снижения требуемых вычислительных ресурсов были приняты следующие допущения:

- частицы представлялись абсолютно жесткими учет упругой деформируемости частиц SiO<sub>2</sub> показал разницу в 2 % по безразмерной скорости эрозии (Erosion Rate, ER) — отношение массы унесенного материала к массе частиц;
- отсутствовало взаимодействие между частицами SiO<sub>2</sub>;
- теплообмен между частицами и поверхностью не учитывался из-за малого относительного времени контакта (общее время расчета для моделирования контакта трех рядов частиц с поверхностью — 7.10<sup>-6</sup> с);
- относительно малая расчетная область (высота расчетной области образца 0,75 мм, ширина 1 мм, диаметр частиц 0,25 мм) и условие отсутствия на боковых поверхностях перемещений и прохода волн деформаций (предварительное исследование с более широкой областью образца (по 3 мм с каждой стороны в сумме 7 мм) показало разницу по ER не более 6 %). В то же время пластические деформации существенно убывают к расстоянию 170 мкм от исходной поверхности (23 % общей высоты расчетной области образца);
- частицы расположены близко отсутствует время для демпфирования колебаний напряженно-деформированного состояния поверхности (рассмотренное расположение соответствует высокой концентрации частиц в пространстве, однако, оценка концентрации и времени между ударами частиц в реальных случаях должны быть целью отдельного исследования). Кроме того, данное допущение вынужденно вводится повсеместно при постановке подобных задач с FEA- и SPH-методами, как показали работы [6–29].

Несмотря на введенные допущения, двумерная расчетная планарная модель позволяла оценить текущее и остаточное напряженное состояние поверхности, и принята достаточной для оценки влияния вращения частиц и учета трения между частицами и поверхностью. Условие контакта дроби и образца включало трение с коэффициентом трения покоя 0,36 и динамическим коэффициентом трения 0,31. В области контакта частиц и поверхности задавалось улучшенное сеточное разрешение, размер ячейки в котором принимался параметром для оценки сеточной сходимости.

Известны расчетные и экспериментальные работы по исследованию эродирования поверхностей, в том числе, алюминиевых сплавов с применением FEAили SPH-моделирования. Например, в [35] применен пакет ANSYS Explicit Dynamics для оценки износа теплозащитных покрытий 25 мкм частицами с плотностью 2000 кг/м<sup>3</sup> на небольшой (относительно размеров частиц) двумерной расчетной области. В [35] также изучено распределение напряжений в материале образца в зависимости от времени эродирования. В работе [36] уделено внимание моделированию влияния вращения угловатых жестких частиц в двумерной SPH-постановке. Отметим, что множественные удары частиц при наименее «угловатой» конфигурации приводили к картине износа поверхности, подобной на предварительно полученные профили в данной работе. Уже отмеченное исследование [24], направленное на оценку, в том числе, глубины износа сплава 6061 шариками стали в двумерной постановке для множественных ударов с разными межкратерными расстояниями, показало хорошую сходимость модели с экспериментом. В работе [37] на примере многочисленных ударов частицами песка со средним диаметром 800 мкм по стальной поверхности в FEA-моделировании оценивался налог на добавленную стоимость (НДС) материала образцов, а отдельное внимание авторы отвели изучению времени контакта эродента с поверхностью. В работах [7, 38, 39] также показана применимость FEA-методов и расчетов на основе представительного объема для моделирования на микроуровне эродирования различных материалов поверхности. В [40] изучено разрушение и вторичный удар осколков частиц по поверхности на основе двумерного SPH-моделирования и сравнения с экспериментом, что показало физичность модели, а также позволило оценить напрямую тонкие явления, происходящие при ударе. Неполный список таких публикаций говорит, с одной стороны, о применимости методов FEA и SPH для моделирования эродирования, большой практике их использования, а с другой стороны, о возможности с помощью этих методов изучать крайне мелкомасштабные явления и получать недоступную в эксперименте информацию в любой точке расчетной области. Все это позволяет считать такие модельные задачи, при обоснованном введении допущений и проведении исследования независимости от сеточного разрешения, отдельным численным экспериментом. С его помощью могут быть изучены тенденции и зависимости, труднодоступные для чистого определения в эксперименте, которые могут быть далее приложены к разработке более общей и полноценной методологии моделирования.

### Результаты и обсуждение

В качестве критерия сеточной сходимости выбраны максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу во всей области образца. Исследование проводилось для абсолютной скорости частиц 155 м/с. Для упрощения постановки расчета критерием разрушения (и удаления) ячейки материала выбрано значение коэффициента геометрической деформации 1,5. В дальнейших расчетах условие разрушения задавалось в соответствии со свойствами материала по модели Джонсона– Кука. Зависимость от характерного размера ячейки в области контакта представлена на рис. 2.

Видно, что снижение размера ячейки ведет к проявлению асимптотического характера зависимости. Для надежной близости используемой сетки к оптимальной выбран размер ячейки 2,5 · 10<sup>-6</sup> м, разрешение которой применено в дальнейших расчетах. Влияние учета трения между частицами и поверхностью оценивалось по максимальной глубине износа и остаточным эквивалентным напряжениям по Мизесу (рис. 3) вдоль линии снятия напряжений на глубине 60 мкм (рис. 1)


*Рис. 2.* Зависимость эквивалентных остаточных напряжений от размера ячейки

Fig. 2. Maximal equivalent residual stresses and mesh size

от исходной поверхности образца. Вращение частиц отсутствовало.

Картина глубины износа (рис. 3, *d*) показывает, что после начального износа первым рядом частиц (в точке около 1,9 мкс) сохраняется близкая глубина, в то время как учет трения существенно влияет на глубину износа

после удара третьего ряда частиц. Кроме того, по распределениям эквивалентных напряжений по Мизесу видно влияние учета трения после каждого удара.

На рис. 4 представлено влияние учета и направления вращения частиц на эквивалентные напряжения и глубину износа. Видно, что с увеличением количества ударов частиц растет влияние их вращения. Глубина износа для частиц с вращением «по часовой» немного выше, чем «против часовой» стрелки. В этой группе расчетов, как описано в разделе «Материалы и методы», контакт моделировался с коэффициентом трения покоя 0,36 и динамическим коэффициентом трения 0,31, а абсолютная скорость частиц также составила 155 м/с.

На рис. 5 заметна тенденция износа профиля. После первого удара частиц разница в профиле износа невелика, однако при увеличении количества столкновений с поверхностью становится заметным и отличие в картине износа. Также видно, что, за исключением некоторых локальных областей непосредственно в точках контакта, рост температуры за счет пластического нагрева составляет более 100 °С. Нагрев в приповерхностном слое образца при воздействии эродирующих



*Рис.* 3. Зависимости эквивалентных напряжений и максимальных перемещений от учета трения после ударов всех групп частиц (*a*); после ударов второй (*b*) и первой (*c*) групп частиц; перемещения в зависимости от времени (каждая точка — после удара группы частиц) (*d*)

*Fig. 3.* Equivalent stresses and maximal displacements dependances vs. friction. Impacted by all particles (*a*); impacted by two rows of particles (*b*); impacted by one row of particles (*c*); displacements vs. time (each point represents a sequential impact of particle row) (*d*)



*Рис. 4.* Зависимости эквивалентных напряжений и максимальных перемещений от направления вращения: после ударов всех групп частиц (*a*); после ударов второй (*b*) и первой (*c*) групп частиц; перемещения в зависимости от времени (каждая точка — после удара группы частиц) (*d*).

«+» — против часовой и «-» — по часовой стрелки

*Fig. 4.* Equivalent stresses and maximal displacements dependances vs. the direction of rotation: "+" — anti-clockwise, "-" — clockwise. Impacted by all particles (*a*); impacted by two rows of particles (*b*); impacted by one row of particles (*c*); displacements vs time (each point represents a sequential impact of particle row) (*d*)

частиц также является важным эффектом [41]. Оценка глубины нагрева показала, что на 60 мкм от поверхности температура может достигать 35–40 °С и почти не повышаться на глубине 90 мкм (при начальной температуре 22 °C). Отметим также, что возникающие после второго удара предпосылки к отрыву сминаемого мате-



Рис. 5. Картина износа в приповерхностном слое, заливка по температуре (°С).

1 — вращение частиц против часовой и 2 — по часовой стрелке: после ударов всех частиц (a); после ударов второй (b) и первой (c) групп частиц

Fig. 5. Temperature (°C) of the eroded surface.

*I* — anti-clockwise particle rotation, *2* — clockwise particle rotation; impacted by all particles (*a*); impacted by 2 rows of particles (*b*); impacted by 1 row of particles (*c*)

риала реализуются в срыве «гребешков» после ударов третьей группы частиц.

Можно предположить, что полученные результаты будут справедливы и для других сплавов серии 6000 (данное предположение требует уточнения), а также сферических частиц SiO<sub>2</sub> других диаметров. Дальнейшие работы могут быть связаны как с уточнением выводов для близких материалов, так и с изучением этих аспектов для других распределений частиц, их форм, скоростей, учета их деформируемости.

Несмотря на обширную базу расчетных и экспериментальных работ по эродированию поверхностей металлов и сплавов, прямое сравнение результатов для выбранной комбинации эродент-поверхность затруднено из-за:

- относительно высокой скорости частиц;
- изучения эродирования двуокисью кремния (SiO<sub>2</sub>), в то время как большинство работ связаны с эродированием частицами Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для соответствия стандарту American Society for Testing Materials;
- отсутствия данных о коэффициентах трения частиц и поверхности, нагреве поверхности, о вращении частиц, а также из-за сложности измерения этих параметров на большинстве установок;
- отсутствия, как правило, данных о остаточных напряжениях после эрозионных испытаний и т. п.

Кроме того, в текущей работе рассмотрен начальный этап эродирования, при котором ER может варьироваться в течение последовательных ударов частиц (что косвенно подтверждается изменением максимальной глубины износа по времени (рис. 3 и 4)), и стационарное значение ER может отличаться. Тем не менее, можно привести некоторые работы по эродированию алюминиевых сплавов твердыми частицами в газовом потоке к сравнению уже на рассмотренном этапе.

В работе [42] на большом наборе параметров (всего 27 точек) исследовано влияние скорости частиц песка, их размеров и угла падения на безразмерную скорость эродирования алюминиевого сплава. Для наиболее близких к настоящей работе размеров (300-355 мкм) при скорости частиц 50 м/с (максимальная скорость из [42]) ER составила для углов 30°, 60°, 90° от 1,15·10<sup>-3</sup> до 1,475 · 10-3. Известно, что скорость эрозии экспоненциально ( $ER = f(V^n)$ ) зависит от скорости частиц, причем для металлов показатель экспоненты *n* составляет от 2,3 до 2,5 [43-45]. Так как в данной работе скорость частиц составила 155 м/с, для сравнения можно экстраполировать полученную экспериментально ER для скорости частиц 50 м/с с учетом значения n = (2,3-2,5). Такой экстраполяционный метод дает ER до 19,9·10-3-24,9.10-3. Расчеты, приведенные в текущем исследовании, дают ER в диапазоне около 40·10-3-43·10-3. Важно отметить, что в данной работе можно оценить только условную скорость эродирования из-за двумерной постановки, а в рассмотренной экспериментальной работе могут иметь влияние дополнительные факторы — форма частиц, дисперсия распределения размеров и т. п. Тем не менее, можно считать совпадение результатов удовлетворительным.

В другой работе [46] изучалось эродирование сплава AA6061 частицами Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> средним размером 300– 450 мкм со скоростью около 24 м/с. Экстраполируя тем же методом полученную экспериментально для скорости 24 м/с ER в  $1,755 \cdot 10^{-4}$ , получим для 155 м/с ER в диапазоне от  $12,8 \cdot 10^{-3}$  до  $18,6 \cdot 10^{-3}$  в зависимости от значения показателя степени *n*. Такие значения можно считать близкими к полученным моделированием в текущей работе — однако, разница существенно зависит как от ограничений точности постановки моделирования, так и от явных и неявных условий испытаний. Например, от свойств частиц. Так, при испытаниях хрупкими частицами  $Al_2O_3$  важно учитывать их разрушение, чему уделялось внимание в зарубежных работах при моделировании, рассмотренных выше, и в недавних отечественных экспериментальных работах [47].

В работах [48-50] представлены исследования эрозии алюминиевых и титановых сплавов, где также показаны зависимости шероховатости поверхности алюминиевого сплава от скорости удара частиц корунда Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> со средним диаметром 109 мкм. Шероховатость определена средним арифметическим отклонением профиля *Ra*. Для сплава АМг6 и скорости частиц 155 м/с [49] экстраполяция дает (максимальная изученная скорость — 140 м/с)  $Ra \approx 5$  мкм. В свою очередь, эродирование частицами Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> крупнозернистого образца AK1 [48] обеспечивает  $Ra \approx 10$  мкм при скорости частиц 155 м/с, при этом толщина разрушенного (деградировавшего) слоя — около 28 мкм. Текущая работа показывает максимальную глубину износа после трех ударов частиц примерно 40 мкм. Также видно, что выступы почти отсутствуют из-за уноса гребней между кратерами, и профиль определяется впадинами относительно исходного профиля. Существенная разница может быть связана с отличием материала частиц, их формы и размера. В еще одной экспериментальной работе по эродированию алюминиевого сплава частицами Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [51] показано значительное влияние размера частиц на шероховатость по показателям Ra и Rz, которые растут с увеличением среднего диаметра. Кроме того, можно отметить качественное сходство картин износа поверхности в текущей работе с некоторыми результатами моделирования износа множественными частицами [24, 36, 40].

#### Заключение

Проведенное моделирование удара группы высокоскоростных частиц SiO<sub>2</sub> под углом 45° о поверхность алюминиевого сплава позволило определить, что степень влияния учета трения между частицами и поверхностью высока, заметна по итоговой глубине износа и профилям остаточных эквивалентных напряжений в материале. Показано, что влияние учета вращения частиц и его направления проявляется при ударе третьей группы частиц для рассмотренных условий. Выполнена оценка нагрева в приповерхностном слое образца, который после ударов трех групп частиц составил более 100 °С, а глубина нагрева — до 90 мкм. Дальнейшие работы могут быть направлены на уточнение выводов для других пар эродент-поверхность, а также на определение степени влияния вращения частиц при большем количестве ударов, влияния учета поглощения энергии деформации частицами (упругопластического поведения частиц), формы частиц.

#### Литература

- Боркова А.Н. Эрозионная стойкость авиационных материалов при соударении с твердыми (пылевыми) частицами: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Всероссийский НИИ авиационных материалов. М., 2006. 26 с.
- Клейс И.Р. Некоторые исследования по абразивной эрозии: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / МИНХиГП им. И.М. Губкина. М., 1970. 250 с.
- Крамченков Е.М. Исследование эрозионного изнашивания материалов: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / ГАНГ им. И.М. Губкина. М., 1995. 26 с.
- Строкач Е.А., Кожевников Г.Д., Пожидаев А.А., Добровольский С.В. Моделирование эрозионного износа титанового сплава высокоскоростным потоком частиц // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2023. Т. 25. № 4. С. 268–283. https://doi.org/10.17212/1994-6309-2023-25.4-268-283
- Строкач Е.А., Кожевников Г.Д., Пожидаев А.А. Численное моделирование процесса эродирования твердыми частицами в газовом потоке (обзор) // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2021. № 67. С. 56–69. https://doi.org/10.15593/2224-9982/2021.67.06
- Liu Y., Cao Z., Yuan J., Sun X., Su H., Wang L. Effect of morphology, impact velocity and angle of the CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> (CMAS) particle on the erosion behavior of Thermal Barrier Coatings (TBCs): a finite element simulation study // Coatings. 2022. V. 12. N 5. P. 576. https://doi.org/10.3390/coatings12050576
- Ma Z.S., Fu L.H., Yang L., Zhou Y.C., Lu C. Finite Element Simulations on Erosion and Crack Propagation in Thermal Barrier Coatings // High Temperature Materials and Processes. 2015. V. 34. N 4. P. 387–393. https://doi.org/10.1515/htmp-2014-0068
- Oviedo F., Valarezo A. Residual stress in high-velocity impact coatings: parametric finite element analysis approach // Journal of Thermal Spray Technology. 2020. V. 29. N 6. P. 1268–1288. https:// doi.org/10.1007/s11666-020-01026-5
- Liu Z.G., Wan S., Nguyen V.B., Zhang Y.W. Finite element analysis of erosive wear for offshore structure // Proc. of the 13<sup>th</sup> International Conference on Fracture. 2013. P. 461–468.
- ElTobgy M.S., Ng E., Elbestawi M.A. Finite element modeling of erosive wear // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2005. V. 45. N 11. P. 1337–1346. https://doi. org/10.1016/j.ijmachtools.2005.01.007
- Singh P.K., Hota A.R., Mishra S.B. Finite element modelling of erosion parameters in boiler components // Asian Journal of Engineering and Applied Technology. 2018. V. 7. N S2. P. 12–16. https://doi.org/10.51983/ajeat-2018.7.2.964
- Du M., Li Z., Feng L., Dong X., Che J., Zhang Y. Numerical simulation of particle fracture and surface erosion due to single particle impact // AIP Advances. 2021. V. 11. N 3. P. 035218. https:// doi.org/10.1063/5.0042928
- Evans A.G., Gulden M.E., Rosenblatt M. Impact damage in brittle materials in the elastic-plastic response régime // Proc. of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering sciences. 1978. V. 361. N 1706. P. 343–365. https://doi.org/10.1098/rspa.1978.0106
- Mohammadi B., Khoddami A. Representative volume element-based simulation of multiple solid particles erosion of a compressor blade considering temperature effect // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. 2020. V. 234. N 8. P. 1173–1184. https://doi.org/10.1177/1350650119884825
- Taherkhani B., Anaraki A.P., Kadkhodapour J., Farahani N., Tu H. Erosion due to solid particle impact on the turbine blade: experiment and simulation // Journal of Failure Analysis and Prevention. 2019. V. 19. N 6. P. 1739–1744. https://doi.org/10.1007/s11668-019-00775-y
- Wu B., Wu F., Li J. Finite Element Modeling of Correlating Mechanical Properties with Erosion Wear Rate // Proc. of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Electrical, Automation and Mechanical Engineering (EAME 2018). 2018. P. 273–276. https://doi. org/10.2991/eame-18.2018.57
- Khoddami A.S., Salimi-Majd D., Mohammadi B. Finite element and experimental investigation of multiple solid particle erosion on Ti-6Al-4V titanium alloy coated by multilayer wear-resistant coating // Surface and Coatings Technology. 2019. V. 372. P. 173–189. https:// doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.05.042
- 18. Petrov Y.V., Bragov A.M., Kazarinov N.A., Evstifeev A.D. Experimental and numerical analysis of the highspeed deformation and erosion

