

Д. П. Никоноров, А. С. Катасёв

**ПРОГРАММА АУГМЕНТАЦИИ ДАННЫХ ПУПИЛЛОГРАФИИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ
НЕЙРОСЕТЕВЫХ СВЕРТОЧНЫХ МОДЕЛЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО
СОСТОЯНИЯ УТОМЛЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА**

Ключевые слова: пупиллография, пупиллограмма, аугментация данных, нейросетевая сверточная модель, состояние утомления человека, моделирование.

Статья посвящена разработке и использованию программы для аугментации пупиллограмм и построения нейросетевых сверточных моделей, предназначенных для определения функционального состояния утомления человека. Перспективным направлением исследований является анализ динамики зрачковой реакции человека на световой стимул для оценки уровня умственной нагрузки, стресса и утомления человека. Однако применение методов машинного обучения для обработки пупиллографических данных часто бывает ограничено из-за недостаточного количества и вариативности размеченных данных, что снижает точность и обобщающую способность моделей. Генерация синтетических данных с учетом физиологических закономерностей зрачковых реакций позволит повысить качество обучения моделей и улучшить их способность к определению функционального состояния утомления человека. Для решения этой задачи в работе использован экспериментальный набор данных, собранный коллективом исследователей КНИТУ-КАИ с помощью специального программно-аппаратного комплекса. Набор включает 384 изображения пупиллограмм размером 640x480 пикселей 2-х классов, соответствующих состояниям усталости и бодрствования человека. Для аугментации набора данных выбраны следующие методы: дрожание, дрейф, искажение времени и усреднение значений. В качестве языка программирования для разработки программы выбран Python. Разработанная программа включает в себя следующий функционал: загрузка txt файлов, выбор директории для выгрузки файлов, выбор методов аугментации данных, визуализация пупиллограмм, аугментация данных, верификация сгенерированных данных, выгрузка сгенерированных данных в форматах txt и png. Использование программы позволило расширить набор данных с 384 изображений до 831. Для оценки эффективности аугментации и качества полученного набора данных проведено обучение двух сверточных сетей на основе модели ResNet с одинаковыми значениями гиперпараметров. Первая сеть обучена на исходном наборе данных, а вторая – на аугментированном. Рассчитаны значения метрик Accuracy, Precision, Recall и F1-мера. Результаты исследования показали эффективность применения аугментации данных пупиллографии для построения сверточных моделей. Полученные результаты могут быть использованы в качестве основы для дальнейших исследований в области определения функционального состояния утомления человека.

D. P. Nikonorov, A. S. Katasev

**AUGMENTATION PROGRAM OF PUPILLOGRAPHY DATA FOR CONSTRUCTING
NEURAL NETWORK CONVOLUTIONAL MODELS FOR DETERMINING
THE FUNCTIONAL STATE OF HUMAN FATIGUE**

Keywords: pupillography, pupillogram, data augmentation, neural network convolutional model, human fatigue state, modeling.

The article is devoted to the development and use of a program for augmenting pupillograms and constructing neural network convolutional models designed to determine the functional state of human fatigue. A promising area of research is the analysis of the dynamics of the human pupillary response to a light stimulus to assess the level of mental workload, stress and fatigue of a person. However, the use of machine learning methods for processing pupillographic data is often limited due to the insufficient amount and variability of labeled data, which reduces the accuracy and generalizing ability of the models. Generating synthetic data taking into account the physiological patterns of pupillary responses will improve the quality of model training and improve their ability to determine the functional state of human fatigue. To solve this problem, the work used an experimental dataset collected by a team of KNITU-KAI researchers using a special hardware and software complex. The set includes 384 pupillogram images measuring 640x480 pixels of 2 classes corresponding to human fatigue and wakefulness. The following methods were selected for dataset augmentation: jitter, drift, time distortion, and value averaging. Python was selected as the programming language for developing the program. The developed program includes the following functionality: loading txt files, selecting a directory for uploading files, selecting data augmentation methods, visualizing pupillograms, augmenting data, verifying generated data, uploading generated data in txt and png formats. Using the program allowed us to expand the dataset from 384 images to 831. To evaluate the augmentation efficiency and the quality of the resulting dataset, two convolutional networks based on the ResNet model with the same hyperparameter values were trained. The first network was trained on the original dataset, and the second on the augmented one. The values of the Accuracy, Precision, Recall, and F1-measure metrics were calculated. The results of the study showed the efficiency of using pupillogram data augmentation to build convolutional models. The obtained results can be used as a basis for further research in the field of determining the functional state of human fatigue.

