

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.94

DOI 10.55421/3034-4689_2026_29_4_113

А. С. Катасёв, А. Р. Ильин

КЛАССИФИКАЦИЯ ФИТНЕС-УПРАЖНЕНИЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ XGBOOST

Ключевые слова: классификация фитнес-упражнений, машинное обучение, модель XGBoost, анализ временных рядов, моделирование, метрики качества классификации.

Статья посвящена построению и исследованию модели машинного обучения XGBoost для классификации фитнес-упражнений. Отмечается, что оценка корректности выполнения фитнес-упражнений человеком является одной из актуальных тем в области машинного обучения и искусственного интеллекта. Использование алгоритмов машинного обучения для решения этой задачи позволяет выявлять ошибки в технике движений, оценивать эффективность тренировок и предоставлять персонализированные рекомендации по коррекции физической активности и улучшению биомеханики движений человека в процессе реабилитации пациентов. Для решения поставленной задачи, обучения и тестирования модели выбран набор данных «Physical Therapy Exercises Dataset» из репозитория UCI Machine Learning Repository. Набор состоит из 1 378 015 записей, собранных в ходе тренировочных сессий в тренажерном зале с участием пяти испытуемых, выполнявших восемь типов физиотерапевтических упражнений с использованием инерциальных измерительных блоков и магнитных датчиков. Каждый из восьми классов упражнений представлен 55 файлами (12,5% датасета), что обеспечивает сбалансированность выборки и исключает смещение модели. Все данные случайным образом разделены на обучающую (80%) и тестовую выборку (20%). Для построения модели XGBoost использовалась интегрированная среда разработки PyCharm, а также средство для работы с блокнотами Notepad++. В качестве оптимизации производительности применялся прореживание данных, что позволило значительно сократить время построения и оценки модели. Предусмотрена возможность выбора пользователем коэффициента децимации в диапазоне от 1 до 10. При максимальном прореживании ($sample_rate=10$) частота дискретизации снижается с 25 Гц до 2.5 Гц. Данная оптимизация обеспечивает десятикратное ускорение загрузки (с 3-5 минут до 20-30 секунд) при сохранении точности классификации на уровне 90-92%. Дополнительно реализован батчинг данных, предполагающий пакетную обработку по 10 000 записей за итерацию для снижения нагрузки на оперативную память. Кроме того, проведено сравнение точности построенной модели с точностью других методов классификации. Для интерактивного представления результатов исследования было выбрано streamlit-приложение. Среди всех построенных моделей XGBoost показала самые высокие результаты по точности, что указывает на ее эффективность. Таким образом, модель можно эффективно использовать в качестве инструмента для оценки правильности выполнения фитнес-упражнений, например, на базе мобильного или веб-приложения.

А. S. Katasev, A. R. Ilyin

FITNESS EXERCISE CLASSIFICATION BASED ON THE XGBOOST MACHINE LEARNING MODEL

Keywords: fitness exercise classification, machine learning, XGBoost model, time series analysis, modeling, classification quality metrics.

This article explores the construction and evaluation of the XGBoost machine learning model for classifying fitness exercises. Assessing the accuracy of human fitness exercise performance is a hot topic in machine learning and artificial intelligence. Machine learning algorithms used to address this issue can identify errors in movement technique, evaluate training effectiveness, and provide personalized recommendations for correcting physical activity and improving the biomechanics of human movement during patient rehabilitation. To address this issue, train, and test the model, the "Physical Therapy Exercises Dataset" from the UCI Machine Learning Repository was selected. The dataset consists of 1,378,015 records collected during gym training sessions involving five subjects performing eight types of physical therapy exercises using inertial measurement units and magnetic sensors. Each of the eight exercise classes is represented by 55 files (12.5% of the dataset), ensuring a balanced sample and eliminating model bias. All data were randomly divided into a training (80%) and a test (20%) set. The XGBoost model was built using the PyCharm integrated development environment and Notepad++. Data decimation was used to optimize performance, significantly reducing the time it took to build and evaluate the model. The user can select a decimation coefficient from 1 to 10. With maximum decimation ($sample_rate=10$), the sampling frequency is reduced from 25 Hz to 2.5 Hz. This optimization provides a tenfold acceleration in loading (from 3-5 minutes to 20-30 seconds) while maintaining classification accuracy at 90-92%. Data batching was also implemented, involving batch processing of 10,000 records per iteration to reduce the load on RAM. The accuracy of the constructed model was also compared with that of other classification methods. A streamlit application was selected for the interactive presentation of the study results. Among all the models built, XGBoost demonstrated the highest accuracy results, indicating its effectiveness. Therefore, the model can be effectively used as a tool for assessing the correctness of fitness exercises, for example, using a mobile or web app.