#### References

- . Borkova A.N. *Erosion resistance of the aircraft materials upon collision with solid (dust) particles*. Abstract of a dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Moscow, 2006, 26 p. (in Russian)
- Kleis I.R. Some research on abrasive erosion. Dissertation for the degree of doctor of technical sciences. Moscow, 1970, 250 p. (in Russian)
- Kramchenkov E.M. *Investigation of the erosive wear of materials*. Abstract of a dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Moscow, 1995, 26 p. (in Russian)
- Strokach E., Kozhevnikov G., Pozhidaev A., Dobrovolsky S. Numerical study of titanium alloy high-velocity solid particle erosion. *Obrabotka metallov-Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 4, pp. 268–283. https://doi.org/10.17212/1994-6309-2023-25.4-268-283
- Strokach E., Kozhevnikov G., Pozhidaev A. Numerical simulation of solid particle erosion in a gaseous flow (review). *Vestnik PNIPU. Ajerokosmicheskaja tehnika*, 2021, no. 67, pp. 56–69. (in Russian). https://doi.org/10.15593/2224-9982/2021.67.06
- Liu Y., Cao Z., Yuan J., Sun X., Su H., Wang L. Effect of morphology, impact velocity and angle of the CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> (CMAS) particle on the erosion behavior of Thermal Barrier Coatings (TBCs): a finite element simulation study. *Coatings*, 2022, vol. 12, no. 5, pp. 576. https://doi.org/10.3390/coatings12050576
- Ma Z.S., Fu L.H., Yang L., Zhou Y.C., Lu C. Finite Element Simulations on Erosion and Crack Propagation in Thermal Barrier Coatings. *High Temperature Materials and Processes*, 2015, vol. 34, no. 4, pp. 387–393. https://doi.org/10.1515/htmp-2014-0068
- Oviedo F., Valarezo A. Residual stress in high-velocity impact coatings: parametric finite element analysis approach. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2020, vol. 29, no. 6, pp. 1268–1288. https://doi.org/10.1007/s11666-020-01026-5
- Liu Z.G., Wan S., Nguyen V.B., Zhang Y.W. Finite element analysis of erosive wear for offshore structure. *Proc. of the 13<sup>th</sup> International Conference on Fracture*, 2013, pp. 461–468.
- ElTobgy M.S., Ng E., Elbestawi M.A. Finite element modeling of erosive wear. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, vol. 45, no. 11, pp. 1337–1346. https://doi. org/10.1016/j.ijmachtools.2005.01.007
- Singh P.K., Hota A.R., Mishra S.B. Finite element modelling of erosion parameters in boiler components. *Asian Journal of Engineering and Applied Technology*, 2018, vol. 7, no. S2, pp. 12–16. https://doi.org/10.51983/ajeat-2018.7.2.964
- Du M., Li Z., Feng L., Dong X., Che J., Zhang Y. Numerical simulation of particle fracture and surface erosion due to single particle impact. *AIP Advances*, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 035218. https://doi.org/10.1063/5.0042928
- Evans A.G., Gulden M.E., Rosenblatt M. Impact damage in brittle materials in the elastic-plastic response régime. *Proc. of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering sciences*, 1978, vol. 361, no. 1706, pp. 343–365. https://doi.org/10.1098/rspa.1978.0106
- Mohammadi B., Khoddami A. Representative volume element-based simulation of multiple solid particles erosion of a compressor blade considering temperature effect. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2020, vol. 234, no. 8, pp. 1173–1184. https://doi. org/10.1177/1350650119884825
- Taherkhani B., Anaraki A.P., Kadkhodapour J., Farahani N., Tu H. Erosion due to solid particle impact on the turbine blade: experiment and simulation. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2019, vol. 19, no. 6, pp. 1739–1744. https://doi.org/10.1007/s11668-019-00775-y
- Wu B., Wu F., Li J. Finite Element Modeling of Correlating Mechanical Properties with Erosion Wear Rate. *Proc. of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Electrical, Automation and Mechanical Engineering (EAME 2018)*, 2018, pp. 273–276. https://doi. org/10.2991/eame-18.2018.57
- Khoddami A.S., Salimi-Majd D., Mohammadi B. Finite element and experimental investigation of multiple solid particle erosion on Ti-6Al-4V titanium alloy coated by multilayer wear-resistant coating. *Surface and Coatings Technology*, 2019, vol. 372, pp. 173–189. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.05.042
- 18. Petrov Y.V., Bragov A.M., Kazarinov N.A., Evstifeev A.D. Experimental and numerical analysis of the highspeed deformation and erosion

damage of the titanium alloy VT-6 // Physics of the Solid State. 2017. V. 59. N 1. P. 93–97. https://doi.org/10.1134/S1063783417010267

- Balu P., Kong F., Hamid S., Kovacevic R. Finite element modeling of solid particle erosion in AISI 4140 steel and nickel-tungsten carbide composite material produced by the laser-based powder deposition process // Tribology International. 2013. V. 62. P. 18–28. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.01.021
- Liu Z.G., Wan S., Nguyen V.B., Zhang Y.W. A numerical study on the effect of particle shape on the erosion of ductile materials // Wear. 2014. V. 313. N 1–2. P. 135–142. https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.03.005
- Zhang H., Dong X. Finite element analysis of multiple solid particles erosion in cermet coating // Surface and Coatings Technology. 2015. V. 262. P. 184–190. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.12.040
- Mei Y., Dong X. Angular particle impact on ductile materials using the Lagrangian gradient smoothing method // Tribology Transactions. 2021. V. 64. N 6. P. 1149–1165. https://doi.org/10.1080/10402004.2 021.1944709
- Zheng C., Liu Y., Chen C., Qin J., Ji R., Cai B. Numerical study of impact erosion of multiple solid particle // Applied Surface Science. 2017. V. 423. P. 176–184. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.06.132
- Zang X., Cao X., Xie Z., Zhang J., Darihaki F., Liu Y. Surface deformation under overlapping impacts of solid particles // Friction. 2023. V. 11. N 2. P. 280–301. https://doi.org/10.1007/s40544-021-0600-2
- Chen J., He G., Han Y., Yuan Z., Li Z., Zhang Z., Han X., Yan S. Structural toughness and interfacial effects of multilayer TiN erosionresistant coatings based on high strain rate repeated impact loads // Ceramics International. 2021. V. 47. N 19. P. 27660–27667. https:// doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.06.190
- Di J., Wang S., Zhang L., Cai L., Xie Y. Study on the erosion characteristics of boride coatings by finite element analysis // Surface and Coatings Technology. 2018. V. 333. P. 115–124. https://doi. org/10.1016/j.surfcoat.2017.10.042
- Yu Q.M., He Q., Ning F.L. Influence of interface morphology on erosion failure of thermal barrier coatings // Ceramics International. 2018. V. 44. N 17. P. 21349–21357. https://doi.org/10.1016/j. ceramint.2018.08.188
- Zhang H., Li Z., He W., Liao B., He G., Cao X., Li Y. Damage evolution and mechanism of TiN/Ti multilayer coatings in sand erosion condition // Surface and Coatings Technology. 2018. V. 353. P. 210–220. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.08.062
- Fang Z., Chen J., He W., Yang Z., Yuan Z., Geng M., He G. Study on the damage mechanism of TiN/Ti coatings based on multi-directional impact // Coatings. 2019. V. 9. N 11. P. 765. https://doi.org/10.3390/ coatings9110765
- Lesnevskiy L.N., Lyakhovetskiy M.A., Kozhevnikov G.D. Ushakov A.M. Research of the AK4-1 alloy microarc oxidation modes effect on the composite ceramic coatings erosion resistance // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1281. N 1. P. 012048. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1281/1/012048
- 31. Гурин В.Г. Исследование процессов разрушения при высокоскоростной эрозии материалов: дипломная работаю СПб., 2017 [Электронный ресурс]. https://dspace.spbu.ru/bitstream/11701/10536/1/ tekst\_diploma.pdf (дата обращения: 05.01.2023).
- Tarodiya R., Levy A. Surface erosion due to particle-surface interactions – A review // Powder Technology. 2021. V. 387. P. 527– 559. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.04.055
- ANSYS Explicit Dynamics Analysis Guide. Release 2020 R2, July 2020.
- 34. Wilkins M.L. Calculation of Elastic-plastic Flow. Lawrence Livermore Laboratory, University of California, 1969. 99 p.
- Li Q, Jing L, Sun Q, Ji L., Chen S. The finite element modeling of the impacting process of hard particles on pump components // Open Physics. 2022. V. 20. N 1. P. 596–608. https://doi.org/10.1515/phys-2022-0048
- 36. Dong X., Li Z., Zhang Q., Zeng W., Liu GR. Analysis of surfaceerosion mechanism due to impacts of freely rotating angular particles using smoothed particle hydrodynamics erosion model // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. 2017. V. 231. N 12. P. 1537–1551. https://doi. org/10.1177/1350650117700
- Zheng C., Liu Y., Chen C., Qin J., Zhang S. Finite element analysis on the dynamic erosion process using multiple-particle impact model // Powder Technology. 2017. V. 315. P. 163–170. https://doi. org/10.1016/j.powtec.2017.04.016
- Hadavi V., Moreno C.E., Papini M. Numerical and experimental analysis of particle fracture during solid particle erosion, part I:

damage of the titanium alloy VT-6. *Physics of the Solid State*, 2017, vol. 59, no. 1, pp. 93–97. https://doi.org/10.1134/S1063783417010267

- Balu P., Kong F., Hamid S., Kovacevic R. Finite element modeling of solid particle erosion in AISI 4140 steel and nickel-tungsten carbide composite material produced by the laser-based powder deposition process. *Tribology International*, 2013, vol. 62, pp. 18–28. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.01.021
- Liu Z.G., Wan S., Nguyen V.B., Zhang Y.W. A numerical study on the effect of particle shape on the erosion of ductile materials. *Wear*, 2014, vol. 313, no. 1–2, pp. 135–142. https://doi.org/10.1016/j. wear.2014.03.005
- Zhang H., Dong X. Finite element analysis of multiple solid particles erosion in cermet coating. *Surface and Coatings Technology*, 2015, vol. 262, pp. 184–190. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.12.040
- Mei Y., Dong X. Angular particle impact on ductile materials using the Lagrangian gradient smoothing method. *Tribology Transactions*, 2021, vol. 64, no. 6, pp. 1149–1165. https://doi.org/10.1080/104020 04.2021.1944709
- Zheng C., Liu Y., Chen C., Qin J., Ji R., Cai B. Numerical study of impact erosion of multiple solid particle. *Applied Surface Science*, 2017, vol. 423, pp. 176–184. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.06.132
- Zang X., Cao X., Xie Z., Zhang J., Darihaki F., Liu Y. Surface deformation under overlapping impacts of solid particles. *Friction*. 2023, vol. 11, no. 2, pp. 280–301. https://doi.org/10.1007/s40544-021-0600-2
- 25. Chen J., He G., Han Y., Yuan Z., Li Z., Zhang Z., Han X., Yan S. Structural toughness and interfacial effects of multilayer TiN erosionresistant coatings based on high strain rate repeated impact loads. *Ceramics International*, 2021, vol. 47, no. 19, pp. 27660–27667. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.06.190
- 26. Di J., Wang S., Zhang L., Cai L., Xie Y. Study on the erosion characteristics of boride coatings by finite element analysis. *Surface* and Coatings Technology, 2018, vol. 333, pp. 115–124. https://doi. org/10.1016/j.surfcoat.2017.10.042
- Yu Q.M., He Q., Ning F.L. Influence of interface morphology on erosion failure of thermal barrier coatings. *Ceramics International*, 2018, vol. 44, no. 17, pp. 21349–21357. https://doi.org/10.1016/j. ceramint.2018.08.188
- Zhang H., Li Z., He W., Liao B., He G., Cao X., Li Y. Damage evolution and mechanism of TiN/Ti multilayer coatings in sand erosion condition. *Surface and Coatings Technology*, 2018, vol. 353, pp. 210–220. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.08.062
- Fang Z., Chen J., He W., Yang Z., Yuan Z., Geng M., He G. Study on the damage mechanism of TiN/Ti coatings based on multi-directional impact. *Coatings*, 2019, vol. 9, no. 11, pp. 765. https://doi. org/10.3390/coatings9110765
- Lesnevskiy L.N., Lyakhovetskiy M.A, Kozhevnikov G.D. Ushakov A.M. Research of the AK4-1 alloy microarc oxidation modes effect on the composite ceramic coatings erosion resistance. *Journal of Physics: Conference Series*, 201, vol. 1281, no. 1, pp. 012048. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1281/1/012048
- Gurin V. Investigation of fracture processes at high-rate erosion of materials. Graduation Thesis. St. Petersburg, 2017. Available: https:// dspace.spbu.ru/bitstream/11701/10536/1/tekst\_diploma.pdf (accessed: 05.01.2023). (in Russian)
- Tarodiya R., Levy A. Surface erosion due to particle-surface interactions — A review. *Powder Technology*, 2021, vol. 387, pp. 527–559. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.04.055
- ANSYS Explicit Dynamics Analysis Guide, Release 2020 R2, July 2020.
- 34. Wilkins M.L. *Calculation of Elastic-plastic Flow*. Lawrence Livermore Laboratory, University of California, 1969, 99 p.
- 35. Li Q, Jing L, Sun Q, Ji L., Chen S. The finite element modeling of the impacting process of hard particles on pump components. *Open Physics*, 2022, vol. 20, no. 1, pp. 596–608. https://doi.org/10.1515/ phys-2022-0048
- 36. Dong X., Li Z., Zhang Q., Zeng W., Liu GR. Analysis of surfaceerosion mechanism due to impacts of freely rotating angular particles using smoothed particle hydrodynamics erosion model. *Proceedings* of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2017, vol. 231, no. 12, pp. 1537–1551. https:// doi.org/10.1177/1350650117700
- Zheng C., Liu Y., Chen C., Qin J., Zhang S. Finite element analysis on the dynamic erosion process using multiple-particle impact model. *Powder Technology*, 2017, vol. 315, pp. 163–170. https://doi. org/10.1016/j.powtec.2017.04.016

Modeling and experimental verification // Wear. 2016. V. 356–357. P. 135–145. https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.03.008

- Abubakar A.A., Arif A.F.M., Akhtar S.S., Mostaghimi J. Splats formation, interaction and residual stress evolution in thermal spray coating using a hybrid computational model // Journal of Thermal Spray Technology. 2019. V. 28. N 3. P. 359–377. https://doi. org/10.1007/s11666-019-00828-6
- Dong X., Li Z., Feng L., Sun Z., Fan C. Modeling, simulation, and analysis of the impact(s) of single angular-type particles on ductile surfaces using smoothed particle hydrodynamics // Powder Technology. 2017. V. 318. P. 363–382. https://doi.org/10.1016/j. powtec.2017.06.011
- 41. Урбанович Л.И., Крамченков Е.М., Чуносов Ю.Н. Разогрев твердого тела в зоне удара эродирующей твердой частицы // Трение и износ. 1994. Т. 15. № 6. С. 965–972.
- Chowdhury M.A., Debnath U.K., Nuruzzaman D.M., Islam M.M. Experimental analysis of aluminum alloy under solid particle erosion process // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. 2016. V. 230. N 12. P. 1516– 1541. https://doi.org/10.1177/1350650116639466
- Finnie I. Erosion of surfaces by solid particles Oberflächenerosion durch feste teilchen // Wear. 1960. V. 3. N 2. P. 87–103. https://doi. org/10.1016/0043-1648(60)90055-7
- 44. Oka Y.I., Yoshida T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 2: Mechanical properties of materials directly associated with erosion damage // Wear. 2005. V. 259. N 1–6. P. 102–109. https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.01.040
- 45. ANSYS Fluent Theory Guide. Canonsburg, PA: ANSYS Inc, 2022. 1080 p.
- Laguna-Camacho J., Martínez-García H., Escamilla-Rodríguez F., Alarcón-Rosas C., Calderón-Ramón C., Ríos-Velasco L., Pelcastre-Lozano M., Casados-Sánchez Á., González-Gómez M. Erosion Behavior of AISI 6061-T6 // Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology. 2015. V. 5. P. 136–146. https://doi. org/10.4236/jsemat.2015.53015
- 47. Тхабисимов А.Б. Повышение абразивной стойкости лопаточного аппарата первых ступеней цилиндров высокого и среднего давления мощных паровых турбин: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Национальный исследовательский университет МЭИ. М., 2016. 179 с.
- Петров Ю.В., Атрошенко С.А., Казаринов Н.А., Евстифеев А.Д., Соловьев В.Ю. Динамическое разрушение поверхности сплава алюминия в условиях высокоскоростной эрозии // Физика твердого тела. 2017. Т. 59. № 4. С. 648–652. https://doi.org/10.21883/ FTT.2017.04.44264.173
- Евстифеев А.Д., Смирнов И.В. Особенности эрозионного разрушения металлических материалов при воздействии потока твердых частиц // Физическая мезомеханика. 2021. Т. 24. № 2. С. 5–12. https://doi.org/10.24412/1683-805X-2021-2-5-12
- Евстифеев А.Д., Смирнов И.В., Петров Ю.В. Влияние динамической прочности материала на его эрозионную стойкость // Физика твердого тела. 2020. Т. 62. № 10. С. 1569–1572. https://doi. org/10.21883/FTT.2020.10.49897.088
- Sezer H., Fidan S. Solid Particle Erosion Effects On Surface Plastic Deformation Of Alüminum Alloy // El-Cezerî Journal of Science and Engineering. 2018. V. 5. N 1. P. 243–250. https://doi.org/10.31202/ ecjse.364685

#### Авторы

Строкач Евгений Александрович — кандидат технических наук, ведущий инженер, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, 125993, Российская Федерация, sc 57197801332, https://orcid.org/0000-0001-5376-1231, evgenij.strokatsch@mai.ru

**Пожидаев Алексей Алексеевич** — ассистент, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, 125993, Российская Федерация, https://orcid.org/0000-0002-7667-5392, aapozhidaev@mai.ru

Статья поступила в редакцию 22.07.2024 Одобрена после рецензирования 04.11.2024 Принята к печати 24.01.2025



- Hadavi V., Moreno C.E., Papini M. Numerical and experimental analysis of particle fracture during solid particle erosion, part I: Modeling and experimental verification. *Wear*, 2016, vol. 356–357, pp. 135–145. https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.03.008
- Abubakar A.A., Arif A.F.M., Akhtar S.S., Mostaghimi J. Splats formation, interaction and residual stress evolution in thermal spray coating using a hybrid computational model. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2019, vol. 28, no. 3, pp. 359–377. https://doi. org/10.1007/s11666-019-00828-6
- Dong X., Li Z., Feng L., Sun Z., Fan C. Modeling, simulation, and analysis of the impact(s) of single angular-type particles on ductile surfaces using smoothed particle hydrodynamics. *Powder Technology*, 2017, vol. 318, pp. 363–382. https://doi.org/10.1016/j. powtec.2017.06.011
- Urbanovich L.I., Kramchenkov E.M., Chunosov Iu.N. Solid body heating in the impact zone of an eroding solid particle. *Trenie i Iznos*, 1994, vol. 15, no. 6, pp. 965–972. (in Russian)
- Chowdhury M.A., Debnath U.K., Nuruzzaman D.M., Islam M.M. Experimental analysis of aluminum alloy under solid particle erosion process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2016, vol. 230, no. 12, pp. 1516–1541. https://doi.org/10.1177/1350650116639466
- Finnie I. Erosion of surfaces by solid particles Oberflächenerosion durch feste teilchen. Wear, 1960, vol. 3, no. 2, pp. 87–103. https://doi. org/10.1016/0043-1648(60)90055-7
- 44. Oka Y.I., Yoshida T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 2: Mechanical properties of materials directly associated with erosion damage. *Wear*, 2005, vol. 259, no. 1–6, pp. 102–109. https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.01.040
- ANSYS Fluent Theory Guide. Canonsburg, PA: ANSYS Inc, 2022. 1080 p.
- Laguna-Camacho J., Martínez-García H., Escamilla-Rodríguez F., Alarcón-Rosas C., Calderón-Ramón C., Ríos-Velasco L., Pelcastre-Lozano M., Casados-Sánchez Á., González-Gómez M. Erosion Behavior of AISI 6061-T6. *Journal of Surface Engineered Materials* and Advanced Technology, 2015, vol. 5, pp. 136–146. https://doi. org/10.4236/jsemat.2015.53015
- 47. Tkhabisimov A.B. *Improving the the blade apparatus abrasive resistance at the first stages of high and medium pressure cylinders of the powerful steam turbines*. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Moscow, 2016, 179 p. (in Russian)
- Petrov Y.V., Atroshenko S.A., Kazarinov N.A., Evstifeev A.D., Solov'ev V.Y. Dynamic fracture of the surface of an aluminum alloy under conditions of high-speed erosion. *Physics of the Solid State*, 2017, vol. 59, no. 4, pp. 661–666. https://doi.org/10.1134/ S1063783417040175
- Evstifeev A.D., Smirnov I.V. Features of Solid Particle Erosion of Metals. *Physical Mesomechanics*, 2022, vol. 25, no. 1, pp. 12–17. https://doi.org/10.1134/S1029959922010027.
- Evstifeev A.D., Smirnov I.V., Petrov Y.V. Effect of Dynamic Strength of a Material on Its Erosion Resistance. *Physics of the Solid State*, 2020, vol. 62, no. 10, pp. 1737–1740. https://doi.org/10.1134/ S1063783420100066
- Sezer H., Fidan S. Solid Particle Erosion Effects On Surface Plastic Deformation Of Alüminum Alloy. *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, 2018, vol. 5, no. 1, pp. 243–250. https://doi. org/10.31202/ecjse.364685

#### Authors

**Evgeny A. Strokach** — PhD, Leading Engineer, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation, SS 57197801332, https://orcid.org/0000-0001-5376-1231, evgenij.strokatsch@mai.ru

Alexei A. Pozhidaev — Assistant, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation, https://orcid. org/0000-0002-7667-5392, aapozhidaev@mai.ru

Received 22.07.2024 Approved after reviewing 04.11.2024 Accepted 24.01.2025

Работа доступна по лицензии Creative Commons «Attribution-NonCommercial» **VİTMO** 

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ январь-февраль 2025 Том 25 № 1 http://ntv.ifmo.ru/ SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS January-February 2025 Vol. 25 No 1 http://ntv.ifmo.ru/en/ ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКІ

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-151-159 УДК 004.9

## Подход к решению проблемы дефицита геомагнитных данных в задачах поддержки принятия решений Гульнара Равилевна Воробьева<sup>1</sup>, Андрей Владимирович Воробьев<sup>2</sup>, Эмиль Фанильевич Фарваев<sup>3⊠</sup>

1,2,3 Уфимский университет науки и технологий, Уфа, 450008, Российская Федерация

<sup>1</sup> gulnara.vorobeva@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-7878-9724

<sup>2</sup> geomagnet@list.ru, https://orcid.org/0000-0002-9680-5609

<sup>3</sup> farvaev.emil@gmail.com<sup>\Box</sup>, https://orcid.org/0009-0001-4107-8950

#### Аннотация

Введение. Одной из главных проблем применения данных в задачах поддержки принятия решений является их дефицит в определенных пространственных точках/областях ввиду невозможности проведения соответствующих измерений. Примером этого являются данные о состоянии магнитного поля Земли (геомагнитные данные), на основании которых принимаются решения для сокращения негативного воздействия экстремальных геофизических событий на объекты и системы техносферы (линии электропередач, системы связи, автоматика железных дорог и пр.). Анализ существующей инфраструктуры сбора геомагнитных данных с позиций системного анализа позволил идентифицировать неполное покрытие сетью мониторинга, что негативно сказывается на принятии решений при обеспечении техносферной безопасности в пространственных областях. На примере геомагнитных данных выявлено, что известные методы интерполяции, не учитывающие особенности пространственно-временных характеристик описываемых данными процессов и их зависимость от внешних факторов, недостаточно эффективно справляются с поставленной задачей. Метод. Для решения обозначенной проблемы предложен подход к адаптивной пространственной интерполяции, основной идеей которого является динамический подбор методов интерполяции, наиболее эффективных при различных факторах. Для примера геомагнитных данных в качестве таких факторов выбраны принадлежность пространственной точки определенной широтной зоне и индекс геомагнитной активности в рассматриваемый период времени. Основные результаты. Для оценки предлагаемого решения разработан прототип веб-ориентированного приложения. Эксперимент проведен с использованием геомагнитной информации проекта SuperMAG. При сравнении среднеквадратической ошибки интерполяции применение предлагаемого подхода показало большую эффективность, чем применение какого-либо отдельного метода интерполяции. Обсуждение. Предложенная адаптивная интерполяция может быть использована в системах, реализующих интерполяцию геопространственных данных, как альтернатива стандартным методам интерполяции, с целью повышения точности восстановления данных. Сделан вывод, что при работе с геомагнитными данными могут быть использованы данные о широтной зоне и геомагнитной активности. Интерполяция данных иной природы может потребовать предварительного анализа для выявления значимых факторов.