Введение

Современные условия профессиональной деятельности предъявляют высокие требования к работоспособности и когнитивным функциям человека. При этом длительные когнитивные и физические нагрузки могут приводить к развитию состояния утомления [1], которое негативно влияет на продуктивность, скорость принятия решений и безопасность труда, особенно в критических областях, таких как авиация, медицина, промышленное производство и управление транспортными системами [2, 3]. В связи с этим актуальной задачей становится разработка эффективных методов автоматизированного определения функционального состояния человека, позволяющих своевременно выявлять признаки его утомления и предотвращать негативные последствия [4].

Одним из перспективных направлений в данной области является анализ динамики зрачковой реакции человека на световой стимул (пупиллография) [5, 6]. Такой анализ позволяет косвенно оценивать уровень умственной нагрузки, стресса и утомления человека. Изменения диаметра зрачка, его колебания и латентное время реакций коррелируют с активностью центральной нервной системы человека, что делает пупиллографию эффективным методом в психофизиологических исследованиях [7, 8]. Однако применение методов машинного обучения [9-11], в частности, нейронных сетей [12-15] и сверточных нейронных сетей [16-18], для обработки пупиллографических данных часто бывает ограничено из-за недостаточного количества и вариативности размеченных данных, что снижает точность и обобщающую способность моделей.

В работе предлагается подход к решению этой задачи за счет разработки и применения программы аугментации данных пупиллографии, направленной на расширение и искусственное разнообразие данных для моделирования [19, 20]. Генерация синтетических данных с учетом физиологических закономерностей зрачковых реакций позволит повысить качество обучения нейросетевых моделей и улучшить их способность к определению функционального состояния утомления человека. Результаты исследования могут быть использованы для создания интеллектуальных систем [21, 22], что имеет значительный практический потенциал во многих областях деятельности.

Способы получения и описание исходных данных для анализа

Современные исследования динамики зрачковых реакций на световой стимул опираются на комплексы аппаратно-программных средств, обеспечивающих высокоточную регистрацию и обработку пупиллограмм. Основным инструментом получения данных служит видеоокулография с инфракрасной подсветкой, позволяющая фиксировать изменения диаметра зрачка с высокой частотой и точностью [23]. Этот метод основан на видеозаписи изображения глаза в инфракрасном спектре, что исключает влияние видимого света и реакцию зрачка на изменение освещенности.

Современные системы регистрации зрачковых реакций и получения пупиллограмм можно разделить на стационарные и мобильные. Стационарные установки, такие как Tobii Pro Spectrum или EyeLink 1000 Plus [24], обеспечивают высокую частоту записи и точность измерений, но требуют фиксации головы испытуемого. Мобильные системы, включая айтрекеры Pupil Labs Core и очки Tobii Pro Glasses 3 [25], позволяют проводить исследования в естественных условиях при частоте записи 30-200 Гц, хотя и с несколько меньшей точностью.

Особое место среди систем регистрации зрачковых реакций занимают пупиллометры [26], использующие узконаправленные инфракрасные датчики для точечного измерения диаметра зрачка. Эти устройства могут быть как контактными (с фиксацией на голове), так и бесконтактными, автоматически отслеживающими положение зрачка при свободном движении испытуемого. В последние годы также получили распространение VR-гарнитуры со встроенными камерами для регистрации зрачковых реакций в виртуальной среде [27].