Введение

В настоящее время методы искусственного интеллекта широко применяются в различных предметных областях, таких как спорт [1], медицина [2, 3], промышленное производство [4, 5]. В частности, в спорте алгоритмы машинного обучения предоставляют возможность анализа многомерных данных с инерциальных датчиков, выявления характерных паттернов движений спортсменов и классификации выполняемых упражнений с высокой точностью в режиме, близком к реальному [6, 7].

Проблема распознавания и классификации физической активности исследуется в рамках таких научных направлений, как биомеханика [8], компьютерное зрение [9-11] и интеллектуальный анализ данных с сенсорных устройств [12-14]. За последнее десятилетие появилось значительное количество исследований, посвященных применению методов машинного обучения для классификации типов упражнений, оценки качества техники и персонализации тренировочных программ [15]. Однако, несмотря на обилие теоретических разработок, практическая реализация подобных систем в реальном тренировочном процессе затруднена из-за необходимости синхронизации мультимодальных данных, обеспечения устойчивости алгоритмов к индивидуальным особенностям телосложения и движения пользователей, а также потребности в адаптации моделей под специфику конкретного набора упражнений и используемого фитнес-оборудования.

В современных системах мониторинга здоровья и фитнеса, основанных на технологиях машинного обучения [16-18], точная и автоматизированная оценка физической активности является ключевой задачей. Эффективность реабилитации, спортивной подготовки и персональных тренировок в значительной степени зависит от объективного контроля за техникой выполнения упражнений.

Фитнес-упражнение можно рассматривать как дискретный, структурированный многомерный временной сигнал, обладающий набором дискретных характеристик. Он может быть однозначно представлен в виде цифрового паттерна (временного ряда) в пространстве данных, регистрируемых инерциальными или биометрическими сенсорами, и классифицирован алгоритмами машинного обучения по набору формальных признаков [15].

Современное развитие искусственного интеллекта характеризуется возрастающим интересом к методам машинного обучения для обработки данных и классификации временных рядов [19-22]. Ключевым назначением специальных автоматизированных систем является мониторинг, предупреждение и контроль техники выполнения физических упражнений.

Двигательные паттерны представляют собой совокупность согласованных движений отдельных частей тела, выполняемых последовательно и ритмично. Эти паттерны определяются несколькими ключевыми параметрами [23]:

- амплитудой (диапазоном движения сустава или степенью растяжения мышц);

- скоростью (быстротой выполнения заданного упражнения);

- формой траектории (направлением и характером движения части тела относительно оси его симметрии);

- силой сокращения (темпом выполнения упражнения);

- оценкой позы человека (позицией туловища и конечностей относительно друг друга);

- расходом энергии (объемом затраченных калорий, которые расходуются организмом при физической нагрузке).

Таким образом, автоматизированный анализ фитнес-упражнений требует комплексного подхода, включающего наличие качественных данных, выбор алгоритмов их обработки и обучение моделей машинного обучения для точной идентификации и оценки качества выполнения движений.

Выбор и описание набора данных для построения модели

В работе для проведения исследований использован набор данных «Physical Therapy Exercises Dataset» [24] из репозитория UCI Machine Learning Repository. Выбранный набор специально разработан для задач классификации упражнений физиотерапии и содержит данные, собранные с носимых инерциальных и магнитных датчиков [24]. Датчики расположены на правом и левом предплечье, на левом и правом бедре, а также на грудной клетке.

Для каждого датчика регистрируются следующие параметры:

- accel_x, accel_y, accel_z – компоненты ускорения по трем осям;

- gyro_x, gyro_y, gyro_z – компоненты угловой скорости по трем осям;

- mag_x, mag_y, mag_z – компоненты магнитного поля по трем осям.

Дополнительные вычисляемые параметры:

- accel_magnitude – модуль вектора ускорения: $\sqrt{(\text{accel}_x^2 + \text{accel}_y^2 + \text{accel}_z^2)}$;

- gyro_magnitude – модуль вектора угловой скорости: $\sqrt{(\text{gyro}_x^2 + \text{gyro}_y^2 + \text{gyro}_z^2)}$.

Целевая переменная «упражнение» является категориальной с восемью возможными значениями, характеризующими тип выполняемого упражнения:

- e1: сгибание рук;

- e2: боковое поднятие рук;

- e3: поднятие рук вперед;

- e4: сгибание колена;

- e5: разгибание колена;

- e6: отведение бедра;

- e7: разгибание бедра;

- e8: приседания.