#### Ключевые слова

геопространственные данные, геомагнитные данные, системный анализ, пространственная интерполяция, поддержка принятия решений, веб-приложения

#### Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00143, https://rscf.ru/ project/25-21-00143/.

Ссылка для цитирования: Воробьева Г.Р., Воробьев А.В., Фарваев Э.Ф. Подход к решению проблемы дефицита геомагнитных данных в задачах поддержки принятия решений // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 1. С. 151–159. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-151-159

<sup>©</sup> Воробьева Г.Р., Воробьев А.В., Фарваев Э.Ф., 2025

# An approach to solving the problem of geomagnetic data scarcity in decision-making support

## Gulnara R. Vorobeva<sup>1</sup>, Andrei V. Vorobev<sup>2</sup>, Emil F. Farvaev<sup>3</sup>

1,2,3 Ufa University of Science and Technology, Ufa, 450008, Russian Federation

<sup>1</sup> gulnara.vorobeva@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-7878-9724

#### Abstract

One of the main problems of using data in decision-making support is their scarcity in certain spatial points/areas due to the inability to carry out appropriate measurements. An example is the Earth's magnetic field data (geomagnetic data) which is used to make decisions to reduce the extreme geophysical events negative impact on objects and systems of the technosphere (power lines, communication systems, railway automation, etc.). An analysis of the existing geomagnetic data collection infrastructure from the standpoint of system analysis made it possible to identify incomplete coverage of the monitoring network, which negatively affects decision-making to ensure technosphere security in the relevant spatial areas. Using the example of geomagnetic data, it was revealed that the known interpolation methods, which do not take into account the features of the spatiotemporal characteristics of the processes described by the data and their dependence on external factors, do not deal effectively with the task. To solve this problem, an approach to adaptive spatial interpolation is proposed the main idea of which is the dynamic selection of interpolation methods that are most effective for various factors. For an example of geomagnetic data two factors were chosen: the affiliation of a spatial point to a certain latitude zone and the index of geomagnetic activity in the time period under consideration. To evaluate the proposed solution, a prototype of a web-based application was developed. The experiment was conducted using geomagnetic information from the SuperMAG project. The proposed approach has proved to be more effective than using any separate interpolation method when comparing the root-mean-square errors. Adaptive interpolation proposed in this paper can be used in systems implementing interpolation of geospatial data, as an alternative to standard interpolation methods, in order to increase the accuracy of data recovery. When working with geomagnetic data, the factors considered in this work (latitudinal zones and geomagnetic activity) can be used, but interpolation of data of a different nature will require preliminary analysis to identify significant factors.

#### Keywords

geospatial data, geomagnetic data, system analysis, spatial interpolation, decision support, web applications

#### Acknowledgements

The study was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, project No. 25-21-00143, https://rscf.ru/project/25-21-00143/.

For citation: Vorobeva G.R., Vorobev A.V., Farvaev E.F. An approach to solving the problem of geomagnetic data scarcity in decision-making support. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2025, vol. 25, no. 1, pp. 151–159 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-151-159

#### Введение

В настоящее время наблюдается активное развитие систем поддержки принятия решений, базирующихся на применении геопространственных данных различного прикладного назначения. Как правило, такие данные являются результатом наблюдений и/или регистрации параметров различных процессов и явлений с использованием, например, информационно-измерительных устройств, размещаемых в некоторых точках пространства (или пространственных областях), однозначно задаваемых координатами в соответствующей координатной (обычно геодезической) системе.

Типичным примером пространственных данных являются результаты наблюдения геомагнитного поля и его вариаций. В контексте поддержки принятия решений данные такого типа используются для повышения безопасности эксплуатирования объектов и систем техносферы в условиях экстремальной геофизической обстановки (например, сильной магнитной бури) [1, 2]. Во избежание подобных ситуаций оператору подстанции необходимо снизить мощность источников, ориентируясь, в частности, на актуальную информацию о геомагнитной обстановке в соответствующем пространственном регионе. Если размещение магнитометрических измерительных устройств затруднено или невозможно (что часто бывает, например, в суровых условиях арктического региона Земли), то наблюдается дефицит данных, необходимых для принятия решения.

Для решения обозначенной проблемы необходим метод, обеспечивающий непрерывность сети мониторинга геомагнитных параметров на основе известных данных с учетом особенностей пространственно-временной анизотропии соответствующего процесса. Фактически предполагается, что данные по параметру геомагнитного поля должны быть получены в любой пространственной точке, независимо от наличия магнитометрической аппаратуры. Мультиаспектный анализ известных решений геомагнитного мониторинга также ставит своей целью выявление основных проблем и перспективных направлений его развития с повышением эффективности соответствующих источников геомагнитных данных для конечных потребителей.

Целью работы является сравнение и анализ существующих методов интерполяции на наборах геомагнитных данных и реализация алгоритма адаптивной интерполяции на основе полученных результатов.

#### Состояние вопроса

Проблема дефицита геомагнитных данных известна достаточно давно и активно изучается, в том числе с точки зрения системного анализа [3, 4] соответствующих сетей мониторинга. Геомагнитные данные интерполируются известными детерминированными и статистическими методами. В первом случае для получения искомых данных используются функции расстояния между опорными точками — учитывается взаимное расположение искомых и известных пространственных объектов. Во втором случае применяются функции статистического пространственного сходства, которые рассчитываются как глобальные характеристики множества объектов при восприятии свойств отдельных объектов. Кроме того, известны математические модели и методы, обеспечивающие расчет параметров невозмущенного магнитного поля. Примером является IGRF (International Geomagnetic Reference Field) — модель, разработанная Международной ассоциацией геомагнетизма и аэрономии и обновляемая каждые пять лет на основании наблюдений параметров магнитного поля Земли и его вариаций [3, 4]. Модель IGRF используется для расчета параметров главного магнитного поля на основании значений пространственных координат и анализируемого временного параметра. Однако модели подобного рода неприменимы в условиях неспокойной магнитосферы, а также в определенных широтных областях, где вариабельность поля плохо поддается прогнозу. Их возможно использовать в качестве эталона, но на практике применение полученных значений для принятия решений в критических ситуациях может быть сопряжено с серьезными последствиями [5, 6].

Для количественной оценки эффективности известных методов интерполяции применительно к геомагнитным данным была проведена серия вычислительных экспериментов над годовыми результатами наблюдений параметров геомагнитного поля магнитными обсерваториями проекта SuperMAG<sup>1</sup>. На примере детерминированных и статистических методов интерполяции была рассчитана среднеквадратическая ошибка, значение которой составило в среднем от 3,8 до 11,8 нТл (табл. 1), что существенно превышает допустимую геофизическими нормативами величину.

Отметим, что в случае кратковременного отсутствия геомагнитных данных в отдельных случаях возможно их восстановление известными методами интерполяции временных рядов. Однако при существенных пропусках или отсутствии измерительного оборудования в каждой точке поверхности Земли, рассмотренные методы теряют свою эффективность. Кроме того, методы наилучшим образом применимы к относительно регулярным сетям мониторинга с минимальной анизотропией атрибутивных значений. Например, для геомагнитных данных, для которых атрибутивные значения напрямую зависят от комплекса внутренних и внешних факторов, а также региона наблюдения, такие методы интерполяции применять неэффективно. При этом, как показали

| Габлица | 1. C | равнит  | ельная | оценка  | методов | интерп | оляции |
|---------|------|---------|--------|---------|---------|--------|--------|
| 1       | прим | ленител | тьно к | геомагн | итным д | анным  |        |

*Table 1.* Comparative evaluation of interpolation methods applied to geomagnetic data

| Методы интерполяции геомагнит-<br>ных данных | Среднеквадратическая<br>ошибка, нТл |
|--|-------------------------------------|
| Линейная интерполяция                        | 11,8                                |
| Обратно взвешенных расстояний                | 10,9                                |
| Полиномиальная регрессия                     | 8,6                                 |
| Триангуляция Делоне                          | 3,8                                 |
| Кригинг                                      | 4,9                                 |
| Метод Шепарда                                | 10,9                                |
| Радиальная интерполяция                      | 10,1                                |
| Метод градиентных плоскостей                 | 10,6                                |
| Метод сплайнов                               | 11,3                                |
| Метод трендов                                | 10,9                                |

исследования, рассмотренные методы можно считать эффективными локально: для небольшого набора точек; для относительно регулярной опорной сети точек; для данных, демонстрирующих сравнительно низкую анизотропию внутри некоторого пространственного региона.

В результате анализа методов можно сделать вывод, что необходим подход, который позволит эффективно (с точки зрения минимизации ошибки) восстанавливать данные (в том числе геомагнитные) и будет учитывать специфику внешних факторов и особенности пространственного распределения параметров описываемого процесса/явления/события.

#### Подход к интерполяции геомагнитных данных

Пусть известны значения пространственно-зависимого компонента вектора геомагнитного поля **H** в опорных *n* пространственных точках, каждая из которых задана парой географических координат — широты и долготы вида  $(x_n, y_n)$ . Тогда в результате пространственной интерполяции необходимо определить значение вектора геомагнитного поля **H** в произвольной точке с координатами  $(x_0, y_0)$  в форме соответствующей оценки **H**\*:

$$\exists \{\mathbf{H}(x_1, y_1), \dots, \mathbf{H}(x_n, y_n)\}; \mathbf{H}(x_0, y_0) \approx \mathbf{H}^*(x_0, y_0).$$

При этом известно, что все компоненты вектора геомагнитного поля связаны между собой соотношениями вида:

$$F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} = \sqrt{G^2 + Z^2},$$
  

$$G = F\cos I, Z = F\sin I, X = G\cos D, Y = G\sin D,$$
 (1)

где X, Y — величины северного и восточного компонентов (оси измерения указывают в направлениях географических севера и востока); Z — величина вертикального компонента (ось указывает вниз, к поверхности Земли); G — величина горизонтального компонента

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://supermag. jhuapl.edu/mag/ (дата обращения: 30.08.2024).

(ось указывает в направлении магнитного севера); *F* — величина полного вектора напряженности; *D* — склонение; *I* — наклонение.

Если отсутствует значение одного из компонент, но другие составляющие известны, то недостающие данные могут быть получены из соотношений (1). Задача интерполяции в этом случае не ставится, поскольку данные в искомой точке восстанавливаются по известным значениям в этой же пространственной точке в соответствии с известными математическими моделями поля. В этой связи здесь и далее представляется целесообразным рассматривать задачу, в которой для искомой произвольной пространственной точки отсутствуют какие-либо значения по геомагнитному полю и его вариациям.

Пространственная анизотропия геомагнитного поля является основанием для выделения пространственных регионов, в которых параметры магнитного поля Земли характеризуются относительной однородностью и демонстрируют схожую динамику изменений под воздействием одних и тех же внешних факторов. Оценка степени связности соответствующих пространственно-временных рядов была проведена посредством анализа энтропийных характеристик опорных источников геомагнитной информации. Вычислительный эксперимент был проведен на основании результатов наблюдений нескольких магнитных обсерваторий, расположенных в пределах одной долготы и распределенных по широте с шагом порядка 3°45'. Расчет информационной энтропии Шеннона показал, что наименьшая неопределенность наблюдается в районе средних широт (46°54' N) и возрастает по направлению к высоким и низким широтам (рис. 1, а). Аналогичные исследования, приведенные для других значений широт, показали повторяемость полученных зависимостей и подтвердили результаты анализа (рис. 1, *b*).

Соответствующие вычислительные эксперименты были проведены для анализа долготной зависимости информационной энтропии геомагнитных данных. Была установлена сравнительная статичность информационной энтропии по мере изменения долготы при фиксированной географической широте. Важно отметить, что схожие результаты были получены при анализе дополнительных энтропийных характеристик взаимной информации и условной энтропии.

В общем виде полученные результаты теоретико-информационного анализа пары источников геомагнитных данных *X* и *Y* в зависимости от географических широты Lat и долготы Long могут иметь вид:

$$H(X) \rightarrow \min : \text{Lat} \in (44^{\circ}33', 46^{\circ}54'); \text{ Long} \sim \text{const};$$
  

$$H(X) \rightarrow \max : \text{Long} \sim \text{const}, \text{Lat} \rightarrow -90^{\circ};$$
  

$$H(X) \rightarrow \max : \text{Lat} \rightarrow 90^{\circ};$$
  

$$H(X) \rightarrow \text{const} : \forall \text{Long}; \text{Lat} \sim \text{const};$$
  

$$H(Y|X) = \min : Y = X;$$
  

$$H(Y|X) \rightarrow \max: \text{Long} \sim \text{const}; (\text{Lat}_y - \text{Lat}_x) \rightarrow \max;$$
  

$$H(Y|X) \rightarrow \max: \text{Lat} \sim \text{const}; (\text{Long}_y - \text{Long}_x) \rightarrow \max;$$
  

$$H(Y|X) = \max: Y = X;$$

$$I(Y|X) \rightarrow \max: \text{Long} \sim \text{const:} (\text{Lat.} - \text{Lat.}) \rightarrow \max:$$

$$(1 \mu)$$
 mux. Doing const,  $(Duy Dux)$  mux,

 $I(Y|X) \rightarrow \max$ : Lat ~ const;  $(\text{Long}_y - \text{Long}_x) \rightarrow \max$ ,

где H — информационная энтропия Шеннона; I(X, Y) — взаимная информация; H(Y|X) — условная энтропия.

Физическое объяснение полученных результатов теоретико-информационного анализа заключается в том, что значения параметров геомагнитного поля на средних широтах зависят от наименьшего количества факторов. При приближении к полюсам растет вероятность «скачкообразного» их изменения, уровень неопределенности при пространственном прогнозировании значений увеличивается, растет и среднеквадратическая ошибка прогнозирования временного ряда геомагнитных данных [7, 8]. Кроме того, в периоды высокой геомагнитной активности геомагнитные вариации выражены сильнее, чем в магнитоспокойные периоды. Такое поведение параметров магнитного поля связано с увеличением влияния различных внешних факторов при приближении к экватору или полюсам (например, кольцевые токи на экваторе и суббури в полярных областях). При этом на значения параметров геомагнитного поля в пределах одного широтного диапазона оказывают влияние одни и те же внешние факторы (или их совокупность), что приводит к тому, что





энтропия с изменением долготы остается относительно неизменной.

Для минимизации ошибки восстановления данных представляется целесообразным учитывать специфику пространственно-временного распределения параметров геомагнитного поля и его вариаций. В связи с тем, что эффективность различных методов варьируется в зависимости от внешних и внутренних условий, предлагается следующий алгоритм динамического подбора методов интерполяции.

- Проведение серии вычислительных экспериментов для определения эффективности известных методов интерполяции для различного сочетания внешних и внутренних факторов.
- Обучение отдельных моделей пространственной интерполяции на имеющихся наборах пространственных данных (опциональный этап).
- Подготовка пула методов для последующего применения для восстановления атрибутивных значений в произвольных пространственных точках.
- При поступлении запроса на интерполяцию значения в некоторой точке, оценить соответствующие внешние и внутренние факторы и в результате выбрать подходящий метод.

С учетом результатов проведенного теоретико-информационного анализа сеть мониторинга была декомпозирована для трех групп, разделенных по широте на высокоширотные, низкоширотные и приэкваториальные области. Для каждой из трех пространственных групп были проведены вычислительные эксперименты для выявления наиболее эффективных методов пространственной интерполяции для различных широт (данные проекта SuperMAG [9, 10]). В качестве дополнительных параметров использовались данные о значениях планетарного *Кр*-индекса, являющегося индикатором экстремального состояния космической погоды, обуславливающего сильные вариации геомагнитного поля (табл. 2). Стоит отметить, что подход можно расширить, добавив другие дополнительные параметры или изменив декомпозицию пространственных областей.

Для всех проанализированных методов наблюдается повышение значения среднеквадратической ошибки по мере приближения к экстремальным широтам. При этом значительный вклад в результат обработки вносят внешние факторы, такие как уровень геомагнитной активности. Сравнительный анализ позволил ранжировать методы интерполяции по степени ошибки восстановления пространственных данных для разных регионов и определять оптимальные для каждой пространственной области и заданных внешних факторов, снижая общую ошибку интерполяции.

Для пространственной интерполяции магнитных данных в высоких широтах наилучшим методом оказался кригинг [11, 12]. Он основан на вариограмме, которая характеризует пространственную модель опорных (известных) точек. Весовой коэффициент каждой опорной точки зависит от ее территориального расположения относительно интерполируемой точки. Кригинг использует модель пространственной структуры, сформированную свойствами второго порядка — вариограммой или ковариацией по случайной функции [11].

В общем случае при кригинге каждой известной точке присваивается собственный весовой коэффициент. При этом, чем ближе пространственная точка к интерполируемой, тем больше значение соответствующего весового коэффициента [11]. Так, расчет интерполируемого значения  $H^*(x_0, y_0)$  в произвольной точке  $(x_0, y_0)$  по опорным *n* значениям известных точек  $Z(x_i, y_i)$  описывается регрессионным выражением вида [11]:

$$H^*(x_0, y_0) - m(x_0, y_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i [H(x_i, y_i) - m(x_i, y_i)],$$

где  $m(x_i, y_i)$  и  $m(x_0, y_0)$  — математическое ожидание для  $H(x_i, y_i)$  и  $H(x_0, y_0)$ ;  $\lambda_i$  — весовой коэффициент *i*-ой точки.

*Таблица 2*. Сравнительная оценка методов интерполяции применительно к геомагнитным данным с учетом внешних и внутренних факторов. Среднеквадратическая ошибка, нТл

*Table 2.* Comparative evaluation of interpolation methods applied to geomagnetic data, taking into account external and internal factors. Standard error, nT

|                               | Магнитная буря         |        |      |                       |        |       |                           |        |      |
|-------------------------------|------------------------|--------|------|-----------------------|--------|-------|---------------------------|--------|------|
| Методы<br>интерполяции        | Высокоширотные области |        |      | Низкоширотные области |        |       | Приэкваториальные области |        |      |
| ····· op ·······              | сильная                | слабая | нет  | сильная               | слабая | нет   | сильная                   | слабая | нет  |
| Линейная интерполяция         | 5,32                   | 4,16   | 3,23 | 40,10                 | 22,19  | 18,60 | 3,10                      | 2,50   | 1,20 |
| Обратно взвешенных расстояний | 8,45                   | 6,12   | 5,56 | 28,34                 | 20,45  | 17,12 | 5,73                      | 4,80   | 1,51 |
| Полиномиальная регрессия      | 7,15                   | 3,12   | 2,98 | 27,60                 | 15,90  | 10,20 | 5,53                      | 2,41   | 1,78 |
| Триангуляция Делоне           | 3,45                   | 2,19   | 1,82 | 3,50                  | 2,12   | 0,22  | 1,31                      | 0,65   | 0,17 |
| Кригинг                       | 2,51                   | 1,89   | 1,6  | 12,70                 | 10,12  | 7,36  | 1,35                      | 0,97   | 0,54 |
| Метод Шепарда                 | 8,45                   | 6,12   | 5,56 | 28,34                 | 20,45  | 17,12 | 5,73                      | 4,80   | 1,51 |
| Радиальная интерполяция       | 6,97                   | 4,78   | 3,18 | 28,70                 | 15,80  | 10,60 | 12,10                     | 4,86   | 3,21 |
| Метод градиентных плоскостей  | 7,15                   | 6,29   | 4,14 | 28,90                 | 16,20  | 11,80 | 10,40                     | 5,90   | 4,78 |
| Метод сплайнов                | 9,12                   | 7,15   | 5,12 | 27,60                 | 16,98  | 12,10 | 11,50                     | 5,95   | 5,97 |
| Метод трендов                 | 8,97                   | 6,89   | 4,98 | 25,10                 | 16,45  | 11,78 | 11,90                     | 6,30   | 5,30 |

Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2025, том 25, № 1 Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2025, vol. 25, no 1

Отметим, что в разные периоды геомагнитной активности наибольшую эффективность в высокоширотных областях демонстрируют разные типы кригинга. В условиях спокойной магнитосферы наиболее эффективной является простая кригинг-интерполяция, а в условиях неспокойной магнитосферы — универсальная кригинг-интерполяция с трендом.