Программная обработка пупиллографических данных включает несколько ключевых этапов. На первом этапе осуществляется детекция зрачка с использованием традиционных алгоритмов (например, подгонки эллипса [28]) или нейросетевых методов сегментации [29]. Затем производится фильтрация данных для устранения артефактов, связанных с морганием и движениями глаз, с применением методов интерполяции и вейвлет-преобразований [30]. Завершающим этапом является нормализация данных, включающая коррекцию базовой линии и пересчет в относительные единицы.

В работе для определения состояния утомления человека использован экспериментальный набор данных [31], собранный коллективом исследователей КНИТУ-КАИ с помощью специального программно-аппаратного комплекса [32, 33], внешний вид которого представлен на рисунке 1.



Рис. 1 – Внешний вид программно-аппаратного комплекса для получения пупиллограмм

Fig. 1 – External appearance of the hardware and software complex for obtaining pupillograms

Набор данных состоит из 384 изображений пупиллограмм размером 640x480 пикселей, представляющих график динамики изменения нормированного диаметра зрачка на световой стимул в течение 3-х секунд. Набор включает примерно равное

число изображений 2-х классов, соответствующих состояниям усталости и бодрствования человека.

На рисунке 2 представлен пример пупиллограммы из набора данных [31].

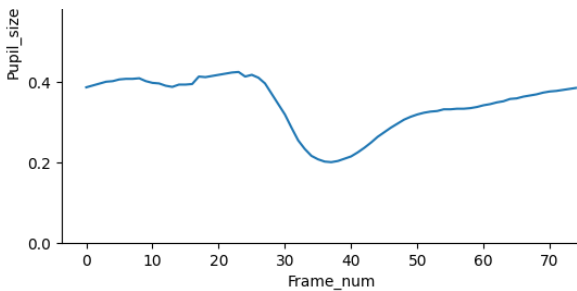


Рис. 2 – Пример пупиллограммы из набора данных

Fig. 2 – Example pupillogram from the dataset

Зрачковые реакции могут отличаться изменениями диаметра зрачка в зависимости от усталости человека. Как правило, зрачковая реакция человека, находящегося в состоянии бодрствования, более выраженная, чем у уставшего человека [34, 35].

Методы аугментации пупиллограмм

Собранные с помощью программно-аппаратного комплекса пупиллографические данные представляют собой набор данных в двух видах: текстовый файл и цифровое изображение. Цифровое изображение необходимо для наглядного представления графика и обучение сверточной нейросетевой модели. При этом текстовый файл содержит записи точек графика (временного ряда). Так как целью аугментации является повышение разнообразности цифровых изображений графиков зрачковых реакций, то принято решение использовать методы аугментации временных рядов. Такой подход позволяет увеличить количество изображений пупиллограмм путем аугментации значений временных рядов данных.

Существует множество методов аугментации временных рядов [36, 37]. Во избежание формирования нереалистичных данных необходимо использовать методы с учетом специфики решаемой задачи. Исходя из этого, для аугментации пупиллограмм выбраны следующие методы:

- дрожание (jittering);
- дрейф (drift);
- искажение времени (time wrap);
- усреднение значений (pooling).

Эти методы позволяют сформировать новые данные на основе существующих временных рядов без критического изменения их графиков. Это позволяет увеличить набор данных с сохранением особенностей и реалистичности пупиллограмм.

Разработка и описание программы для аугментации пупиллограмм

В качестве языка программирования для разработки программы выбран Python из-за большого разнообразия библиотек [38]. Для аугментации данных временных рядов использована библиотека tsaug, благодаря широкому спектру методов аугмен-

тации и гибкости их использования. В процессе разработки программы решено реализовать возможность комбинирования методов аугментации для большей вариативности аугментированных данных. Для удобной работы с файловой системой использована системная библиотека os. Для реализации пользовательского интерфейса использованы библиотеки tkinter и ttkbootstrap, а для построения графиков и работы с числовыми данными, соответственно, библиотеки pyplot и numpy.