Набор данных предназначен для разработки и тестирования алгоритмов машинного обучения [25-27] в задачах распознавания физической активности людей, классификации выполняемых упражнений и мониторинга фитнес-тренировок.

Для оценки сбалансированности данных произведен анализ их распределения [28]. Результат анализа представлен на рисунке 1.

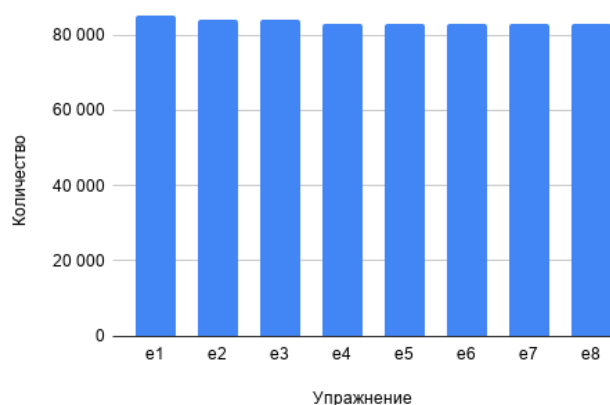


Рис. 1 – Распределение классов в наборе данных

Fig. 1 – Distribution of classes in the dataset

Видно, что набор данных является сбалансированным, что предотвращает смещение модели в сторону мажоритарных классов.

Для формирования обучающей и тестовой выборки применялись функции библиотеки *sklearn* на *Python*. Соотношение было выбрано 80% к 20% [29, 30]. Формирование выборок обеспечило возможность перехода к построению модели.

Предобработка данных, построение и исследование модели XGBoost

Для оптимизации вычислений при работе с массивом данных объемом 45.7 МБ (440 файлов) применен алгоритм прореживания [31-33]. Пользователю доступен выбор коэффициента прореживания от 1 до 10. При максимальном значении (*sample_rate=10*) частота дискретизации снижается с 25 Гц до 2.5 Гц, что является достаточным для анализа медленных физиотерапевтических движений. Данная оптимизация сокращает время загрузки данных в 10 раз (с 3-5 минут до 20-30 секунд) при сохранении точности классификации на уровне 90-92%.

На основе подготовленных данных построена модель машинного обучения XGBoost [34, 35]. Для ее построения использована среда разработки Pycharm, а также средство для работы с блокнотами Notepad++. При построении модели использованы гиперпараметры, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Значения гиперпараметров XGBoost

Table 1 – XGBoost hyperparameters values

Наименование гиперпараметра	Значение	Критерий выбора значения
<i>n_estimators</i>	100	Управление изменчивостью модели
<i>max_depth</i>	10	Ограничение глубины деревьев
<i>eval_metric</i>	Mlogloss	Оценка эффективности решения
<i>random_state</i>	42	Воспроизведение эксперимента
<i>n_jobs</i>	-1	Ускорение обработки

На рисунке 2 представлена матрица ошибок для построенной модели на тестовой выборке данных.

e1	142	1	1	0	0	0	0	140
e2	4	133	1	0	0	1	1	120
e3	0	0	138	0	1	0	0	100
e4	0	0	0	134	2	0	0	80
e5	0	0	0	3	131	0	0	60
e6	0	2	0	0	1	132	1	40
e7	0	1	3	0	0	3	128	20
e8	0	1	1	1	1	0	0	131
	e1	e2	e3	e4	e5	e6	e7	e8

Рис. 2 – Матрица ошибок для модели XGBoost на тестовой выборке данных

Fig. 2 – Error matrix for the XGBoost model on the test data

Диагональные элементы матрицы соответствуют верным классификациям и составляют ее доминирующую часть. Остальные элементы отражают ошибки модели: наибольшее их число приходится на упражнение e4 (сгибание колена) и e5 (разгибание колена), что объясняется схожестью движений. Общее количество ошибок – 28 из 1 097 (2,55%).

Для оценки эффективности модели на основе матрицы ошибок рассчитаны метрики качества классификации Accuracy, Precision, Recall, F1-Score и CV mean [36, 37], представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Значения метрик качества классификации для построенной модели

Table 2 – Classification quality metrics values for the built model

Наименование метрики	Значение
<i>Accuracy</i>	97,09%
<i>Precision</i>	97,11%
<i>Recall</i>	97,09%
<i>F1-Score</i>	97,09%
<i>CV mean</i>	95,98%

Как видно из таблицы, построенная модель демонстрирует высокие результаты, что позволяет рекомендовать ее для практического применения в системе классификации упражнений.