В случае простой кригинг-интерполяции предполагается, что среднее значение опорных пространственных точек постоянно и известно на всей области исследования (m(z) = m = const для всех z). Простая кригинг-интерполяция удобна для локальной оценки, поскольку ее применение не требует, чтобы среднее было постоянным на всей оцениваемой области, а только в окрестности пространственной точки, для которой выполняется интерполяция [11, 12].

Оценка интерполируемого значения при универсальной кригинг-интерполяции с трендом выполняется посредством определения средневзвешенного значения соответствующих наблюдений. Формируемый при этом тренд определяется как линейная комбинация базисных функций  $f_k(x_0, y_0)$  с коэффициентами  $\beta_k$ , которые неизвестны и постоянны внутри окрестности R оцениваемой точки  $(x_0, y_0)$ :

$$H^*(x_0, y_0) = \sum_{i=1}^n f_k(x_i, y_i) \beta_k + R(x_0, y_0).$$

В низких и средних широтах наилучшие результаты показала интерполяция на основе триангуляции Делоне [13, 14]. При этом формируется треугольник, составленный на основе известных точек  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  (со значениями  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$  соответственно) и включающий интерполируемую точку. Уравнение плоскости для такого треугольника содержит коэффициенты a, b, c, d, определяемые следующим образом:

$$\begin{split} aX+bY+cZ+d &= 0,\\ a &= Y_1(H_2-H_3)+Y_2(H_3-H_1)+Y_3(H_1-H_2),\\ b &= H_1(X_2-X_3)+H_2(X_3-X_1)+H_3(X_1-X_2),\\ c &= X_1(Y_2-Y_3)+X_2(Y_3-Y_1)+X_3(Y_1-Y_2),\\ d &= X_1(Y_2H_3-Y_3H_2)+X_2(Y_3H_1-Y_1H_3)+\\ &+X_3(Y_1H_2-Y_2H_1), \end{split}$$

где  $X_1, Y_1, X_2, Y_2, X_3, Y_3$  — координаты точек  $P_1, P_2, P_3$ ;  $H_1, H_2, H_3$  — значения параметров магнитного поля в точках  $S_1, S_2, S_3$ .

В общем виде модель пространственно-зависимой адаптивной интерполяции геомагнитных данных может быть описана следующей системой соотношений:

$$H^*(x_0, y_0) = \frac{-aX_0 - bY_0 - d}{c} : \text{Lat} \in (-90^\circ, 46^\circ 9'); \forall Kp;$$
$$H^*(x_0, y_0) = \sum_{i=1}^n f_k(x_i, y_i)\beta_k + R(x_0, y_0) : \text{Lat} \to 90^\circ;$$
$$Kp \in [5, 9];$$

$$H^*(x_0, y_0) - m(x_0, y_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i [H(x_i, y_i) - m(x_i, y_i)]: \text{Lat} \to 90^\circ;$$
  
$$Kp \in [0, 4];$$

где *Кр* — индекс планетарной геомагнитной активности.

#### Оценка эффективности решения

Для оценки эффективности предложенного решения был реализован веб-ориентированный исследовательский прототип приложения, архитектура которого представлена на рис. 2. В его основе лежит архитектурный шаблон Model — View — Controller, который разделяет приложение на три компонента: модель, представление и контроллер [15, 16]. Модель отображает схему пространственных данных, их декомпозицию по пространственным признакам и параметрам внешних факторов, а также соответствующие методы интерполяции, полученные в результате анализа их эффективности. В частности, в модель входит объектно-ориентированное отображение этих данных при помощи Object-Relational Mapping (ORM) системы, взаимодействующей с реляционными базами данных [17]. Контроллер взаимодействует с данными и моделью, принимая запросы от клиента, обрабатывая их и формируя результаты. Взаимодействие с клиентом также происходит на уровне запросов. Компонент представления можно рассматривать как опциональный, так как решение представляет наибольший интерес и практическую пользу как удаленная функция для вычисления значения.

Функциональность приложения была реализована в двух формах. С одной стороны, представление обеспечивает передачу HTML-разметки элементов управления и мультимедиакомпонентов на клиентскую сторону для взаимодействия пользователя с результатом после его рендеринга в браузере (рис. 3). С другой стороны, предусмотрена возможность взаимодействия с серверной частью через RESTful API, чтобы стороннее приложение могло получить результат, отправляя запрос сервису [18–20].

Для каждого метода интерполяции был разработан свой серверный модуль, рассчитывающий значение поля в определенной точке на основе известных данных. Также создан серверный сценарий, выбирающий наиболее эффективный метод интерполяции в зависимости от внешних (геомагнитная обстановка, планетарный *Кр*-индекс) и внутренних (пространственное расположение) условий.

Эксперименты проводились на клиентской стороне с использованием компьютера с процессором Intel Core i5 10300H 2,5 ГГц, оперативной памятью размером 4 ГБ и скоростью интернет-соединения 52,4 Мбит/с, а на серверной стороне — на базе веб-сервера с процессором 72 Intel® Xeon® Gold 6140 СРU @ 2,30 ГГц.

На первом этапе осуществлена оценка времени получения отклика от серверной стороны. Было обнаружено, что выполнение клиентского запроса с учетом информации о наиболее эффективном методе интерполяции занимает в среднем 12 с, что соответствует



*Puc. 2.* Архитектура предлагаемого решения *Fig. 2.* Proposed solution architecture

требованиям к высокопроизводительным веб-приложениям. На втором этапе оценивалась ошибка интерполяции при использовании предложенного адаптивного подхода в сравнении с существующими методами. Исследования проводились на геомагнитных данных в разные периоды геомагнитной активности и для разных пространственных областей: средне-, высоко- и низкоширотных.

Для проведения экспериментов из исходных данных на каждом этапе извлекалась одна пространственная точка, значение атрибута в которой требовалось вычислить методом интерполяции. Затем полученный ре-



*Puc. 3.* Пример экранной формы исследовательского прототипа приложения *Fig. 3.* An example of the screen form of the research prototype application

зультат сравнивался с исходным значением. Для каждой комбинации внешних и внутренних факторов было проведено около 50 вычислительных экспериментов, что позволило оценить качество предложенного метода пространственной интерполяции.

Анализ полученных результатов показал, что использование предложенного адаптивного подхода к интерполяции позволяет снизить среднеквадратическую ошибку восстановления пространственных данных по сравнению с существующими подходами следующим образом: в среднеширотных областях — на 4,71 нТл, в высокоширотных областях — на 4,95 нТл, в низкоширотных областях — на 16,7 нТл.

#### Заключение

Анализ системы геомагнитного мониторинга позволил выявить основные проблемы получения геомагнитных данных. В частности, была выявлена проблема отсутствия данных в произвольных точках земной поверхности по различным техническим и естественным причинам. Сформулирована концепция введения дополнительных компьютерных моделей в систему поддержки принятия решений на основе геомагнитной

#### Литература

- Vorobev A., Soloviev A., Pilipenko V., Vorobeva G., Sakharov Y. An approach to diagnostics of geomagnetically induced currents based on ground magnetometers data // Applied Sciences. 2022. V. 12. N 3. P. 1522. https://doi.org/10.3390/app12031522
- Vorobev A.V., Vorobeva G.R. Approach to assessment of the relative informational efficiency of intermagnet magnetic observatories // Geomagnetism and Aeronomy. 2018. V. 58. N 5. P. 625–628. https:// doi.org/10.1134/S0016793218050158
- Fournier A., Aubert J., Lesur V., Thebault E. Physics-based secular variation candidate models for the IGRF // Earth, Planets and Space. 2021. V. 3. P. 190. https://doi.org/10.1186/s40623-021-01507-z
- Imboden D., Pfenninger S. Introduction to Systems Analysis Mathematically Modeling Natural Systems. Springer, 2013. 252 p. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30639-6
- Brown W., Beggan C., Cox G., Macmillan S. The BGS candidate models for IGRF-13 with a retrospective analysis of IGRF-12 secular variation forecasts // Earth, Planets and Space. 2021. V. 73. P. 42. https://doi.org/10.1186/s40623-020-01301-3
- Petrov V., Bondar T. IZMIRAN candidate field model for IGRF-13 // Earth, Planets and Space. 2021. V. 73. P. 46. https://doi.org/10.1186/ s40623-020-01312-0
- Vorobev A.V., Soloviev A.A., Pilipenko V.A., Vorobeva G.R. Interactive computer model for aurora forecast and analysis // Solar-Terrestrial Physics. 2022. V. 8. N 2. P. 84–90. https://doi.org/10.12737/ stp-82202213
- Vorobev A.V., Pilipenko V.A., Krasnoperov R.I., Vorobeva G.R., Lorentzen D.A. Short-term forecast of the auroral oval position on the basis of the "virtual globe" technology // Russian Journal of Earth Sciences. 2020. V. 20. P. ES6001. https://doi. org/10.2205/2020ES000721
- Gjerloev J.W. The SuperMAG data processing technique // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2012. V. 117. N A9. P. A09213. https://doi.org/10.1029/2012JA017683
- Waters C.L., Gjerloev J.W., Dupont M., Barnes R.J. Global maps of ground magnetometer data // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2015. V. 120. N 11. P. 9651–9660. https://doi. org/10.1002/2015JA021596
- Zhang H., Tian Y., Zhao P. Dispersion curve interpolation based on kriging method // Applied Sciences. 2023. V. 13. N 4. P. 2557. https:// doi.org/10.3390/app13042557

информации таким образом, чтобы обеспечить получение данных о геомагнитной обстановке в тех точках, где отсутствуют средства измерения.

В работе предложен подход, основанный на комбинировании методов пространственной интерполяции, демонстрирующих наилучшие результаты восстановления данных при различных сочетаниях внешних и внутренних условий. На подготовительном этапе необходимо оценить значение ошибки интерполяции, которую обеспечивают различные методы восстановления для разных пространственных областей и значений внешних факторов. Далее при интерполяции определяется принадлежность восстанавливаемого значения пространственной области, оцениваются значения внешних факторов и определяется наиболее эффективный метод. По результатам выполняется восстановление значения выбранным методом.

На примере геомагнитной информации показана результативность предложенного решения. Для выделенных пространственных областей и различного уровня геомагнитной активности показано ранжирование методов интерполяции по их эффективности в контексте минимизации ошибки восстановления данных.

#### References

- Vorobev A., Soloviev A., Pilipenko V., Vorobeva G., Sakharov Y. An approach to diagnostics of geomagnetically induced currents based on ground magnetometers data. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no. 3, pp. 1522. https://doi.org/10.3390/app12031522
- Vorobev A.V., Vorobeva G.R. Approach to assessment of the relative informational efficiency of intermagnet magnetic observatories. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2018, vol. 58, no. 5, pp. 625–628. https://doi.org/10.1134/S0016793218050158
- Fournier A., Aubert J., Lesur V., Thebault E. Physics-based secular variation candidate models for the IGRF. *Earth, Planets and Space*, 2021, vol. 73, pp. 190. https://doi.org/10.1186/s40623-021-01507-z
- Imboden D., Pfenninger S. Introduction to Systems Analysis Mathematically Modeling Natural Systems. Springer, 2013, 252 p. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30639-6
- Brown W., Beggan C., Cox G., Macmillan S. The BGS candidate models for IGRF-13 with a retrospective analysis of IGRF-12 secular variation forecasts. *Earth, Planets and Space*, 2021, vol. 73, pp. 42. https://doi.org/10.1186/s40623-020-01301-3
- Petrov V., Bondar T. IZMIRAN candidate field model for IGRF-13. Earth, Planets and Space, 2021, vol. 73, pp. 46. https://doi. org/10.1186/s40623-020-01312-0
- Vorobev A.V., Soloviev A.A., Pilipenko V.A., Vorobeva G.R. Interactive computer model for aurora forecast and analysis. *Solar-Terrestrial Physics*, 2022, vol. 8, no. 2, pp. 84–90. https://doi.org/10.12737/stp-82202213
- Vorobev A.V., Pilipenko V.A., Krasnoperov R.I., Vorobeva G.R., Lorentzen D.A. Short-term forecast of the auroral oval position on the basis of the "virtual globe" technology. *Russian Journal of Earth Sciences*, 2020, vol. 20, pp. ES6001. https://doi. org/10.2205/2020ES000721
- Gjerloev J.W. The SuperMAG data processing technique. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, vol. 117, no. A9, pp. A09213. https://doi.org/10.1029/2012JA017683
- Waters C.L., Gjerloev J.W., Dupont M., Barnes R.J. Global maps of ground magnetometer data. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, vol. 120, no. 11, pp. 9651–9660. https://doi. org/10.1002/2015JA021596
- Zhang H., Tian Y., Zhao P. Dispersion curve interpolation based on kriging method. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no. 4, pp. 2557. https://doi.org/10.3390/app13042557

- Lebrenz H., Bardossy A. Geostatistical interpolation by quantile kriging // Hydrology and Earth System Sciences. 2019. V. 23. N 3. P. 1633–1648. https://doi.org/10.5194/hess-23-1633-2019
- Alexa M. Conforming weighted Delaunay triangulations // ACM Transactions on Graphics. 2020. V. 39. N 6. P. 1–16. https://doi. org/10.1145/3414685.3417776
- Weng Y., Cao J., Chen Z. Global optimization of optimal Delaunay triangulation with modified whale optimization algorithm // Engineering with Computers. 2024. V. 40. N 4. P. 2595–2616. https:// doi.org/10.1007/s00366-023-01928-2
- Huynh T., Tran D., Vu Q., Nguyen L., Design and Implementation of Web Application Based on MVC Laravel Architecture // European Journal of Electrical Engineering and Computer Science. 2022. V. 6. N 4. P. 1–7. https://doi.org/10.24018/ejece.2022.6.4.448
- Rahman M.H., Naderuzzaman M., Kashem M.A., Salahuddin B.M., Mahmud M.Z. Comparative study: performance of MVC frameworks on RDBMS // International Journal of Information Technology and Computer Science. 2024. V. 16. N 1. P. 26–34. https://doi.org/10.5815/ ijitcs.2024.01.03
- Hule K., Ranawat R. Analysis of different ORM tools for data access object tier generation: a brief study // International Journal of Membrane Science and Technology. 2023. V. 10. N 1. P. 1277–1291. https://doi.org/10.15379/ijmst.v10i1.2842
- Marculescu B., Zhang M., Arcuri A. On the faults found in REST APIs by automated test generation // ACM Transactions on Software Engineering and Methodology. 2022. V. 31. N 3. P. 1–43. https://doi. org/10.1145/3491038
- Golmohammadi A., Zhang M., Arcuri A. Testing RESTful APIs: a survey // ACM Transactions on Software Engineering and Methodology. 2023. V. 33. N 1. P. 1–41. https://doi. org/10.1145/3617175
- Bogner J., Kotstein S., Pfaff T. Do RESTful API design rules have an impact on the understandability of Web APIs? // Empirical Software Engineering. 2023. V. 28. N 6. P. 132. https://doi.org/10.1007/s10664-023-10367-y

#### Авторы

Воробьева Гульнара Равилевна — доктор технических наук, доцент, профессор, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, 450008, Российская Федерация, SC 57189275619, https://orcid.org/0000-0001-7878-9724, gulnara.vorobeva@gmail.com

Воробьев Андрей Владимирович — доктор технических наук, доцент, профессор, заведующий кафедрой, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, 450008, Российская Федерация, SC 56767909700, https://orcid.org/0000-0002-9680-5609, geomagnet@ list.ru

Фарваев Эмиль Фанильевич — аспирант, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, 450008, Российская Федерация, https://orcid. org/0009-0001-4107-8950, farvaev.emil@gmail.com

Статья поступила в редакцию 06.09.2024 Одобрена после рецензирования 18.11.2024 Принята к печати 22.01.2025

- Lebrenz H., Bardossy A. Geostatistical interpolation by quantile kriging. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, vol. 23, no. 3, pp. 1633–1648. https://doi.org/10.5194/hess-23-1633-2019
- Alexa M. Conforming weighted Delaunay triangulations. ACM Transactions on Graphics, 2020, vol. 39, no. 6, pp. 1–16. https://doi. org/10.1145/3414685.3417776
- Weng Y., Cao J., Chen Z. Global optimization of optimal Delaunay triangulation with modified whale optimization algorithm. *Engineering with Computers*, 2024, vol. 40, no. 4, pp. 2595–2616. https://doi.org/10.1007/s00366-023-01928-2
- Huynh T., Tran D., Vu Q., Nguyen L., Design and Implementation of Web Application Based on MVC Laravel Architecture. *European Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 2022, vol. 6, no. 4. pp. 1–7. https://doi.org/10.24018/ejece.2022.6.4.448
- Rahman M.H., Naderuzzaman M., Kashem M.A., Salahuddin B.M., Mahmud M.Z. Comparative study: performance of MVC frameworks on RDBMS. *International Journal of Information Technology and Computer Science*, 2024, vol. 16, no. 1, pp. 26–34. https://doi. org/10.5815/ijitcs.2024.01.03
- Hule K., Ranawat R. Analysis of different ORM tools for data access object tier generation: a brief study. *International Journal of Membrane Science and Technology*, 2023, vol. 10, no. 1, pp. 1277– 1291. https://doi.org/10.15379/ijmst.v10i1.2842
- Marculescu B., Zhang M., Arcuri A. On the faults found in REST APIs by automated test generation. ACM Transactions on Software Engineering and Methodology, 2022, vol. 31, no. 3, pp. 1–43. https:// doi.org/10.1145/3491038
- Golmohammadi A., Zhang M., Arcuri A. Testing RESTful APIs: a survey. ACM Transactions on Software Engineering and Methodology, 2023, vol. 33, no. 1, pp. 1–41. https://doi. org/10.1145/3617175
- Bogner J., Kotstein S., Pfaff T. Do RESTful API design rules have an impact on the understandability of Web APIs? *Empirical Software Engineering*, 2023, vol. 28, no. 6, pp. 132. https://doi.org/10.1007/ s10664-023-10367-y

#### Authors

**Gulnara R. Vorobeva** — D.Sc., Associate Professor, Professor, Ufa University of Science and Technology, Ufa, 450008, Russian Federation, SC 57189275619, https://orcid.org/0000-0001-7878-9724, gulnara. vorobeva@gmail.com

Andrei V. Vorobev — D.Sc., Associate Professor, Professor, Head of Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, 450008, Russian Federation, Sci 56767909700, https://orcid.org/0000-0002-9680-5609, geomagnet@list.ru

Emil F. Farvaev — PhD Student, Ufa University of Science and Technology, Ufa, 450008, Russian Federation, https://orcid.org/0009-0001-4107-8950, farvaev.emil@gmail.com

Received 06.09.2024 Approved after reviewing 18.11.2024 Accepted 22.01.2025



Работа доступна по лицензии Creative Commons «Attribution-NonCommercial»

# **I/İTMO**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ январь-февраль 2025 Том 25 № 1 http://ntv.ifmo.ru/ SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS January-February 2025 Vol. 25 No 1 http://ntv.ifmo.ru/en/ ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

университет итмо

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-160-168 УДК 519.7

# Построение согласованной функции расстояния для простого марковского канала

#### Алина Максимовна Вересова<sup>1</sup>, Андрей Анатольевич Овчинников<sup>2</sup>

1.2 Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Санкт-Петербург, 190008, Российская Федерация

<sup>1</sup> amveresova@gmail.com<sup>⊠</sup>, https://orcid.org/0000-0002-3792-9249 <sup>2</sup> a.ovchinnikov@hse.ru, https://orcid.org/0000-0002-8523-9429

#### Аннотация

Введение. Проблема исправления ошибок в канале связи может быть решена определением наиболее вероятного вектора ошибок в канале. При этом в ряде случаев решается эквивалентная задача нахождения вектора минимального веса. Это требует введения функции расстояния, согласованной с каналом связи. В классической теории кодирования традиционно используются метрики Хэмминга и Евклида, в то время как для многих каналов связи согласованные с ними функции расстояния неизвестны. Построение таких функций может снизить вероятность ошибки декодирования и является актуальной задачей. В данной работе предложено решение проблемы разработки функции декодирования, совпадающей с декодированием по максимуму правдоподобия в простом марковском канале. Метод. Выполнен анализ вероятностей векторов в простом марковском канале. Разработанная функция расстояния представлена как сумма набора коэффициентов, зависящих от параметров канала. Предложен способ вычисления коэффициентов, при которых функция является согласованной с каналом. Рассмотрено несколько аппроксимаций для случая, когда параметры канала неизвестны или известны неточно. На примере сверточного кодирования экспериментально оценено влияние предложенной функции и ее аппроксимаций на вероятность ошибки. Основные результаты. Сформулировано правило, обеспечивающее декодирование по максимуму правдоподобия в простом марковском канале. Предложенная функция расстояния согласована с каналом при любых длинах кодов, в отличие от известных марковских метрик. Рассмотрены вопросы выбора коэффициентов функции декодирующего правила, упрощающие вычисление функции с возможным нарушением согласованности. На основе полученной функции представлена экспериментальная оценка вероятности ошибки по максимуму правдоподобия для сверточного кода в простом марковском канале. Приведена оценка влияния аппроксимации коэффициентов на вероятность ошибки декодирования. Дано сравнение предложенного решения с известным классом марковских метрик. Обсуждение. Проведенные эксперименты показали, что предложенная согласованная функция и ее упрощенный вариант обеспечивают значительное снижение вероятности ошибки по сравнению с метрикой Хэмминга, а также известной марковской метрикой при низких значениях априорной вероятности битовой ошибки. Использование квантований значений функции практически не увеличивает вероятность ошибки декодирования по сравнению с декодированием по максимуму правдоподобия. Метод, основанный на анализе вероятности векторов в канале с двумя состояниями, может быть использован при разработке декодирующих функций для более сложных моделей каналов Гилберта и Гилберта-Эллиотта. Такие функции позволяют повысить надежность передачи сообщений в каналах со сложной структурой шума и обеспечивают декодирование по максимуму правдоподобия в марковском канале, в то время как традиционный подход к декорреляции канала существенно снижает пропускную способность.