Разработанная программа включает в себя следующий функционал:

- загрузка txt файлов;
- выбор директории для выгрузки файлов;
- выбор методов аугментации данных;
- визуализация пупиллограмм;
- аугментация данных;
- верификация сгенерированных данных;
- выгрузка сгенерированных данных в форматах txt и png.

Для простоты использования программы аугментации данных пупиллографии в пользовательский интерфейс включено минимальное количество элементов и использован элемент checkbox для формирования списка методов аугментации.

Пользовательский интерфейс программы представлен на рисунке 3.

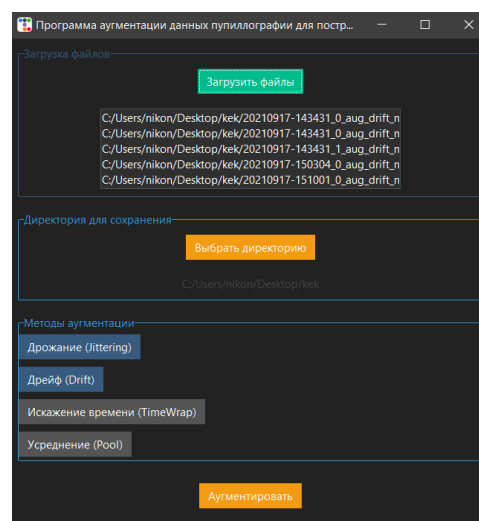


Рис. 3 – Пользовательский интерфейс программы

Fig. 3 – User interface of the program

На рисунке видны загруженные в программу пути к текстовым файлам, выбрана директория для сохранения новых данных и определены методы аугментации, а именно дрожание и дрейф. Результатом работы программы являются новые текстовые файлы и цифровые изображения пупиллограмм.

На рисунке 4 представлен пример сгенерированной пупиллограммы.

Применение методов аугментации привело к модификации временного ряда при сохранении особенностей пупиллограммы. Визуальный анализ показал, что сгенерированные данные сохраняют значимые закономерности исходных пупиллограмм.

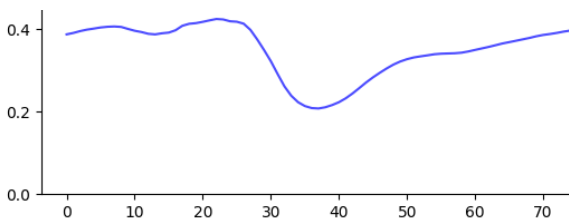


Рис. 4 – Сгенерированная пупиллограмма

Fig. 4 – Generated pupillogram

Благодаря использованию разработанной программы проведено расширение набора пупиллографических данных с 384 изображений до 831. Такое количество сгенерированных изображений достигнуто путем аугментации пупиллограмм с применением как отдельных методов, так и их различных комбинаций. Таким образом, используя одну пупиллограмму, становится возможным сгенерировать до 14 разных реалистичных пупиллограмм.

Оценка эффективности методов аугментации пупиллограмм

Для оценки эффективности методов аугментации и качества полученного набора данных проведен ряд экспериментов. Обучены две сверточные сети на основе предобученной модели ResNet с одинаковыми значениями гиперпараметров. Первая сеть обучена на исходном наборе данных, а вторая – на аугментированном. Рассчитаны значения метрик Accuracy, Precision, Recall и F1-мера.

Результаты нейросетевого моделирования представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение моделей, обученных на исходном и аугментированном наборах данных

Table 1 – Comparison of models trained on original and augmented datasets

Метрики \ Модели	Accuracy	Precision	Recall	F1-мера
МИД	73,2%	65,7%	58,1%	68,3%
МАД	82,7%	79,3%	78,3%	81,1%

В таблице использованы следующие обозначения: МИД (модель, обученная на исходных данных) и МАД (модель, обученная на аугментированных данных). После расширения набора данных с 384 до 831 изображений модель продемонстрировала улучшение значений всех метрик. Наибольший прирост наблюдается для Recall (+20%), что свидетельствует о лучшем распознавании случаев утомления. Рост F1-меры с 68,3% до 81,1% подтверждает, что аугментация данных повысила как точность классификации, так и ее полноту.