На завершающем этапе выполненного исследования произведено сравнение точности построенной модели XGBoost с точностью других моделей машинного обучения Random Forest, Decision Tree, KNN, SVM и Logistic Regression [38-40] по метрикам Accuracy и F1-Score. Результаты сравнительной оценки представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнение моделей

Table 3 – Models comparison

Модель	Accuracy	F1-Score
<i>XGBoost</i>	0,9709	0,9709
<i>Random Forest</i>	0,9664	0,9663
<i>Decision Tree</i>	0,8937	0,8939
<i>KNN</i>	0,8474	0,8460
<i>SVM</i>	0,8265	0,8242
<i>Logistic Regression</i>	0,6540	0,6542

Видно, что модель XGBoost демонстрирует наилучшие результаты среди других моделей, превосходя их как по значению метрики Accuracy, так и по значению F1-Score.

Заключение

В ходе выполнения исследования получены следующие результаты:

- проведен анализ предметной области классификации физической активности;
- найдены и подготовлены исходные данные для анализа и построения интеллектуальной системы;
- оптимизирован процесс предобработки данных, что в результате позволило ускорить построение модели XGBoost в 10 раз при точности классификации не менее 97%;
- проведена оценка эффективности и сравнение построенной модели с другими моделями.

Таким образом, построенную модель машинного обучения XGBoost можно использовать в качестве эффективного инструмента для оценки качества выполнения фитнес-упражнений, например, на в составе мобильного или веб-приложения.

Литература

1. А.А. Василюк, *Инновации. Наука. Образование*, 32, 1487-1492 (2021).
2. М.А. Подольская, А.С. Катасёв, *Казанский медицинский журнал*, 88, 4, 346-351 (2007).
3. А.С. Катасёв, М.А. Подольская, *Неврологический вестник*, 38, 3-4, 85-90 (2006).
4. А.У. Nikitaeva, А.В.М. Salem, *Journal of Institutional Studies*, 14, 1, 108-126 (2022).
5. В.Ф. Карпович, *Инновационная наука*, 1, 2-2, 117-121 (2026).
6. В.В. Носкин, А.Р. Донская, Д.Р. Черкашин, С.Г. Грошев, *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*, 13, 4 (51) (2025).
7. В.И. Янковский, Н.Д. Тодосиев, С.А. Щукин, Ю.Е. Гапанюк, *Динамика сложных систем - XXI век*, 14, 3, 35-43 (2020).
8. Г.П. Иванова, *Труды кафедры биомеханики университета им. П.Ф. Лесгафта*, 17, 6-10 (2023).
9. Р.Н. Минниханов, Т.Р. Баторшин, Р.М. Габбазов, Р.И. Фахразиев, А.С. Катасёв, М.В. Дагаева, И.Р. Бадрутдинов, *Электронные библиотеки*, 28, 4, 884-902 (2025).
10. О.А. Пырнова, Р.С. Зарипова, *Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах*, 1 (15), 82-84 (2019).
11. I.A. Medvedeva, M.V. Vanslav, M.A. Ragozina, *Natural and Technical Sciences*, 7 (170), 177-178 (2022).
12. М.В. Дагаева, Д.В. Катасёва, А.С. Катасёв, *Информация и безопасность*, 21, 4, 540-545 (2018).
13. А.С. Катасёв, Ч.Ф. Ахатова, *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 12, 34-42 (2012).
14. М.Г. Нуриев, Р.М. Гизатуллин, В.А. Дроздилов, Э.И. Павлова, *Журнал радиоэлектроники*, 6, 14-29 (2019).
15. А.Д. Обухов, *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 25, 5, 833-843 (2025).
16. Д.А. Набиуллин, В.В. Кононова, С.В. Новикова, *Вестник Технологического университета*, 24, 6, 103-107 (2021).
17. К.А. Матвеева, Р.Н. Минниханов, А.С. Катасёв, *Вестник Технологического университета*, 27, 1, 76-80 (2024).