#### Ключевые слова

канал с конечным числом состояний, марковские цепи, согласованные метрики, декодирование по максимуму правдоподобия, правило декодирования, алгоритм Витерби

#### Благодарности

Статья подготовлена в результате проведения исследования в рамках Программы фундаментальных исследований Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ), лаборатория Интернета вещей и киберфизических систем НИУ ВШЭ в Санкт-Петербурге.

<sup>©</sup> Вересова А.М., Овчинников А.А., 2025

Ссылка для цитирования: Вересова А.М., Овчинников А.А. Построение согласованной функции расстояния для простого марковского канала // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 1. С. 160–168. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-160-168

# Construction of matched distance function for simple Markov channel Alina M. Veresova<sup>1</sup>, Andrei A. Ovchinnikov<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> HSE University, Saint Petersburg, 190008, Russian Federation

<sup>1</sup> amveresova@gmail.com<sup>\Box</sup>, https://orcid.org/0000-0002-3792-9249

<sup>2</sup> a.ovchinnikov@hse.ru, https://orcid.org/0000-0002-8523-9429

#### Abstract

The problem of error correction in communication channel may be solved by finding the most probable error vector in the channel. The equivalent in some cases problem may be formulated as finding the vector of least weight. To perform this, the distance function is needed matched to communication channel. Hamming and Euclid metrics are traditionally used in classical coding theory, but for many channels the correspondent matched distance functions are unknown. Finding such functions would allow decoding error probability decreasing, and it is actual task. In this paper the problem of decoding function development is solved, providing maximum likelihood decoding in simple Markov channel. Analysis of vectors probability in simple Markov channel is performed. The developed function is presented as sum of coefficients from the set depending on channel parameters. The way of coefficient computation is mentioned, providing matching the function with channel. Some approximations of coefficients are given for the case when channel parameters are unknown or uncertain. Affect of this function and its approximations on error probability is estimated experimentally using convolutional code. The decoding rule is proposed providing maximum likelihood decoding in simple Markov channel. Proposed function is matched with the channel for all code lengths, as opposed to known Markov metrics. The selection of coefficients for the decoding rule function is considered, simplifying computations by cost of possible losing the matching property. Error probability of maximum likelihood decoding using proposed function is estimated experimentally for convolutional code in simple Markov channel. The affect of coefficients approximation on decoding error probability increasing is estimated. The comparison with the class of known Markov metrics is performed. Experiments show that both proposed matched function and its simplifications provide significant gain in decoding error probability comparing to Hamming metric, and comparing to known Markov metric in area of low a priori channel bit error probabilities. Usage of quantized values of proposed function practically does not increase the error probability comparing to maximum likelihood decoding. The method based on analysis of error probability in two-state channels may be used to develop decoding functions for more complex Gilbert and Gilbert-Elliott channel models. Such functions would allow significant increasing in data transmission reliability in channels with complicated noise structure and provide maximum likelihood decoding in Markov channel with memory, instead of traditional approach which uses decorrelation of the channel and significantly reduces capacity.

#### Keywords

finite-state channel, Markov chain, matched metrics, maximum-likelihood decoding, decoding rule, Viterbi algorithm

#### Acknowledgements

The article was prepared within the framework of the Basic Research Program at HSE University, Internet of Things and Cyber-Physical Systems Laboratory, Saint Petersburg School of Physics, Mathematics, and Computer Science.

**For citation:** Veresova A.M., Ovchinnikov A.A. Construction of matched distance function for simple Markov channel. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 1, pp. 160–168 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-160-168

#### Введение

При передаче информации в различных сетях одной из важнейших задач является обеспечение надежности передачи. Понятие надежности включает в себя много аспектов: вероятность доставки, задержки доставки, помехозащищенность данных, защищенность от неавторизованных пользователей и т. п. [1, 2]. Хотя эти задачи разнородны, зачастую они решаются с помощью специальным образом введенной, и используемой тем или иным образом информационной избыточности [3, 4]. В настоящей работе рассматриваются задачи, связанные с внесением избыточности на физическом уровне сети с помощью методов помехоустойчивого кодирования [1, 5].

При рассмотрении задачи исправления ошибок в классической теории кодирования чаще всего рассматриваются каналы с независимыми ошибками, такие

как дискретный двоичный симметричный канал (ДСК) или полунепрерывный канал с аддитивным белым гауссовским шумом. Задача декодирования в этих каналах может быть сформулирована в терминах минимизации функции расстояния, обычно являющейся метрикой. Эта задача будет решаться с минимальной вероятностью ошибки, если метрика согласована с каналом. Для ДСК — метрика Хемминга, для канала с аддитивным белым гауссовским шумом — метрика Евклида. Однако представляют интерес и другие метрики, так как метрики Хэмминга и Евклида, как и соответствующие модели каналов, не всегда хорошо согласуются с характеристиками ошибок в реальных каналах. Значительный вклад в разработку проблематики метрик в теории кодирования внес Э. Габидулин, введя понятие ранговой метрики [6], в последние годы вопросу метрического описания каналов и установлению эквивалентности метрик посвящены работы [7-9]. Развитие этих работ

как применительно к построению кодов, так и различным аспектам декодирования, можно найти в [10–13].

Большинство реальных каналов обладают памятью, это означает, что ошибки в них имеют тенденцию к группированию. Известно, что пропускная способность каналов с памятью выше, чем каналов без памяти. Однако для реализации минимальных вероятностей ошибки в каналах с памятью необходимо использовать как можно более точное описание специфики возникающих ошибок.

Кодированию для каналов с памятью с использованием современных кодовых конструкций в последние годы был посвящен ряд работ. Так, в работах [14–17] рассматривалось применение низкоплотностных кодов в каналах с памятью. В [18, 19] исследовано применение полярных кодов. Однако в перечисленных работах мало изучены вопросы декодирования по максимуму правдоподобия в каналах с памятью, и в основном внимание уделено разработке практических методов кодирования и декодирования и их экспериментальной оценке.

Цель настоящей работы — построение правила декодирования, которое приближалось бы к декодированию по максимуму правдоподобия для каналов, описываемых марковской цепью с двумя состояниями. В работе вводятся основные понятия метрического описания канала, анализируется согласованность класса метрик, называемых марковскими, с простым марковским каналом. На основе анализа вероятностного описания векторов в таком канале разрабатывается декодирующая весовая функция, обеспечивающая согласованность с простым марковским каналом. Приводятся результаты моделирования по оценке вероятности ошибки декодирования с использованием предложенного правила. Новизна предложенных решений состоит не только в построении функции (полуметрики), обеспечивающей декодирование по максимуму или почти по максимуму правдоподобия в простом марковском канале вне зависимости от параметров канала и кода, но и в рассмотренном подходе к построению полуметрики на основе анализа выражений, описывающих вероятности ошибок в каналах с двумя состояниями.

#### Метрическое описание каналов связи

Задача декодирования по максимуму правдоподобия [1, 5] при передаче по каналу с шумом может быть сформулирована как оптимизационная задача

$$\hat{\mathbf{a}} = \arg \max_{\mathbf{a} \in \mathcal{C}} p(\mathbf{b}|\mathbf{a}),$$

где **a** — передаваемое кодовое слово кода C; вектор **b** — слово, принятое из канала, вероятность  $p(\mathbf{b}|\mathbf{a})$  называется функцией правдоподобия. Решением **â** декодера является кодовое слово, максимизирующее значение функции правдоподобия, т. е. аргумент оптимального значения целевой функции. Такое декодирование требует задания модели канала, допускающей расчет условных вероятностей выходных последовательностей относительно входных.

Если канал имеет двоичный вход и двоичный выход, воздействие канала на передаваемые символы может быть описано с помощью вектора ошибки е такого, что

$$\mathbf{b} = \mathbf{a} \oplus \mathbf{e}$$
.

Тогда максимизация функции правдоподобия эквивалентна максимизации вероятности  $p(\mathbf{e}) = p(\mathbf{b}|\mathbf{a})$  вектора ошибки. Иногда для удобства говорят, что в канале «появляется вектор  $\mathbf{e}$ », и задание вероятностной модели канала означает и задание распределения вероятностей на множестве всех возможных векторов ошибки, т. е. вероятностей их появления.

Декодирование по минимуму расстояния описывается как оптимизационная задача

$$\mathbf{\hat{a}} = \arg \max_{\mathbf{a} \in \mathcal{C}} d(\mathbf{a}, \mathbf{b}),$$

где  $d(\mathbf{a}, \mathbf{b})$  — функция, называемая расстоянием. Заметим, что в известных работах нет единого подхода к терминологии в данной области, поэтому будем придерживаться системы определений, используемых в [7, 8] и с точки зрения авторов наиболее подходящей к рассматриваемой проблематике. В этом варианте рассмотрим бинарную функцию  $d: X \times X \to \mathbb{R}_{\geq 0}$  над элементами из множества X. Сформулируем ряд свойств (аксиом) для x, y, z  $\in X$ .

Аксиома 1.  $d(x, y) \ge 0$ , причем d(x, x) = 0.

Аксиома 2. d(x, y) = d(y, x).

Аксиома 3.  $d(x, y) = 0 \Rightarrow x = y$ .

Аксиома 4.  $d(x, y) \le d(x, z) + d(z, y)$ .

В случае выполнения аксиом 1 и 2 назовем функцию *d* расстоянием, при выполнении аксиомы 3 — полуметрикой, при выполнении аксиомы 4 (неравенства треугольника) — метрикой. В теории кодирования наиболее часто используется метрика Хемминга, определяемая как число несовпадающих элементов двух последовательностей одинаковой длины, однако известны и другие метрики.

Функция расстояния связана, и более того, может быть определена через функцию веса как

$$d(x, y) = W(x - y).$$

Сформулируем условие, при котором решение оптимизационной задачи по минимуму расстояния совпадет с решением по максимуму правдоподобия: если для двух векторов  $\mathbf{e}_1$  и  $\mathbf{e}_2$  выполняется  $p(\mathbf{e}_1) > p(\mathbf{e}_2)$  (где  $p(\mathbf{e}_1)$  и  $p(\mathbf{e}_2)$  — вероятности появления  $\mathbf{e}_1$  и  $\mathbf{e}_2$  в канале), должно выполняться также  $W(\mathbf{e}_1) < W(\mathbf{e}_2)$ , тогда более вероятный в данном канале вектор будет также и более легким, и максимизация вероятности совпадает с минимизацией веса. В этом случае функция расстояния (например, метрика, полуметрика и т. п.) называется согласованной с каналом.

В классической теории кодирования обычно рассматриваются функции расстояния, являющиеся метриками, однако для характеристики меры близости двух векторов достаточно выполнения аксиом 1–3. В этом случае декодирование по минимуму расстояния все еще будет совпадать с максимумом правдоподобия,

Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2025, том 25, № 1 Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2025, vol. 25, no 1

если функция расстояния (полуметрика) согласована с каналом.

Пусть X — множество, на элементах которого задана полуметрика  $d_1$ . В [8] показано, что если  $x, y \in X$ , то функция  $d_2$ , определенная в соответствии с

$$\begin{cases} d_2(x, y) = 1 + \frac{d_1(x, y)}{\max_{u, v \in X} d_1(u, v)}, & x \neq y \\ d_2(x, y) = 0, & x = y \end{cases}$$
(1)

является метрикой. При этом  $d_1$  и  $d_2$  эквивалентны в том смысле, что дают одинаковое решение задачи декодирования по минимуму расстояния.

В дальнейшем рассмотрим каналы с памятью и их метрическое описание.

# Функции расстояния для простого марковского канала

Пусть на вход канала связи поступает кодовая последовательность  $\mathbf{a} = (a_0, a_1, ..., a_{n-1})$ , а выходом является слово  $\mathbf{b} = (b_0, b_1, ..., b_{n-1})$ . Канал не обладает памятью, если для рассматриваемой модели канала справедливо

$$p(\mathbf{b}|\mathbf{a}) = \prod_{i=0}^{n-1} p(b_i|a_i)$$

В противном случае говорят о каналах с памятью, в них вероятность искажения символа в отдельный момент времени зависит от того, были ли искажены предыдущие символы.

Наиболее часто используемым подходом при определении моделей дискретных каналов с памятью является задание шумового процесса с помощью марковской цепи, как правило, с двумя состояниями.

В случае модели простого двоичного марковского канала выделяют два состояния: «0» и «1», и вероятности перехода между ними  $P_{01}$  и  $P_{10}$ , тогда передаваемый бит всегда передается верно, если канал находится в состоянии «0», и всегда инвертируется, если канал в состоянии «1». В общем случае, задав вероятности битовых ошибок в каждом из состояний, можно перейти к моделям Гилберта и Гилберта–Эллиотта, которые в настоящей работе не рассматриваются.

Априорная вероятность того, что простой марковский канал сгенерирует битовую ошибку в определенный момент времени, равна

$$\Pr(1) = p_e = P_{01} / (P_{01} + P_{10}).$$

Применение перемежения к дискретным двоичным каналам с конечным числом состояний преобразует эти каналы в ДСК с переходной вероятностью  $p_e$ . Далее априорную вероятность  $p_e$  битовой ошибки в канале будем называть эквивалентной вероятностью ошибки. Известно, что эквивалентный ДСК, полученный с помощью перемежения, имеет меньшую пропускную способность, чем исходный канал с памятью, поэтому актуальной является задача построения методов декодирования для канала с памятью.

Для решения задачи построения функции расстояния, согласованной с каналом с конечным числом состояний, необходимо оценивать вероятности векторов ошибки в таком канале. В простом марковском канале эта вероятность может быть вычислена как

$$\Pr(\mathbf{e}) = \Pr(e_0) \prod_{i=1}^{n-1} \Pr(e_i | e_{i-1}) = \Pr(e_0) P_{00}^{l_{00}} P_{01}^{l_{10}} P_{10}^{l_{10}} P_{11}^{l_{10}}$$

где  $l_{ij}$  — число переходов из *i* в *j* в векторе ошибки е. В дальнейшем рассмотрим задачу вычисления метрики, согласованной с простым марковским каналом.

В работах [1, 20, 21] рассматривалась метрика:

$$d(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = d(\mathbf{x} \bigoplus \mathbf{y}) = d(\mathbf{e}),$$
  
$$W(\mathbf{e}) = e_0 + l_{10} + 2l_{01},$$

при  $P_{11} < P_{00}$  являющаяся согласованной с простым марковским каналом, если длина передаваемых последовательностей не превышает некоторого значения:

$$n^{*} = \min \begin{cases} \frac{\ln(P_{BG}/P_{GB})}{\ln(P_{GG}/P_{BB})} + 3; \frac{\ln(P_{GG}/P_{BG})}{\ln(P_{GG}/P_{BB})} + 3; \\ \frac{\ln(P_{BB}/P_{BG})}{\ln(P_{GG}/P_{BB})} + 5 \end{cases}.$$
 (2)

Используя формулу (2), можно убедиться, что значения длин  $n^*$ , представляющие практический интерес (несколько сотен бит), возможны при только больших значениях  $P_{00}$  и  $P_{11}$ .

Рассмотрим вопрос построения функции расстояния, возможно, не являющейся метрикой и согласованной с простым марковским каналом без ограничения на длину кода. Заметим, что вероятность вектора ошибки в марковском канале является произведением некоторых множителей  $q_i$ :

$$\Pr(\mathbf{e}) = \Pr(e_0) \prod_{i=1}^{n-1} \Pr(e_i | e_{i-1}) = \prod_{i=0}^{n-1} q_i.$$

Значения  $q_i$  для i > 0 определяются переходными вероятностями, и

$$q_0 = \begin{cases} \Pr(1), & \text{если } e_0 = 1, \\ 1 - \Pr(1), & \text{если } e_0 = 0. \end{cases}$$

Для построения согласованной метрики можно выбирать функцию вычисления веса таким образом, что каждому множителю  $q_i$  ставится в соответствие неотрицательный весовой коэффициент  $\omega_i$ , монотонно зависящий от  $q_i$ : если  $q_i > q_j$ , то  $\omega_i < \omega_j$ , и эти коэффициенты связаны в функцию, возрастающую от количества коэффициентов. Обладающая всеми перечисленными свойствами функция от вероятности события хорошо известна в теории информации — логарифмическая мера вероятности, характеризующая количество информации, содержащееся в событии. Примем  $\omega_i = -\log_2 q_i$ и получим функцию с требующимися свойствами:

$$W(\mathbf{e}) = -\log_2 \Pr(\mathbf{e}) = \sum_{i=0}^{n-1} \omega_i$$

Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2025, том 25, № 1 Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2025, vol. 25, no 1 Заметим, что  $W(\mathbf{e}) > 0$ . Заданный таким образом вес от нулевого вектора не будет равен нулю, однако для этого специального случая функцию можно доопределить. Таким образом, получим функцию расстояния вида:

$$d(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = W(\mathbf{x} \bigoplus \mathbf{y}) = W(\mathbf{e}) = -\sum_{i=0}^{n-1} \log_2 q_i,$$
$$\mathbf{d}(\mathbf{x}, \mathbf{x}) = \mathbf{0}.$$

Эта функция является полуметрикой, и при необходимости из нее можно получить метрику, используя преобразование (1). Такая функция и соответствующая ей метрика будут согласованы с простым марковским каналом. Фактически, речь идет о декодировании по максимуму правдоподобия, где максимизация вероятности заменена задачей минимизации ее логарифма, взятого с отрицательным знаком. Данное свойство будет выполняться для любого основания логарифма, большего единицы. В дальнейшем в расчетах используется логарифм по основанию два.

Можно заметить, что величины  $\omega_i = \log_2 q_i$  принимают вещественные значения, что может быть неудобным на практике. В таблице приведены значения  $\omega_i$  для некоторых значений  $P_{00}$ ,  $P_{11}$ . Здесь  $\omega_{ij} = -\log_2 P_{ij}$ ,  $\omega_0 = -\log_2 q_0$ .

Как видно из таблицы, простое округление коэффициентов может достаточно сильно исказить их значения друг относительно друга, что может сказаться на согласованности. Для решения этой проблемы можно предложить, например, следующую эвристическую стратегию. Введем коэффициент масштабирования  $\kappa = 1/P_{01}$ . Так, например, при  $P_{00} = 0,9$  получим  $\kappa = 10$ , при  $P_{00} = 0,99$  значение  $\kappa = 100$  и т. д. Заменим коэффициенты  $\omega_i (\omega_{ij})$  значениями [ $\kappa \omega_i$ ] ([ $\kappa \omega_{ij}$ ]), где операция [x] означает округление значения x. При этом согласованность функции расстояния может быть потеряна, но можно предположить, что на практике искажения будут незначительными.

Еще одним нежелательным свойством введенной функции расстояния является то, что для вычисления коэффициентов необходимо знать значения переходных вероятностей канала или хотя бы их оценки. С одной стороны, данное требование типично во многих системах связи для настройки параметров передачи и, в частности, кодово-модуляционной схемы. С другой стороны, можно поставить вопрос о влиянии точности коэффициентов на вероятность ошибки декодирования, и, если такое влияние незначительно — использовать фиксированный набор их значений одновременно для множества параметров модели канала.