Заключение

Результаты исследования с использованием разработанной программы показали эффективность применения аугментации данных пупиллографии для построения сверточных моделей. Полученные результаты могут быть использованы в качестве

основы для дальнейших исследований в области определения функционального состояния утомления человека. Применение обученных моделей в составе интеллектуальных систем позволит эффективно решать поставленные задачи в различных областях.

Литература

- Н.Л. Захарова, *Социально-гуманитарные технологии*, 1 (13), 55-60 (2020).
- Ю.Г. Солонин, *Вестник Сыктывкарского университета. Серия 2: Биология. Геология. Химия. Экология*, 3 (23), 17-30 (2022).
- М.Г. Нуриев, Р.М. Гизатуллин, А.А. Мухаммадиев, *Журнал радиоэлектроники*, 4, 10-27 (2019).
- А.О. Булыгин, *Системы анализа и обработки данных*, 3 (95), 7-24 (2024).
- Н.Н. Бушуева, С.Б. Слободяник, *Офтальмология. Восточная Европа*, 8, 3, 431-438 (2018).
- У.С. Пляскина, М.А. Фролов, А.М. Фролов, *Офтальмология*, 19, 1, 173-178 (2022).
- А.А. Сибгатуллин, А.С. Катасёв, *Вестник Технологического университета*, 25, 12, 139-143 (2022).
- Д.В. Катасёва, А.О. Баринава, *Вестник Технологического университета*, 25, 2, 67-70 (2022).
- И.В. Бадыхов, И.Ю. Мышкина, Л.Ю. Грудцына, *Научно-технический вестник Поволжья*, 5, 12-14 (2019).
- А.И. Баринов, Д.В. Катасёва, А.С. Катасёв, *Вестник Технологического университета*, 23, 10, 64-67 (2020).
- О.А. Пырнова, Р.С. Зарипова, *Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах*, 3 (21), 46-49 (2020).
- А.З. Асанов, И.Ю. Мышкина, *Проблемы управления*, 1, 31-39 (2017).
- С.В. Новикова, Ю.А. Тунакова, *Безопасность жизнедеятельности*, 1 (121), 21-28 (2011).
- Н.Р. Кашапов, А.С. Катасёв, Д.В. Катасёва, *Информация и безопасность*, 19, 4, 555-558 (2016).
- Д.В. Катасёва, А.С. Катасёв, *Информация и безопасность*, 19, 4, 551-554 (2016).
- О.А. Пырнова, М.Г. Кузнецов, Д.П. Никоноров, *Научно-технический вестник Поволжья*, 12, 369-372 (2023).
- А.С. Катасёв, Д.В. Катасёва, Ю.Н. Смирнов, Л.Н. Кунафина, *Вестник Технологического университета*, 27, 10, 101-105 (2024).
- А.С. Катасёв, Б. Курбанов, *Вестник Технологического университета*, 26, 3, 67-71 (2023).
- М.П. Бороненко, Е.С. Киселева, *НаукаПарк*, 1 (69), 57-62 (2019).
- О.Л. Исаева, М.П. Бороненко, *Современные наукоемкие технологии*, 3, 54-58 (2020).
- М.В. Дагаева, Д.В. Катасёва, А.С. Катасёв, *Информация и безопасность*, 21, 4, 540-545 (2018).
- А.Р. Абдулхаков, А.С. Катасёв, *Фундаментальные исследования*, 5-3, 471-475 (2015).
- А.А. Ковальская, С.А. Коскин, *Современная оптометрия*, 5 (105), 30-37 (2017).
- M. Nystrom, D. Niehorster, R. Andersson, I. Hooge, *Behavior Research Methods*, 53, 1, 335-353 (2021).
- W. Yao, S.P. Atwood, *Information Display*, 37, 2, 43-48 (2021).
- Д.А. Добролюбова, *Автоматизация в промышленности*, 1, 62-64 (2019).
- Е.Г. Погодина, К.В. Мальгин, *Практическая медицина*, 3 (104), 91-94 (2017).
- И.А. Лукошков, А.А. Артемова, *Научное обозрение. Технические науки*, 3, 19-23 (2020).
- А.С. Басанько, Ю.С. Белов, *Программные продукты, системы и алгоритмы*, 4, 10-12 (2018).