Проведенное построение функции расстояния можно применить для более общих моделей каналов с двумя состояниями, например, модели Гилберта. Однако для таких моделей выражения для множителей  $q_i$  при вычислении вероятности вектора носят существенно более сложный характер, это остается направлением возможных дальнейших исследований.

# Оценка вероятности ошибки декодирования по минимуму функции расстояния

Выполним экспериментальную оценку предложенной функции расстояния. Для этого сравним вероятности ошибки декодирования по критерию минимума предложенной функции с критерием декодирования по максимуму правдоподобия.

При выполнении декодирования как по минимуму расстояния, так и по максимуму правдоподобия обычно требуется полный перебор всех кодовых слов, что возможно только для блоковых кодов со сравнительно малыми значениями длины кода *n* и числа информаци-

| 16              | Переходная вероятность Р <sub>11</sub> |        |        |        |        |  |  |  |
|-----------------|--|--------|--------|--------|--------|--|--|--|
| коэффициенты    | 0,1                                    | 0,5    | 0,7    | 0,9    | 0,99   |  |  |  |
| $P_{00} = 0.9$  |  |        |        |        |        |  |  |  |
| ω <sub>0</sub>  | 0,1520                                 | 0,2630 | 0,4150 | 1,0000 | 3,4594 |  |  |  |
| ω               | 3,3219                                 | 2,5850 | 2,0000 | 1,0000 | 0,1375 |  |  |  |
| ω <sub>00</sub> | 0,1520                                 | 0,1520 | 0,1520 | 0,1520 | 0,1520 |  |  |  |
| ω <sub>01</sub> | 3,3219                                 | 3,3219 | 3,3219 | 3,3219 | 3,3219 |  |  |  |
| ω <sub>10</sub> | 0,1520                                 | 1,0000 | 1,7370 | 3,3219 | 6,6439 |  |  |  |
| ω <sub>11</sub> | 3,3219                                 | 1,0000 | 0,5146 | 0,1520 | 0,0145 |  |  |  |
| $P_{00} = 0,99$ |  |        |        |        |        |  |  |  |
| ω <sub>0</sub>  | 0,0159                                 | 0,0286 | 0,0473 | 0,1375 | 1,0000 |  |  |  |
| ω               | 6,5078                                 | 5,6724 | 4,9542 | 3,4594 | 1,0000 |  |  |  |
| ω <sub>00</sub> | 0,0145                                 | 0,0145 | 0,0145 | 0,0145 | 0,0145 |  |  |  |
| ω <sub>01</sub> | 6,6439                                 | 6,6439 | 6,6439 | 6,6439 | 6,6439 |  |  |  |
| ω <sub>10</sub> | 0,1520                                 | 1,0000 | 1,7370 | 3,3219 | 6,6439 |  |  |  |
| ω <sub>11</sub> | 3,3219                                 | 1,0000 | 0,5146 | 0,1520 | 0,0145 |  |  |  |

*Таблица*. Значения коэффициентов  $\omega_i$  для значений  $P_{00}$ : 0,9 и 0,99 *Table*. Values of coefficients  $\omega_i$  for  $P_{00}$ : 0.9 and 0.99

Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2025, том 25, № 1 Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2025, vol. 25, no 1 онных символов *k*. С другой стороны, при рассмотрении каналов с памятью эффект группирования ошибок достаточно наглядно проявляется и могут быть оценены подходы к борьбе с ошибками в таких каналах лишь на достаточно большой длине. Потому для проведения экспериментов рассмотрим кодирование с помощью сверточных кодов и декодирование с помощью модифицированного декодера Витерби, предложенного в [21]. При использовании вещественной функции расстояния без округлений до целых коэффициентов декодер будет обеспечивать декодирование по максимуму правдоподобия.

В качестве кода возьмем широко используемый в научных работах сверточный код с регистром длиной два и двумя многочленами связей, коэффициенты которых в восьмеричном виде представлены как (7, 5). Будем передавать информацию блоками по 300 информационных символов с усечением (занулением) решетки по простому двоичному марковскому каналу. Канал будет характеризоваться фиксированным значением переходной вероятности  $P_{00}$ . В качестве критерия оценки используем частоту битовых информационных ошибок в зависимости от значения эквивалентной вероятности ошибки  $p_e$ . Рассмотрим применение следующих функций при декодировании:

- «hamming» метрика Хэмминга;
- «markov» марковская метрика;
- «log-ML» декодирование по максимуму правдоподобия;
- «log-scaled» функция с масштабированием и округлением коэффициентов;
- «log-scaled-approx» функция с выбором коэффициентов без знания текущего параметра *p<sub>e</sub>*.

На рис. 1 приведены результаты компьютерного моделирования для марковского канала с  $P_{00} = 0.9$ . График «uncoded» соответствует некодированной передаче. При выборе функции «log-scaled-approx» были вычислены коэффициенты, соответствующие  $p_e = 0.25$  ( $\omega_0 = 4$ ;  $\omega_1 = 20$ ;  $\omega_{00} = 1$ ;  $\omega_{01} = 33$ ;  $\omega_{10} = 17$ ;  $\omega_{11} = 5$ )

и  $p_e = 0,15$  ( $\omega_0 = 2$ ;  $\omega_1 = 27$ ;  $\omega_{00} = 1$ ;  $\omega_{01} = 33$ ;  $\omega_{10} = 8$ ;  $\omega_{11} = 12$ ). Из представленных графиков видно, что метрика «markov» уступает результатам, полученным с использованием функций «log-ML» и «hamming» при малых значениях  $p_e$ . Аппроксимированная функция, очевидно, совпадает с максимумом правдоподобия в точке параметра аппроксимации, однако проигрывает во многих остальных случаях.

Выберем значения аппроксимации, исходя из  $p_e = 0.5$  ( $\omega_0 = 10$ ;  $\omega_1 = 10$ ;  $\omega_{00} = 1$ ;  $\omega_{01} = 33$ ;  $\omega_{10} = 33$ ;  $\omega_{11} = 1$ ) (рис. 2, *a*). Вероятности ошибки для аппроксимированной функции совпадают с результатами для декодирующих правил «markov» и «log-ML» для большого интервала значений  $p_e$ .

Таким образом, подстройкой коэффициентов аппроксимации по указанной методике можно приблизиться к декодированию по максимуму правдоподобия не только для значения эквивалентной вероятности ошибки, по которой строилась аппроксимация, но и для широкого диапазона значений.

Отметим нестандартный вид графика функции «log-ML» (рис. 2, a), который имеет экстремум в точке  $p_{\rho} \approx 0.25$ , что нетипично для традиционно получаемых в теории кодирования графиков вероятности ошибки, монотонно зависящих от параметра, задающих уровень шума в канале. Такое поведение кривой можно объяснить тем, что пропускная способность простого марковского канала является немонотонной функцией от  $p_e$ , убывающей для  $p_e < 0,25$  и далее возрастающей, таким образом, имеющей минимум в области  $p_e \approx 0.25$ . Это означает, что параметр эквивалентной вероятности ошибки p<sub>e</sub> (и соответственно — число ошибок во время передачи) не является параметром, монотонно «ухудшающим» канал. Это не является чем-то уникальным — в канале ДСК, к примеру, пропускная способность симметрична относительно вероятности битовой ошибки 0,5, и при стремлении доли ошибок к единице канал позволяет надежно передавать столько же информации, как и при стремлении доли ошибок к нулю.



*Рис. 1.* Зависимость доли битовых ошибок от эквивалентной вероятности ошибки при  $P_{00} = 0,9$  для аппроксимаций  $p_e = 0,25$  (*a*) и  $p_e = 0,15$  (*b*)

*Fig. 1.* Dependence of bit error rate from equivalent bit error probability for  $P_{00} = 0.9$ : approximation for  $p_e = 0.25$  (*a*), approximation for  $p_e = 0.15$  (*b*)



*Puc.* 2. Зависимость доли битовых ошибок от эквивалентной вероятности ошибки при  $P_{00} = 0.9$  (*a*) и  $P_{00} = 0.99$  (*b*) *Fig.* 2. Dependence of bit error rate from equivalent bit error probability: for  $P_{00} = 0.9$  (*a*), for  $P_{00} = 0.99$  (*b*)

Также отметим, что в отличие от монотонно убывающей метрики «markov», предложенная функция декодирования «log-scaled» (используемая при условии знания параметров канала) следует виду с экстремумом кривой по максимуму правдоподобия.

Теперь рассмотрим простой марковский канал при  $P_{00} = 0,99$  для аппроксимации  $p_e = 0,5$  ( $\omega_0 = 99$ ;  $\omega_1 = 99$ ;  $\omega_{00} = 1$ ;  $\omega_{01} = 664$ ;  $\omega_{10} = 664$ ;  $\omega_{11} = 1$ ) (рис. 2, *b*). Практически все функции расстояния дают примерно одинаковый результат, за исключением метрики «hamming». Отметим, что для данного канала графики не имеют экстремумов — косвенно это можно объяснить тем, что пропускная способность простого марковского канала при  $P_{00} = 0,00$  является функцией от  $p_{e}$ , близкой к монотонной.

Таким образом, рассмотренная методика вычисления коэффициентов предложенной функций декодирования дает достаточно гибкий инструмент для настройки функции декодирования в зависимости от параметров канала.

#### Заключение

В работе рассмотрены вопросы декодирования по максимуму правдоподобия и по минимуму расстояния

#### Литература

- Крук Е.А. Комбинаторное декодирование линейных блоковых кодов. Монография. СПб: ГУАП, 2007, 238 с.
- Bogatyrev A.V., Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V. The probability of timeliness of a fully connected exchange in a redundant real-time communication system // Proc. of the Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2020. P. 1–4. https://doi.org/10.1109/ weconf48837.2020.9131517
- Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V., Bogatyrev S.V. Multipath transmission of heterogeneous traffic in acceptable delays with packet replication and destruction of expired replicas in the nodes that make up the path // Communications in Computer and Information Science. 2023. V. 1748. P. 104–121. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30648-8\_9

в каналах с конечным числом состояний. Приведены понятия метрического описания канала связи, сформулирована задача построения функции расстояния (полуметрики) для использования при декодировании по минимуму расстояния.

На основании функции вычисления вероятности вектора в марковском канале предложена функция расстояния, принимающая вещественные значения и обеспечивающая декодирование по максимуму правдоподобия. Данная функция может быть преобразована в метрику, что позволяет сформулировать критерии для построения и анализа кодовых конструкций, ориентированных на декодирование в этой метрике.

Предложены варианты настройки целочисленных коэффициентов данной функции, что снимает строгое условие согласованности с каналом, однако проведенное экспериментальное сравнение предложенных упрощений с декодированием по максимуму правдоподобия демонстрирует практическое отсутствие ухудшения вероятности ошибки.

Метод построения функции расстояния может быть использован для попыток построения декодирующих функций для более интересных с точки зрения практики моделей каналов связи Гилберта и Гилберта– Эллиотта.

#### References

- . Krouk E. A. Combinatorial Decoding of Linear Block Codes. St. Petersburg, SUAI Publ., 2007, 238 p. (in Russian)
- Bogatyrev A.V., Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V. The probability of timeliness of a fully connected exchange in a redundant real-time communication system. *Proc. of the Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems* (WECONF), 2020, pp. 1–4. https://doi.org/10.1109/ weconf48837.2020.9131517
- 3. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V., Bogatyrev S.V. Multipath transmission of heterogeneous traffic in acceptable delays with packet replication and destruction of expired replicas in the nodes that make up the path. *Communications in Computer and Information Science*, 2023, vol. 1748, pp. 104–121. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30648-8\_9

- Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Control of multipath transmissions in the nodes of switching segments of reserved paths // Proc. of the International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT). 2022. P. 1–5. https://doi. org/10.1109/icct56057.2022.9976839
- Lin S., Li J. Fundamentals of Classical and Modern Error-Correcting Codes. Cambridge University Press, 2022. 840 p.
- Gabidulin E. A brief survey of metrics in coding theory // Proc. of the Mathematics of Distances and Applications. 2012. P. 66–84.
- Firer M., Walker J.L. Matched metrics and channels // IEEE Transactions on Information Theory. 2016. V. 62. N 3. P. 1150–1156. https://doi.org/10.1109/TIT.2015.2512596
- D'Oliveira R., Firer M. Channel metrization // European Journal of Combinatorics. 2019. V. 80. P. 107–119. https://doi.org/10.1016/j. ejc.2018.02.026
- Qureshi C.M. Matched metrics to the binary asymmetric channels // IEEE Transactions on Information Theory. 2019. V. 65. N 2. P. 1106– 1112. https://doi.org/10.1109/TIT.2018.2885782
- Miyamoto G.A., Firer M. Obtaining binary perfect codes out of tilings // IEEE Transactions on Information Theory. 2020. V. 66. N 10. P. 6121–6132. https://doi.org/10.1109/TIT.2020.2988865
- Cotardo G., Ravagnani A. Parameters of codes for the binary asymmetric channel // IEEE Transactions on Information Theory. 2022. V. 68. N 5. P. 2941–2950. https://doi.org/10.1109/ TIT.2022.3147593
- Zhang A., Jing X., Feng K. Optimal combinatorial neural codes with matched metric δr: characterization and constructions // IEEE Transactions on Information Theory. 2023. V. 69. N 8. P. 5440–5448. https://doi.org/10.1109/TIT.2023.3266010
- Xu Y., Kan H., Han G. MacWilliams extension property with respect to weighted poset metric // IEEE Transactions on Information Theory. 2024. V. 70. N 2. P. 995–1007. https://doi.org/10.1109/ TIT.2023.3328262
- Xiao X., Vasic B., Lin S., Li J., Abdel–Ghaffar K. Quasi-cyclic LDPC codes with parity-check matrices of column weight two or more for correcting phased bursts of erasures // IEEE Transactions on Communications. 2021. V. 69. N 5. P. 2812–2823. https://doi. org/10.1109/tcomm.2021.3059001
- Li L., Lv J., Li Y., Dai X., Wang X. Burst Error Identification Method for LDPC Coded Systems // IEEE Communications Letters. 2024.
   V. 28. N 7. P. 1489–1493. https://doi.org/10.1109/ lcomm.2024.3391826
- Ovchinnikov A.A., Veresova A.M., Fominykh A.A. Decoding of linear codes for single error bursts correction based on the determination of certain events // Informatsionno-upravliaiushchie sistemy [Information and Control Systems]. 2022. N 6. P. 41–52. https://doi.org/10.31799/1684-8853-2022-6-41-52
- Исаева М.Н., Овчинников А.А. Исправление одиночных пакетов ошибок за пределами корректирующей способности кода с использованием информационных совокупностей // Научнотехнический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, N 1. С. 70–80. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2024-24-1-70-80
- Aharoni Z., Huleihel B., Pfister H.D., Permuter H.H. Data-Driven polar codes for unknown channels with and without memory // Proc. of the IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). 2023. P. 1–6. https://doi.org/10.1109/isit54713.2023.10206663
- Fang Y., Chen J. Decoding polar codes for a generalized Gilbert-Elliott channel with unknown parameter // IEEE Transactions on Communications. 2021. V. 69. N 10. P. 6455–6468. https://doi. org/10.1109/TCOMM.2021.3095195
- Veresova A., Fominykh A., Ovchinnikov A. About usage of metrics in decoding of LDPC codes in Two-State channels with memory // Proc. of the XVII International Symposium Problems of Redundancy in Information and Control Systems (REDUNDANCY). 2021. P. 1–6. https://doi.org/10.1109/REDUNDANCY52534.2021.9606474
- Veresova A., Ovchinnikov A. Usage of Markov Metric in decoding of convolutional codes in Two-State channels // Proc. of the IEEE 3<sup>rd</sup> International Conference on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE). 2024. P. 1–5. https://doi.org/10.1109/ piere62470.2024.10805044

- Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Control of multipath transmissions in the nodes of switching segments of reserved paths. *Proc. of the International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT)*, 2022, pp. 1–5. https://doi. org/10.1109/icct56057.2022.9976839
- Lin S., Li J. Fundamentals of Classical and Modern Error-Correcting Codes. Cambridge University Press, 2022, 840 p.
- 6. Gabidulin E. A brief survey of metrics in coding theory. *Proc. of the Mathematics of Distances and Applications*, 2012, pp. 66–84.
- Firer M., Walker J.L. Matched metrics and channels. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2016, vol. 62, no. 3, pp. 1150–1156. https://doi.org/10.1109/TIT.2015.2512596
- D'Oliveira R., Firer M. Channel metrization. *European Journal of Combinatorics*, 2019, vol. 80, pp. 107–119. https://doi.org/10.1016/j.ejc.2018.02.026
- Qureshi C.M. Matched metrics to the binary asymmetric channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2019, vol. 65, no. 2, pp. 1106–1112. https://doi.org/10.1109/TIT.2018.2885782
- Miyamoto G.A., Firer M. Obtaining binary perfect codes out of tilings. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2020, vol. 66, no. 10, pp. 6121–6132. https://doi.org/10.1109/TIT.2020.2988865
- Cotardo G., Ravagnani A. Parameters of codes for the binary asymmetric channel. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2022, vol. 68, no. 5, pp. 2941–2950. https://doi.org/10.1109/ TIT.2022.3147593
- Zhang A., Jing X., Feng K. Optimal combinatorial neural codes with matched metric δr: characterization and constructions. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2023, vol. 69, no. 8, pp. 5440– 5448. https://doi.org/10.1109/TIT.2023.3266010
- Xu Y., Kan H., Han G. MacWilliams extension property with respect to weighted poset metric. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2024, vol. 70, no. 2, pp. 995–1007. https://doi.org/10.1109/ TIT.2023.3328262
- Xiao X., Vasic B., Lin S., Li J., Abdel–Ghaffar K. Quasi-cyclic LDPC codes with parity-check matrices of column weight two or more for correcting phased bursts of erasures. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, vol. 69, no. 5, pp. 2812–2823. https://doi. org/10.1109/tcomm.2021.3059001
- Li L., Lv J., Li Y., Dai X., Wang X. Burst Error Identification Method for LDPC Coded Systems. *IEEE Communications Letters*, 2024, vol. 28, no. 7, pp. 1489–1493. https://doi.org/10.1109/ lcomm.2024.3391826
- Ovchinnikov A.A., Veresova A.M., Fominykh A.A. Decoding of linear codes for single error bursts correction based on the determination of certain events. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [*Information and Control Systems*], 2022, no. 6, pp. 41–52. https://doi.org/10.31799/1684-8853-2022-6-41-52
- Isaeva M.N., Ovchinnikov A.A. Correction of single error bursts beyond the code correction capability using information sets. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 1, pp. 70–80. (in Russian). https://doi.org/10.17586/2226-1494-2024-24-1-70-80
- Aharoni Z., Huleihel B., Pfister H.D., Permuter H.H. Data-Driven polar codes for unknown channels with and without memory. *Proc.* of the IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), 2023, pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/isit54713.2023.10206663
- Fang Y., Chen J. Decoding polar codes for a generalized Gilbert-Elliott channel with unknown parameter. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, vol. 69, no. 10, pp. 6455–6468. https://doi. org/10.1109/TCOMM.2021.3095195
- Veresova A., Fominykh A., Ovchinnikov A. About usage of metrics in decoding of LDPC codes in Two-State channels with memory. *Proc. of the XVII International Symposium Problems of Redundancy in Information and Control Systems (REDUNDANCY)*. 2021, pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/REDUNDANCY52534.2021.9606474
- Veresova A., Ovchinnikov A. Usage of Markov Metric in decoding of convolutional codes in Two-State channels. *Proc. of the IEEE 3<sup>rd</sup> International Conference on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE)*, 2024, pp. 1–5. https://doi.org/10.1109/ piere62470.2024.10805044

#### Авторы

Вересова Алина Максимовна — младший научный сотрудник, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Санкт-Петербург, 190008, Российская Федерация, sc 57211275192, https://orcid.org/0000-0002-3792-9249, amveresova@ gmail.com

Овчинников Андрей Анатольевич — кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Санкт-Петербург, 190008, Российская Федерация, sc 57207711162, https://orcid.org/0000-0002-8523-9429, a.ovchinnikov@hse.ru

Статья поступила в редакцию 19.11.2024 Одобрена после рецензирования 19.12.2024 Принята к печати 23.01.2025

Authors

Alina M. Veresova — Junior Researcher, HSE University, Saint Petersburg, 190008, Russian Federation, sc 57211275192, https://orcid. org/0000-0002-3792-9249, amveresova@gmail.com

Andrei A. Ovchinnikov — PhD, Associate Professor, Leading Researcher, HSE University, Saint Petersburg, 190008, Russian Federation, sc 57207711162, https://orcid.org/0000-0002-8523-9429, a.ovchinnikov@hse.ru

Received 19.11.2024 Approved after reviewing 19.12.2024 Accepted 23.01.2025

Работа доступна по лицензии **Creative Commons** «Attribution-NonCommercial»

**I/İTMO** 

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ январь-февраль 2025 Том 25 № 1 http://ntv.ifmo.ru/ SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS January-February 2025 Vol. 25 No 1 http://ntv.ifmo.ru/en/ ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКІ

# КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ BRIEF PAPERS

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-169-173 УДК 004.852

## Использование метода динамического расширения и смешивания регрессора для задач машинного обучения на примере перцептрона Алексей Анатольевич Маргун<sup>1</sup><sup>∞</sup>, Константин Александрович Зименко<sup>2</sup>,

Алексеи Анатольевич Маргун<sup>1</sup>, Константин Александрович Зименко² Алексей Алексеевич Бобцов<sup>3</sup>

1,2,3 Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

<sup>1</sup> Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация

<sup>1</sup> alexeimargun@gmail.com<sup>\Box</sup>, https://orcid.org/0000-0002-5333-0594

<sup>2</sup> kostyazimenko@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-6220-7494

<sup>3</sup> bobtsov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1854-6717

#### Аннотация

Рассмотрено использование метода динамического расширения и смешивания регрессора для повышения скорости обучения в задачах машинного обучения. Предложенный подход продемонстрирован на примере перцептрона, применяемого для задач регрессии и бинарной классификации. Метод позволяет преобразовать мультипараметрическую задачу оптимизации в набор независимых скалярных регрессий, что значительно ускоряет сходимость алгоритма и снижает вычислительные затраты. Результаты компьютерного моделирования, включающие сравнение с методами стохастического градиентного спуска и Adam, подтвердили преимущество предложенного подхода для скорости сходимости и эффективности вычислений.