30. С.А. Ляшева, О.Г. Морозов, М.П. Шлеймович, *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*, 3 (51), 9-22 (2020).
31. Д.Г. Петросянц, *Вестник Технологического университета*, 26, 9, 89-94 (2023).
32. Д.Г. Петросянц, А.С. Катасёв, Л.Ю. Емалетдинова, *Научно-технический вестник Поволжья*, 6, 85-87 (2023).
33. Д.Г. Петросянц, А.М. Ахметвалеев, А.С. Катасёв, *Компьютерные исследования и моделирование*, 13, 2, 417-427 (2021).
34. А.М. Ахметвалеев, А.С. Катасёв, М.П. Шлеймович, *Вестник ИЦБЖД*, 1 (23), 13-21 (2015).
35. А.М. Ахметвалеев, А.С. Катасёв, М.П. Шлеймович, *Информация и безопасность*, 19, 4, 519-522 (2016).
36. М.В. Дагаева, Д.В. Катасёва, А.С. Катасёв, *Информация и безопасность*, 21, 3, 366-371 (2018).
37. А.В. Ерпалов, В.В. Синицин, О.Л. Ибряева, *Автоматизация в промышленности*, 5, 7-12 (2024).
38. Т.А. Васяева, Т.В. Мартыненко, Н.С. Суббота, *Информатика и кибернетика*, 2 (16), 41-50 (2019).
15. D.V. Kataseva, A.S. Katasev, *Information and Security*, 19, 4, 551-554 (2016).
16. O.A. Purnova, M.G. Kuznetsov, D.P. Nikonorov, *Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*, 12, 369-372 (2023).
17. A.S. Katasev, D.V. Kataseva, Yu.N. Smirnov, L.N. Kunafina, *Herald of Technological University*, 27, 10, 101-105 (2024).
18. A.S. Katasev, B. Kurbanov, *Herald of Technological University*, 26, 3, 67-71 (2023).
19. M.P. Boronenko, E.S. Kiseleva, *SciencePark*, 1 (69), 57-62 (2019).
20. O.L. Isaeva, M.P. Boronenko, *Modern science-intensive technologies*, 3, 54-58 (2020).
21. M.V. Dagaeva, D.V. Kataseva, A.S. Katasev, *Information and Security*, 21, 4, 540-545 (2018).
22. A.R. Abdulkhakov, A.S. Katasev, *Fundamental Research*, 5-3, 471-475 (2015).
23. A.A. Kovalskaya, S.A. Koskin, *Modern optometry*, 5 (105), 30-37 (2017).
24. M. Nystrom, D. Niehorster, R. Andersson, I. Hooge, *Behavior Research Methods*, 53, 1, 335-353 (2021).
25. W. Yao, S.P. Atwood, *Information Display*, 37, 2, 43-48 (2021).
26. D.A. Dobrolyubova, *Automation in industry*, 1, 62-64 (2019).
27. E.G. Pogodina, K.V. Malgin, *Practical Medicine*, 3 (104), 91-94 (2017).
28. I.A. Lukoshkov, A.A. Artemova, *Scientific Review. Technical Sciences*, 3, 19-23 (2020).
29. A.S. Basanko, Yu.S. Belov, *Software products, systems and algorithms*, 4, 10-12 (2018).
30. S.A. Lyasheva, O.G. Morozov, M.P. Shleimovich, *Caspian Journal: Management and High Technologies*, 3 (51), 9-22 (2020).
31. D.G. Petrosyants, *Herald of Technological University*, 26, 9, 89-94 (2023).
32. D.G. Petrosyants, A.S. Katasev, L.Yu. Emaletdinova, *Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*, 6, 85-87 (2023).
33. D.G. Petrosyants, A.M. Akhmetvaleev, A.S. Katasev, *Computer Research and Modeling*, 13, 2, 417-427 (2021).
34. A.M. Akhmetvaleev, A.S. Katasev, M.P. Shleimovich, *Bulletin of the National Center for Railways*, 1 (23), 13-21 (2015).
35. A.M. Akhmetvaleev, A.S. Katasev, M.P. Shleimovich, *Information and Security*, 19, 4, 519-522 (2016).
36. M.V. Dagaeva, D.V. Kataseva, A.S. Katasev, *Information and Security*, 21, 3, 366-371 (2018).
37. A.V. Erpalov, V.V. Sinitsyn, O.L. Ibrayeva, *Automation in Industry*, 5, 7-12 (2024).
38. T.A. Vasyaeva, T.V. Martynenko, N.S. Subbota, *Informatics and Cybernetics*, 2 (16), 41-50 (2019).

References

1. N.L. Zakharova, *Social and humanitarian technologies*, 1 (13), 55-60 (2020).
2. Yu.G. Solonin, *Bulletin of Syktyvkar University. Episode 2: Biology. Geology. Chemistry. Ecology*, 3 (23), 17-30 (2022).
3. M.G. Nuriev, R.M. Gizatullin, A.A. Muhammadiev, *Journal of Radio Electronics*, 4, 10-27 (2019).
4. A.O. Bulygin, *Systems of data analysis and processing*, 3 (95), 7-24 (2024).
5. N. N. Bushueva, S. B. Slobodjanik, *Ophthalmology. Eastern Europe*, 8, 3, 431-438 (2018).
6. U.S. Plyaskina, M.A. Frolov, A.M. Frolov, *Ophthalmology*, 19, 1, 173-178 (2022).
7. A.A. Sibgatullin, A.S. Katasev, *Herald of Technological University*, 25, 12, 139-143 (2022).
8. D.V. Kataseva, A.O. Barinova, *Herald of Technological University*, 25, 2, 67-70 (2022).
9. I.V. Badykov, I.Yu. Myshkina, L.Yu. Grudtsyna, *Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*, 5, 12-14 (2019).
10. A.I. Barinov, D.V. Kataseva, A.S. Katasev, *Herald of Technological University*, 23, 10, 64-67 (2020).
11. O.A. Purnova, R.S. Zaripova, *Information technologies in construction, social and economic systems*, 3 (21), 46-49 (2020).
12. A.Z. Asanov, I.Yu. Myshkina, *Problems of Management*, 1, 31-39 (2017).
13. S.V. Novikova, Yu.A. Tunakova, *Life Safety*, 1 (121), 21-28 (2011).
14. N.R. Kashapov, A.S. Katasev, D.V. Kataseva, *Information and Security*, 19, 4, 555-558 (2016).

© **Д. П. Никоноров** – аспирант кафедры Систем информационной безопасности (СИБ), Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева (КНИТУ им. А.Н. Туполева), Казань, Россия, nikonorov_work@mail.ru; **А. С. Катасёв** – д-р техн. наук, профессор кафедры СИБ, КНИТУ им. А.Н. Туполева, ASKatasev@kai.ru.

© **D. P. Nikonorov** – PhD-Student of Information Security Systems (ISS) Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev (KNRTU named after A.N. Tupolev), Kazan, Russia, nikonorov_work@mail.ru; **A. S. Katasev** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor of the ISS department, KNRTU named after A.N. Tupolev, ASKatasev@kai.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 30.03.25.

Дата принятия рукописи в печать – 05.04.25.