#### Ключевые слова

перцептрон, регрессия, бинарная классификация, машинное обучение, динамическое расширение и смешивание регрессора

#### Благодарности

Исследование поддержано Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSER-2025-0002).

Ссылка для цитирования: Маргун А.А., Зименко К.А., Бобцов А.А. Использование метода динамического расширения и смешивания регрессора для задач машинного обучения на примере перцептрона // Научнотехнический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 1. С. 169–173. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-169-173

# Application of the dynamic regressor extension and mixing approach in machine learning on the example of perceptron

## Alexey A. Margun<sup>1</sup><sup>∞</sup>, Konstantin A. Zimenko<sup>2</sup>, Alexey A. Bobtsov<sup>3</sup>

1,2,3 ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

<sup>1</sup> Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation

<sup>1</sup> alexeimargun@gmail.com<sup>\Box</sup>, https://orcid.org/0000-0002-5333-0594

<sup>2</sup> kostyazimenko@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-6220-7494

<sup>3</sup> bobtsov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1854-6717

#### Abstract

This paper explores the application of the Dynamic Regressor Extension and Mixing method to improve the learning speed in machine learning tasks. The proposed approach is demonstrated using a perceptron applied to regression and binary classification problems. The method transforms a multi-parameter optimization problem into a set of independent

© Маргун А.А., Зименко К.А., Бобцов А.А., 2025

scalar regressions, significantly accelerating the convergence of the algorithm and reducing computational costs. Results from computer simulations, including comparisons with stochastic gradient descent and Adam methods, confirm the advantages of the proposed approach in terms of convergence speed and computational efficiency.

#### Keywords

perceptron, regression, binary classification, machine learning, dynamic regressor extension and mixing

#### Acknowledgments

The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSER-2025-0002).

For citation: Margun A.A., Zimenko K.A., Bobtsov A.A. Application of the dynamic regressor extension and mixing approach in machine learning on the example of perceptron. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 1, pp. 169–173 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-169-173

Перцептрон является одним из фундаментальных элементов машинного обучения. Разработанный в середине прошлого века, он представляет собой простейшую архитектуру нейронной сети [1, 2]. Его концепция, основанная на попытке имитировать биологический нейрон, стала фундаментом для создания современных нейронных сетей. Процесс обучения перцептрона представляет собой оптимизационную задачу поиска весов. обеспечивающих минимизацию некоторого целевого функционала. Для решения данной задачи существует множество подходов, но наиболее распространенными являются: метод наименьших квадратов, пакетный градиентный спуск, стохастический градиентный спуск, мини-пакетный градиентный спуск и его модификации (оптимизатор импульса, Adam и т. д.) [3-7]. В настоящей работе на основе применения мини-пакетного подхода предлагается использование/адаптация метода динамического расширения и смешивания регрессора (ДРСР) [8] для обучения перцептрона при решении двух классических задач машинного обучения, а именно: регрессии и бинарной классификации. Отметим, что метод ДРСР в настоящее время активно используется специалистами в области теории автоматического управления при решении задач параметрической идентификации линейных статических регрессионных моделей.

Цель работы — сравнение с известными подходами метода ДРСР, а также подтверждение эффективности его использования для повышения скорости обучения, т. е. уменьшения количества итераций для приведения целевого функционала к окрестности минимума.

Задача обучения перцептрона для регрессии заключается в построении модели, которая предсказывает непрерывное значение целевой переменной *у* на основе набора входных признаков **X**. Предположим, что дана выборка обучающих данных ( $\mathbf{X}_i, y_i$ ),  $i = \overline{1}, \overline{N}$ , где N число примеров данных;  $\mathbf{X}_i = [1 \ x_{i1} \ x_{i2} \ \cdots \ x_{ip}] \in \mathbb{R}^{p+1}$  вектор признаков размерности p + 1 для *i*-го примера;  $y_i \in \mathbb{R}$ — соответствующее значение целевой переменной.

Пусть поставлена задача поиска таких значений весов  $\mathbf{w}^T = [w_0 \ w_1 \ \cdots \ w_p] \in \mathbb{R}^{p+1}$ , которые минимизируют разницу между предсказанными  $\hat{y}_i$  и истинными значениями  $y_i$ , где функция предсказания для перцептрона имеет вид:

$$\hat{y}_i = \mathbf{X}_i \mathbf{w}$$
.

Традиционно для оценки качества модели в виде функции потерь используется среднеквадратичная ошибка, которая минимизируется с целью нахождения оптимальных значений параметров  $L_1(\mathbf{w}) = \frac{1}{N}$ 

 $=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(y_i - \hat{y}_i)^2$ . В результате обученный перцептрон дол-

жен предсказывать значения целевой переменной для новых данных на основе установленной линейной зависимости. Задача обучения перцептрона для классификации заключается в построении модели, которая способна разделять данные на два класса С<sub>1</sub> и С<sub>2</sub>. Модель представляет собой линейную регрессию, к выходу которой добавлена сигмоидная функция активации. Предполагается, что дана обучающая выборка ( $X_i, y_i$ ), i = 1, N, где N — число примеров данных;  $y_i \in \{0, 1\}$  метка класса, где 0 обозначает принадлежность к классу C<sub>1</sub>, а 1 — к классу C<sub>2</sub>. Целью обучения является поиск таких значений весов, которые позволяют классифицировать входные данные, определяя принадлежность к одному из классов. Для этого используется сигмоидная функция активации, которая преобразует линейную комбинацию входных признаков в вероятность принадлежности классу С2. Функция предсказания имеет вид  $\hat{y}_i = \sigma(\mathbf{X}_i \mathbf{w})$ , где  $\sigma(z) = (1 + e^{-z})^{-1}$  сигмоидная функция, значение которой лежит в интервале (0, 1) и интерпретируется как вероятность принадлежности к классу С2.

Для оценки качества классификации используется логистическая функция потерь (бинарная кросс-энтропия), которая минимизируется с целью нахождения

оптимальных значений весов:  $L_2(\mathbf{w}) = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (y_i \ln \hat{y}_i + (1-y_i)\ln(1-\hat{y}_i)).$ 

Рассмотрим предлагаемый для решения данной задачи метод ДРСР. Оригинальная постановка задачи выглядит следующим образом [8]. Имеется линейная регрессия вида

$$y(t) = \mathbf{m}^T(t)\mathbf{w},\tag{1}$$

где  $y(t) \in \mathbb{R}$  и  $\mathbf{m}(t) \in \mathbb{R}^q$  — известные ограниченные функции времени;  $\mathbf{w}$  — вектор неизвестных параметров, которые требуется оценить. Известно [9], что классический метод градиентного спуска позволяет решить данную задачу, но он имеет ряд существенных недостатков. Один из основных недостатков — допущение о том, что регрессор  $\mathbf{m}(t)$  удовлетворяет условию незатухающего возбуждения [9]. К другим недостаткам относятся немонотонность переходных процессов и неконструктивные алгоритмы улучшения качества параметрической сходимости. Для преодоления данных ограничений и, в первую очередь, повышения скорости параметрической сходимости в работе [8] предложен следующий метод ДРСР.

 Применим к уравнению (1) q – 1 разных динамических устойчивых операторов H<sub>i</sub> и получим q – 1 линейных регрессий вида

$$y_{f_i}(t) = \mathbf{m}_{f_i}^T(t)\mathbf{w},$$

где  $y_{f_i} = H_i[y(t)]; \mathbf{m}_{f_i}^T(t) = H_i \mathbf{m}_{f_i}^T$ . В качестве операторов могут быть выбраны, например, линейные фильтры первого порядка  $(H_i[\cdot](t) = \frac{\alpha_i}{s + \alpha_i}[\cdot](t), \alpha_i > 0, s = d/dt)$  или операторы запаздывания  $(H_i[\cdot](t) = [\cdot](t - d_i), d_i > 0)$ .

2. Сформируем расширенную регрессионную модель

$$\mathbf{Y}_{e}(t) = \mathbf{M}(t)\mathbf{w},\tag{2}$$

где  $\mathbf{Y}_{e}^{T}(t) = [y(t) \ y_{f_{1}}(t) \ \cdots \ y_{f_{q-1}}(t)];$   $\mathbf{M}^{T}(t) = [m(t) \ m_{f_{1}}(t) \ \cdots \ m_{f_{q-1}}(t)].$ 

3. Умножим уравнение (2) на союзную матрицу *adj* {**M**(*t*)} и получим *q* независимых скалярных линейных регрессий

$$Y_i(t) = \Delta(t)w_i, i = 1, ..., q,$$
 (3)

где  $Y_i(t)$  — *i*-й элемент вектора  $\mathbf{Y}(t) = adj \{\mathbf{M}(t)\} \mathbf{Y}_e(t);$  $\Delta(t) = \det\{\mathbf{M}(t)\}.$ 

 Далее каждый неизвестный параметр может быть определен с помощью градиентного спуска для соответствующей скалярной линейной регрессии (3). Запишем решение (3) в непрерывном виде в соответствии с [8]

$$\hat{w}_i(t) = \gamma_i \Delta(t) (Y_i(t) - \Delta(t) \hat{w}_i(t)), \quad i = 1, \dots, q,$$

где  $\hat{w}_i(t)$  — оценка параметра  $w_i$ .

Таким образом, применение метода ДРСР позволяет преобразовать задачу мультипараметрической оптимизации к набору скалярных регрессионных задач. Поскольку требуется оптимизировать только одно направление, метод дает возможность получить более высокие показатели качества в сравнении с классическим градиентным спуском, примененным для уравнения (1).

Перейдем непосредственно к использованию метода ДРСР для задач обучения перцептрона. Применение динамических операторов в рассматриваемой постановке задачи не представляет смысла или невозможно, так как признаки и целевая переменная не являются функциями времени. По этой причине вместо расширения регрессора воспользуемся следующим алгоритмом.

Шаг 1. Случайным образом зададим значения весов, шаг обучения а, количество эпох *K*.

Шаг 2. Выполним следующие действия для каждой эпохи обучения k, k = 1, 2, ..., K.

Шаг 2.1. Случайным образом разобьем данные на мини-пакеты размером, равным числу весов. Обозначим данные пакета  $\mathbf{X}^{bj} \in \mathbb{R}^{(p+1)\times(p+1)}, \mathbf{Y}_e^j \in \mathbb{R}^{p+1}$ , где *j* — номер мини-пакета.

Шаг 2.2. Для каждого мини-пакета имеем

$$\mathbf{Y}_{e}^{j} = \mathbf{X}^{bj} \mathbf{w}. \tag{4}$$

— Умножим слева уравнение (4) на  $\mathbf{X}^{*j}$ : =  $adj \{\mathbf{X}^{bj}\}$ . Тогда

$$\mathbf{Y}^{j} = diag\{\Delta^{j}\}\mathbf{w},$$

где  $\mathbf{Y}^{j} = \mathbf{X}^{*j} \mathbf{Y}_{e}^{j}, \mathbf{X}^{*j} \mathbf{X}^{bj} = diag\{\Delta^{j}\}, \Delta^{j} = det(\mathbf{X}^{bj}).$ 

Для снижения вычислительной сложности вместо использования затратной операции вычисления союзной матрицы воспользуемся правилом Крамера

$$Y_i^J = \det(\mathbf{X}^{bj,i}),$$

где  $\mathbf{X}^{bj,i}$  — матрица  $\mathbf{X}^{bj}$ , в которой *i*-й столбец заменен на вектор  $\mathbf{Y}_{e}^{j}$  [8];  $Y_{i}^{j}$  — *i*-й элемент вектора  $\mathbf{Y}^{j}$ . — После проведенных преобразований вместо решения задачи для регрессии с p + 1 неизвестными, требуется рассмотреть p + 1 скалярное уравнение

$$Y_i^j = \Delta i w_i, i = 1, ..., p + 1.$$

 Далее для определения весов воспользуемся градиентным спуском

$$w_i = w_i - \alpha \Delta i (Y_i^J - \Delta w_i).$$
<sup>(5)</sup>

Заметим, что для повышения устойчивости вместо (5) может быть использована формула обновления весов

$$w_i = w_i - \alpha \Delta i (Y_i^j - \Delta i w_i) / (1 + \alpha (\Delta i)^2).$$

Шаг 3. Процесс обучения завершается, если достигнуто заданное число эпох *К* или изменение функции потерь становится меньше некоторого порогового значения.

Представленное решение позволяет производить независимую оценку каждого из весов, что увеличивает скорость сходимости. Заметим, что предложенный алгоритм может быть неустойчив в случае вырожденной матрицы  $\mathbf{X}^{bj}$ , т. е. в случае мультиколлинеарности данных. Для предотвращения данной ситуации применимы различные способы. Например, возможно исключить коллинеарность признаков на этапе предобработки данных.

Для исследования метода ДРСР и его сравнительного анализа с классическим методом стохастического мини-пакетного градиентного спуска (СГС) и Adam используем набор данных, включающий в себя 100 образцов с четырьмя признаками ( $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^{100 \times 4}$ ,  $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^{100}$ ). Данные получены с помощью функции «make\_regression» библиотеки sklearn. Шум в данных имеет нормальное распределение со среднеквадратическим отклонением, равным 1. Перед обучением проведена нормализация данных. Скорость обучения для всех алгоритмов выбрана  $\alpha = 0,01$ . Начальные веса инициализированы случайными числами в диапазоне от 0 до 1. Результаты компьютерного моделирования методов ДРСР, СГС и Adam представлены на рисунке.



*Рисунок*. Целевой функционал в процессе обучения для задач регрессии (*a*) и классификации (*b*) *Figure*. Loss function in the learning process: for the regression task (*a*), for the classification task (*b*)

На рисунке, *а* приведены графики целевой функции  $L_1$  в процессе обучения для трех сравниваемых итеративных методов. Видно, что решение, основанное на методе ДРСР, имеет существенно более высокую скорость сходимости, особенно на первых итерациях.

Для решения задачи классификации метод ДРСР останется неизменным, за исключением формулы для обновления весов:

$$w_i := w_i - \alpha \Delta i (Y_i^J - \sigma(\Delta i w_i)).$$

Для проведения сравнительного анализа был использован набор данных Iris. В нем содержится информация о трех различных видах цветов (всего 150 примеров данных, по 50 на каждый из цветов). Каждый пример имеет четыре признака: длина и ширина чашелистника, длина и ширина лепестка. Для задачи бинарной классификации все примеры разделены на два класса: являющиеся Iris setosa и прочие. На рисунке, *b* приведены графики целевой функции L<sub>2</sub> в процессе

#### Литература

- Rosenblatt F. The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain // Psychological Review. 1958. V. 65. N 6. P. 386–408. https://doi.org/10.1037/h0042519
- 2. Хайкин С. Нейронные сети: Полный курс. 2-е изд. М.: «Вильямс», 2006. 1103 с.
- Karthick K. Comprehensive Overview of Optimization Techniques in Machine Learning Training // Control Systems and Optimization Letters. 2024. V. 2. N 1. P. 23–27. https://doi.org/10.59247/csol. v2i1.69
- Reyad M., Sarhan A.M., Arafa M. A modified Adam algorithm for deep neural network optimization // Neural Computing and Applications. 2023. V. 35. N 23. P. 17095–17112. https://doi. org/10.1007/s00521-023-08568-z
- Wang Y., Xiao Z., Cao G. A convolutional neural network method based on Adam optimizer with power-exponential learning rate for bearing fault diagnosis // Journal of Vibroengineering. 2022. V. 24. N 4. P. 666–678. https://doi.org/10.21595/jve.2022.22271
- Liu M., Yao D., Liu Z., Guo J., Chen J. An improved Adam optimization algorithm combining adaptive coefficients and composite gradients based on randomized block coordinate descent // Computational Intelligence and Neuroscience. 2023. V. 10. N 1. P. 4765891. https://doi.org/10.1155/2023/4765891
- Демиденко Е.З. Линейная и нелинейная регрессия. М.: Финансы и статистика, 1981. 302 с.

обучения для трех рассмотренных итеративных методов. Видно, что решение, основанное на методе ДРСР, имеет более высокую скорость сходимости целевого функционала.

Таким образом, в каждом случае предложенное на основе метода ДРСР решение показало более высокую скорость сходимости, особенно на первых итерациях. Также данный метод имеет всего один гиперпараметр, что значительно упрощает его настройку по сравнению с другими методами. Предложенный подход может быть развит на другие классы алгоритмов машинного обучения, в частности метод опорных векторов, полносвязные, сверточные и рекуррентные нейронные сети. В качестве перспективы возможно применение полученного результата для создания гибридных алгоритмов оптимизации: на первых итерациях применяется предложенное решение с высокой скоростью сходимости, на последующих — более устойчивые методы, такие как Adam.

#### References

- Rosenblatt F. The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological Review*, 1958. vol. 65, no. 6, pp. 386–408. https://doi.org/10.1037/h0042519
- Haykin Simon S. Neural Networks: A Comprehensive Foundation. Macmillan, 1994, 696 p.
- Karthick K. Comprehensive overview of optimization techniques in machine learning training. *Control Systems and Optimization Letters*, 2024, vol. 2, no. 1, pp. 23–27. https://doi.org/10.59247/csol. v2i1.69
- Reyad M., Sarhan A.M., Arafa M. A modified Adam algorithm for deep neural network optimization. *Neural Computing and Applications*, 2023, vol. 35, no. 23, pp. 17095–17112. https://doi. org/10.1007/s00521-023-08568-z
- Wang Y., Xiao Z., Cao G. A convolutional neural network method based on Adam optimizer with power-exponential learning rate for bearing fault diagnosis. *Journal of Vibroengineering*, 2022, vol. 24, no. 4, pp. 666–678. https://doi.org/10.21595/jve.2022.22271
- Liu M., Yao D., Liu Z., Guo J., Chen J. An improved Adam optimization algorithm combining adaptive coefficients and composite gradients based on randomized block coordinate descent. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2023, vol. 10, no. 1, pp. 4765891. https://doi.org/10.1155/2023/4765891
- 7. Demidenko E.Z. *Linear and Nonlinear Regression*. Moscow, Finstat Publ., 1981, 302 p. (in Russian)

- Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkin A. Performance enhancement of parameter estimators via dynamic regressor extension and mixing // IEEE Transactions on Automatic Control. 2017. V. 62. N 7. https://doi.org/10.1109/tac.2016.2614889
- Ljung L. System Identification: Theory for the User. Prentice-Hall, 1987. 519 p.

#### Авторы

Маргун Алексей Анатольевич — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; научный сотрудник, Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация, SC 55521791600, https://orcid.org/0000-0002-5333-0594, alexeimargun@ gmail.ru

Зименко Константин Александрович — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, sc 55355650800, https://orcid.org/0000-0001-6220-7494, kostyazimenko@gmail.com

**Бобцов Алексей Алексеевич** — доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, вс 8046819200, https://orcid.org/0000-0003-1854-6717, bobtsov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 05.11.2024 Одобрена после рецензирования 09.12.2024 Принята к печати 22.01.2025

- Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkin A. Performance enhancement of parameter estimators via dynamic regressor extension and mixing. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, vol. 62, no. 7. https://doi.org/10.1109/tac.2016.2614889
- 9. Ljung L. System Identification: Theory for the User. Prentice-Hall, 1987, 519 p.

#### Authors

Alexey A. Margun — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Scientific Researcher, Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation Sc 55521791600, https://orcid.org/0000-0002-5333-0594, alexeimargun@gmail.com

Konstantin A. Zimenko — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Sc 55355650800, https://orcid.org/0000-0001-6220-7494, kostyazimenko@gmail.com

Alexey A. Bobtsov — D.Sc., Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, sc 8046819200, https://orcid. org/0000-0003-1854-6717, bobtsov@mail.ru

Received 05.11.2024 Approved after reviewing 09.12.2024 Accepted 22.01.2025



Работа доступна по лицензии Creative Commons «Attribution-NonCommercial» **I/İTMO** 

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ январь-февраль 2025 Том 25 № 1 http://ntv.ifmo.ru/ SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS January-February 2025 Vol. 25 No 1 http://ntv.ifmo.ru/en/ ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

университет итмо

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-174-177 УДК 004.056.55

# WaveVRF: постквантовая проверяемая псевдослучайная функция, основанная на кодах, исправляющих ошибки

## Жан-Мишель Никодэмович Дакуо

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация КуАпп, Москва, 121205, Российская Федерация

jeandakuo@mail.ru<sup>\ZI</sup>, https://orcid.org/0000-0002-4084-8829

#### Аннотация

Предложена новая проверяемая псевдослучайная функция (Verifiable Random Function, VRF), основанная на задаче синдромного декодирования и подписи Wave, устойчивая к атакам квантового компьютера. Разработанная новая схема VRF демонстрирует возможность применения задачи синдромного декодирования для реализации криптографически стойких решений. Представлено описание ключевых алгоритмов VRF (KeyGen, VRFEval, VRFVerify). Показаны основные свойства функции: полная доказуемость, уникальная доказуемость и псевдослучайность.

#### Ключевые слова

VRF, криптография, Wave, PRG, проблема синдромного декодирования

#### Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания (проект FSER-2025-0003).

Ссылка для цитирования: Дакуо Ж.-М.Н. WaveVRF: постквантовая проверяемая псевдослучайная функция, основанная на кодах, исправляющих ошибки // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 1. С. 174–177. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-174-177

# WaveVRF: post-quantum verifiable random function based on error-correcting codes

#### Zhan-Mishel N. Dakuo⊠

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation QApp, Moscow, 121205, Russian Federation

jeandakuo@mail.ru<sup>\overlinew</sup>, https://orcid.org/0000-0002-4084-8829

#### Abstract

This paper introduces a novel Verifiable Random Function (VRF) based on the syndrome decoding problem and Wave signature, resistant to quantum computer attacks. The primary goal of this work is to present a new VRF scheme that demonstrates the applicability of the syndrome decoding problem for constructing cryptographically robust solutions. The paper describes the core VRF algorithms (KeyGen, VRFEval, VRFVerify) and highlights its essential properties: provability, uniqueness, and pseudo-randomness.

#### Keywords

VRF, cryptography, Wave, PRG, syndrome decoding problem

#### Acknowledgments

The work was carried out within the framework of the state assignment (project FSER-2025-0003).

**For citation:** Dakuo Zh-M.N. WaveVRF: post-quantum verifiable random function based on error-correcting codes. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 1, pp. 174–177 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-174-177

© Дакуо Ж.-М.Н., 2025

Проверяемая псевдослучайная функция (Verifiable Random Function, VRF) является важным криптографическим механизмом, который сочетает в себе свойства генерации псевдослучайных чисел и возможность проверки их подлинности. VRF широко применяется в блокчейн-системах [1], протоколах, используемых в WhatsApp [2], и других. В известных научных работах предложены подходы к реализации VRF, основанные на различных криптографических задачах, например, на задаче RSA [3], на эллиптических кривых [4], а также существуют постквантовые VRF, например, на решетках [5], изогениях [6] и хэшах [7].

Однако классические решения уязвимы к атакам квантового компьютера. С развитием квантовых вычислений возникла необходимость в новых криптографических подходах. Несмотря на то, что постквантовые VRF и предлагают защиту от атак квантовых компьютеров, но сталкиваются с проблемами высокой вычислительной сложности и ограниченной масштабируемости.

Предлагаемый подход, основанный на схеме подписи Wave [8], отличается использованием проблемы синдромного декодирования. Также подход имеет удобное масштабирование, так как его параметры зависят от параметров используемого помехоустойчивого кода. В результате предлагаемая VRF устойчива к квантовым атакам.

VRF состоит из трех основных алгоритмов: *KeyGen*() — отвечает за генерацию ключевой пары; VRFEval() — вырабатывает псевдослучайное число и доказательство для него из полученного на входе значения и секретного ключа; VRFVerify() — проверяет псевдослучайное значение на подлинность, используя открытые ключ и параметры.

Для соответствия критериям VRF предлагаемая схема должна обладать следующими свойствами: полная доказуемость (гарантирует, что вероятность принятия корректного доказательства любым пользователем, владеющим открытым ключом, практически равна единице); уникальная доказуемость (означает, что вероятность принятия поддельного доказательства пренебрежимо мала); псевдослучайность (обеспечивает вероятность того, что злоумышленник отличит результат VRF от случайного значения без знания секретного ключа, будет близка к 1/2).

Рассмотрим предлагаемую схему WaveVRF с использованием обозначений и классов кодов.

Введем краткие обозначения:

- 1.  $\mathbb{F}_q$  *q*-ичное конечное поле;
- 2.  $\mathbf{a} \in \mathbb{F}_q^n$  вектор  $\mathbf{a} = (a_0, ..., a_{n-1}) \in \mathbb{F}_q^n$ ; 3.  $wt(\mathbf{a})_H$  вес Хэмминга  $\mathbf{a} \in \mathbb{F}_q^n$ ,  $wt(\mathbf{a})_H =$  $= |\{i, 0 \le i < n \mid a(i) \ne 0\}|;$
- 4.  $\mathbf{M} \in \mathbb{F}_q^{r \times n}$  матрица  $(M_{i,j})_{0 \le i < r, 0 \le j < n}$  над полем  $\mathbb{F}_q$ ; 5.  $\mathbf{a} \star \mathbf{b}$  покомпонентное умножение  $\mathbf{a} \star \mathbf{b}$  =  $= (a_i b_i)_{0 \le i \le n} \mathbf{a}, \mathbf{b} \in \mathbb{F}_q^n;$
- 6.  $\mathbf{b} \star \mathbf{M}$  построчное умножение  $\mathbf{b} \star \mathbf{M} =$  $= (a_i M_{i,j})_{0 \le i < r, \ 0 \le j < n};$
- 7.  $S_n симметрическая группа перестановок <math>\{0, ..., n-1\};$
- 8.  $\mathbf{M}^{\pi}$  перемешивание столбцов =  $(M_{i,\pi(j)})_{0 \le i < r, \ 0 \le j < n}, \pi \in S_n, M \in \mathbb{F}_q^{r \times n}$ .  $M\pi =$

Некоторые классы кодов, предназначенные для исправления ошибок, за последние 60 лет продемонстрировали свою криптографическую стойкость и надежность в различных приложениях. Линейным троичным  $[n, k]_3$ -кодом C называется k-размерное подпространство  $\mathbb{F}_3^n$  вида:

$$\mathcal{C} = \{ \mathbf{y} \in \mathbb{F}_3^n | \mathbf{y} \mathbf{H}^T = \mathbf{0} \},\$$

где **H** — проверочная матрица размерности n - k на n;  $\mathbf{y}\mathbf{H}^{T}$  — синдром вектора  $\mathbf{y}$ .

Предлагаемая схема, как и подпись Wave строится с использованием перемешанных (U | U + V)-кодов.

Определение 1 (перемешанный (U | U + V)-код). Пусть  $n, k_U, k_V$  — целые числа, где n — четное и  $k_U, k_V \le n/2; U - [n/2, k_U]_3$ -код с порождающей матрицей  $G_U$  и проверочной матрицей  $H_U$ ;  $V - [n/2, k_V]_3$ -код с порождающей матрицей  $\mathbf{G}_V$ и проверочной матрицей  $\mathbf{H}_{V}$ ;  $\pi$  — перестановка из  $S_{n}$ ; **b**, **c** — вектора из  $\mathbb{F}_{3}^{n/2}$ , где  $c_i ≠ 0$  для всех  $i \in [0, n/2)$ .

Тогда перемешанный (U | U + V)-код, ассоциированный с  $(U, V, \pi, \mathbf{b}, \mathbf{c}) - [n, k_U + k_V]_a$ -код с порождающей G и проверочной H матрицами, определенных следующим образом:

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} \mathbf{G}_U & \mathbf{c} \star \mathbf{G}_U \\ \mathbf{b} \star \mathbf{G}_V & \mathbf{d} \star \mathbf{G}_V \end{pmatrix}^{\pi} \mathbf{\mu} \mathbf{H} = \begin{pmatrix} \mathbf{d} \star \mathbf{H}_U - \mathbf{b} \star \mathbf{H}_U \\ -\mathbf{c} \star \mathbf{H}_V & \mathbf{H}_V \end{pmatrix}^{\pi},$$

где  $\mathbf{d} = 1 + \mathbf{b} \star \mathbf{c}$ . Очевидно, что матрица **H** может быть приведена к виду ( $I_{n-k} | \mathbf{R}$ ), где **I** — единичная матрица размера n - k на n - k, а **R** матрица  $\in \mathbb{F}_3^{(n-k) \times k}$ .

Стойкость предлагаемой схемы VRF, подписи Wave и псевдослучайного генератора строится на задаче синдромного декодирования.

Определение 2 (проблема синдромного декодирования (DP(q; n, k, t))). Конечное поле  $\mathbb{F}_q$  и целые числа n, k, t такие что, n > k > 0 и 0 < t < n.

Дано: (**H**, **s**)  $\in \mathbb{F}_q^{(n-k) \times n} \times \mathbb{F}_q^{n-k}$ , где  $wt(\mathbf{e}) = t$  и  $\mathbf{e}\mathbf{H}^T = \mathbf{s}$ .

Задача: при известном **H**  $\overset{\prime}{}$  **s** найти **e**  $\in \mathbb{F}_{q}^{n}$ , такое что  $wt(\mathbf{e}) = t \mathbf{H} \mathbf{e} \mathbf{H}^T = \mathbf{s}.$ 

Так как используются случайные коды, то для них на DP(q; n, k, t) накладываются некоторые ограничения по t, но проблема все также остается экспоненциально сложной, доказательство в работе [9].

Рассмотрим главную концепцию схемы WaveVRF. Предлагаемая схема в общем повторяет схему подписи Wave. За исключением того, что из входного значения сначала формируется псевдослучайное число, например, при помощи псевдослучайного генератора Фишера-Штерна (PRG), аргументами которого является случайный вектор и проверочная матрица (U | U + V)-кода [10, 11]. Уровень стойкости  $\lambda$  подбирается на основе требований системы. В работе [8] доказано, что существует такой синдром s, для которого есть решение тождества (1) при всех прочих известных параметрах, и он может быть получен при знании (U | U + V)-кода и перестановки. При построении кода было выбрано поле характеристики равное трем, потому что такая характеристика позволяет получить порождающую и проверочную матрицы статистически неотличимые от случайных. Также выбор такой характеристики поля позволяет попасть в параметры схемы, для которых вероятность неверного декодирования будет 2-87 [8].

#### Параметры предлагаемой системы:

- 1. характеристика поля q = 3;
- 2. уровень стойкости λ;
- 3. длина кода *n*;
- 4. вес w;
- 5. размерность U кода:  $k_U$ ;
- 6. размерность V кода:  $k_V$ ;
- 7. размерность (U | U + V)-кода:  $k = k_U + k_V$ . Секретный ключ. Кортеж  $\{U, V, \pi, \mathbf{b}, \mathbf{c}\}$ , определя-

ющий перестановочный (U | U + V)-код. **Открытый ключ.** Матрица  $\mathbf{R} \in \mathbb{F}_{3}^{(n-k) \times k}$ , полученная

из проверочной матрицы  $\mathbf{H}(U | U + V)$ -кода.

VRFEval. Сначала вырабатывается псевдослучайное число v: =  $PRG(\mathbf{x}, \mathbf{H})$  где  $\mathbf{x} \in \mathbb{F}_3^n$  — передаваемое на вход алгоритма значение. Далее выбирается случайный вектор salt  $\in \mathbb{F}_2^{2\lambda}$  и вычисляется подпись по парадигме «хэшируй и подписывай». Таким образом, при помощи алгоритма подписи Wave ([8], секция 1.1) с параметрами salt и *v* вычисляется вектор  $\mathbf{s} \in \mathbb{F}_3^k$  вида:

$$wt_{H}(\mathbf{s}) + wt_{H}(Hash(\mathbf{salt}||\mathbf{x}||v) - \mathbf{sR}^{T}) = w.$$
(1)

Результатом алгоритма является кортеж proof = $= \{ salt, s \}$  и v.

#### Литература

- 1. Kiayias A., Russell A., David B., Oliynykov R. Ouroboros: A provably secure proof-of-stake blockchain protocol // Lecture Notes in Computer Science. 2017. V. 10401. P. 357-388. https://doi. org/10.1007/978-3-319-63688-7 12
- Chagas V., Da-Costa G. WhatsApp and transparency: an analysis on the effects of digital platforms' opacity in political communication research agendas in Brazil // Profesional de la información. 2023. V. 32. N 2. P. e320223. https://doi.org/10.3145/epi.2023.mar.23
- Micali S., Rabin M., Vadhan S. Verifiable random functions // Proc. 3 of the 40th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (cat. No. 99CB37039). 1999. P. 1-11. https://doi.org/10.1109/ SFFCS.1999.814584
- 4. Dodis Y., Yampolskiy A. A verifiable random function with short proofs and keys // Lecture Notes in Computer Science. 2005. V. 3386. P. 416-431. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30580-4\_28
- Esgin M.F., Steinfeld R., Liu D., Ruj S. Efficient hybrid exact/relaxed lattice proofs and applications to rounding and VRFs // Lecture Notes in Computer Science. 2023. V. 14085. P. 484-517. https://doi. org/10.1007/978-3-031-38554-4\_16
- 6. Leroux A. Verifiable random function from the Deuring correspondence and higher dimensional isogenies: Preprint // HAL science ouverte. 2023. https://hal.science/hal-04389904v1
- 7. Esgin M.F., Ersoy O., Kuchta V., Loss J., Sakzad A., Steinfeld R., Yang X., Zhao R.K., A new look at blockchain leader election: Simple, efficient, sustainable and post-quantum // Proc. of the ACM Asia Conference on Computer and Communications Security. 2023. P. 623-637. https://doi.org/10.1145/3579856.3595792
- Gasparovic R.F., Apel J.R., Kasischke E.S. An overview of the SAR internal wave signature experiment // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1988. V. 93. N C10. P. 12304-12316. https://doi. org/10.1029/jc093ic10p12304
- Thomas Debris-Alazard. Post-Quantum Cryptography Codes; Lecture 2: Random Codes [Электронный ресурс] URL: https:// tdalazard.io/lecture2.pdf (дата обращения: 28.10.2024).
- 10. Fischer J.B., Stern J. An efficient pseudo-random generator provably as secure as syndrome decoding // Lecture Notes in Computer Science. 1996. V. 1070. P. 245-255. https://doi.org/10.1007/3-540-68339-9 22
- 11. Kuznetsov A., Kiian A., Smirnov O., Cherep A., Kanabekova M., Chepurko I. Testing of code-based pseudorandom number generators for post-quantum application // Proc. of the 2020 IEEE 11th

VRFVerify. Для проверки используются полученные *proof*, v,  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{R}$  и открытые параметры схемы. Все значения подставляются в соотношение (1) и проверяется его корректность.

Полная доказуемость предложенной схемы прямо следует из схемы подписи Wave [8]. Уникальная доказуемость WaveVRF гарантируется использованием детерминированного алгоритма выработки числа v и кортежа proof. Псевдослучайность обеспечивается благодаря тому, что в основе WaveVRF — псевдослучайный генератор Фишера-Штерна.

В результате данной работы предложена новая идея схемы построения постквантовой VRF с использованием задачи синдромного декодирования. Благодаря использованию псевдослучайного генератора Фишера-Штерна, WaveVRF сохраняет ключевые криптографические свойства VRF: полную доказуемость, уникальную доказуемость и псевдослучайность. Представленное решение открывает новые возможности для использования VRF в системах, требующих квантовой защищенности. Результаты работы могут быть использованы для дальнейших исследований в области постквантовых VRF.

#### References

- 1. Kiayias A., Russell A., David B., Oliynykov R. Ouroboros: A provably secure proof-of-stake blockchain protocol. Lecture Notes in Computer Science, 2017, vol. 10401, pp. 357-388. https://doi. org/10.1007/978-3-319-63688-7 12
- Chagas V., Da-Costa G. WhatsApp and transparency: an analysis on the effects of digital platforms' opacity in political communication research agendas in Brazil. Profesional de la información, 2023, vol. 32, no. 2, pp. e320223. https://doi.org/10.3145/epi.2023.mar.23
- Micali S., Rabin M., Vadhan S. Verifiable random functions. Proc. of 3 the 40th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (cat. No. 99CB37039), 1999, pp. 1-11. https://doi.org/10.1109/ SFFCS.1999.814584
- Dodis Y., Yampolskiy A. A verifiable random function with short 4. proofs and keys. Lecture Notes in Computer Science, 2005, vol. 3386, pp. 416-431. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30580-4\_28
- Esgin M.F., Steinfeld R., Liu D., Ruj S. Efficient hybrid exact/relaxed lattice proofs and applications to rounding and VRFs. Lecture Notes in Computer Science, 2023, vol. 14085, pp. 484-517. https://doi. org/10.1007/978-3-031-38554-4\_16
- 6. Leroux A. Verifiable random function from the Deuring correspondence and higher dimensional isogenies: Preprint. HAL science ouverte, 2023, https://hal.science/hal-04389904v1
- Esgin M.F., Ersoy O., Kuchta V., Loss J., Sakzad A., Steinfeld R., Yang X., Zhao R.K., A new look at blockchain leader election: Simple, efficient, sustainable and post-quantum. Proc. of the ACM Asia Conference on Computer and Communications Security, 2023, pp. 623-637. https://doi.org/10.1145/3579856.3595792
- 8 Gasparovic R.F., Apel J.R., Kasischke E.S. An overview of the SAR internal wave signature experiment. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1988, vol. 93, no. C10, pp. 12304-12316. https://doi. org/10.1029/jc093ic10p12304
- Thomas Debris-Alazard. Post-Quantum Cryptography Codes; Lecture 2: Random Codes. Available at: https://tdalazard.io/lecture2. pdf (accessed: 28.10.2024)
- 10. Fischer J.B., Stern J. An efficient pseudo-random generator provably as secure as syndrome decoding. Lecture Notes in Computer Science, 1996, vol. 1070, pp. 245-255. https://doi.org/10.1007/3-540-68339-9 22
- 11. Kuznetsov A., Kiian A., Smirnov O., Cherep A., Kanabekova M., Chepurko I. Testing of code-based pseudorandom number generators for post-quantum application. Proc. of the 2020 IEEE 11th

International conference on dependable systems, services and technologies (DESSERT). 2020. P. 172–177. https://doi.org/10.1109/ dessert50317.2020.9125045

#### Автор

Дакуо Жан-Мишель Никодэмович — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; ассистент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация; криптограф-исследователь, КуАпп, Москва, 121205, Российская Федерация, вс 57884002100, https://orcid.org/0000-0002-4084-8829, jeandakuo@mail.ru

Статья поступила в редакцию 09.01.2025 Одобрена после рецензирования 24.01.2025 Принята к печати 31.01.2025 International conference on dependable systems, services and technologies (DESSERT), 2020, pp. 172–177. https://doi.org/10.1109/ dessert50317.2020.9125045

#### Author

Zhan-Mishel N. Dakuo — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Assistant, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation; Cryptographer Researcher, QApp, Moscow, 121205, Russian Federation, Sc 57884002100, https://orcid.org/0000-0002-4084-8829, jeandakuo@mail.ru

Received 09.01.2025 Approved after reviewing 24.01.2025 Accepted 31.01.2025



Работа доступна по лицензии Creative Commons «Attribution-NonCommercial» Уважаемые подписчики научно-технической литературы!

Журнал выходит 6 раз в год.

На журнал «Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики» можно оформить подписку в почтовых отделениях по объединенному каталогу «Пресса России», подписные индексы 47197 (полугодовая подписка),

а также online

по объединенному каталогу «Пресса России» и по каталогу «Пресса по подписке», подписные индексы Э47197 (полугодовая подписка) и по электронному каталогу Почты России, подписной индекс ПС543. Корпоративная подписка и подписка физических лиц возможна по каталогу компаний «Урал-Пресс»,

подписные индексы 47197 (полугодовая подписка) и 70522 (годовая подписка).

Сведения о подписке можно уточнить в редакции журнала по адресу: Санкт-Петербург, ул. Ломоносова., д.9, литера А, комн. 2136.

Тел.: +7(812) 480 02 75