18. Д.В. Катасёва, А.И. Баринов, *Вестник Технологического университета*, 25, 1, 69-72 (2022).
19. О.А. Пырнова, Д.П. Никоноров, *Экономика и управление: проблемы, решения*, 12, 2 (155), 118-123 (2025).
20. Р.И. Юсупова, Р.С. Зарипова, М.Г. Нуриев, *Казанская наука*, 2, 201-203 (2025).
21. Л.Ю. Емалетдинова, Н.Р. Вильданов, А.С. Катасёв, *Научно-технический вестник Поволжья*, 6, 62-64 (2023).
22. Е.В. Бурнаев, *Информационные процессы*, 20, 2, 161-170 (2020).
23. Р.Г. Асадуллаев, А.Н. Афонин, Е.С. Щетинина, *Экономика. Информатика*, 48, 4, 735-746 (2021).
24. <https://archive.ics.uci.edu/>: сайт. – URL: <https://archive.ics.uci.edu/dataset/730/physical+therapy+exercises+dataset> (дата обращения: 24.03.2026).
25. Д.В. Катасёва, Д.Д. Лосева, *Вестник Технологического университета*, 25, 1, 77-80 (2022).
26. D.T. Le, M.H. Dao, Q.L.T. Nguyen, *Information and Control Systems*, 3 (106), 59-70 (2020).
27. Р.Н. Минниханов, Т.Р. Баторшин, Р.М. Габбазов, Р.И. Фахразиев, А.С. Катасёв, *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии*, 3, 110-122 (2025).
28. В.В. Дьякова, *In Situ*, 6, 8-11 (2022).
29. А.С. Катасёв, Д.В. Катасёва, Ю.Н. Смирнов, В.Л. Васильев, *Вестник Технологического университета*, 27, 9, 115-119 (2024).
30. Т.А. Пузыня, *Инновации и инвестиции*, 5, 520-521 (2024).
31. И.В. Аникин, Р.Н. Минниханов, М.В. Дагаева, А.З. Махмутова, А.Р. Марданова, *Вестник НЦБЖД*, 4 (50), 24-34 (2021).
32. К.В. Беллонин, А.В. Шокуров, *Интеллектуальные системы. Теория и приложения*, 25, 4, 256-260 (2021).
33. И.В. Аникин, А.Р. Марданова, *Математические методы в технологиях и технике*, 1, 83-87 (2021).
34. C. Wang, C. Deng, S. Wang, *Pattern Recognition Letters*, 136, 190-197 (2020).
35. О.Н. Мадяр, Е.А. Попова, *Экономика: вчера, сегодня, завтра*, 14, 11-1, 226-239 (2024).
36. В.А. Буланов, О.Е. Фомичева, *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*, 3, 33-37 (2020).
37. Б. Курбанов, А.С. Катасёв, Д.В. Катасёва, Б.Р. Зиннуров, *Вестник Технологического университета*, 27, 12, 158-164 (2024).
38. A.N. Boruah, S.K. Biswas, S. Bandyopadhyay, *Evolving Systems*, 14, 1, 69-83 (2023).
39. О.А. Пырнова, А.С. Катасёв, *Инженерный вестник Дона*, 4 (112), 578-584 (2024).
40. Q. Qiu, *Applied and Computational Engineering*, 135, 1, 175-183 (2025).

References

1. A.A. Vasilyuk, *Innovations. Science. Education*, 32, 1487-1492 (2021).
2. M.A. Podolskaya, A.S. Katasev, *Kazan Medical Journal*, 88, 4, 346-351 (2007).
3. A.S. Katasev, M.A. Podolskaya, *Neurological Bulletin*, 38, 3-4, 85-90 (2006).
4. А.У. Nikitaeva, А.В.М. Salem, *Journal of Institutional Studies*, 14, 1, 108-126 (2022).
5. V.F. Karpovich, *Innovative science*, 1, 2-2, 117-121 (2026).
6. V.V. Noskin, A.R. Donskaya, D.R. Cherkashin, S.G. Groshev, *Modeling, Optimization and Information Technologies*, 13, 4 (51) (2025).
7. V.I. Yankovsky, N.D. Todosiev, S.A. Shchukin, Yu.E. Gapanuk, *Dynamics of Complex Systems - 21st Century*, 14, 3, 35-43 (2020).
8. G.P. Ivanova, *Proceedings of the Department of Biomechanics of the P.F. Lesgaft University*, 17, 6-10 (2023).

9. R.N. Minnikhanov, T.R. Batorshin, R.M. Gabbazov, R.I. Fakhrzиеv, A.S. Katasev, M.V. Dagaeva, I.R. Badrutdinov, *Electronic libraries*, **28**, 4, 884-902 (2025).
10. O.A. Pynova, R.S. Zaripova, *Information technologies in construction, social and economic systems*, 1 (15), 82-84 (2019).
11. I.A. Medvedeva, M.V. Vanslav, M.A. Ragozina, *Natural and Technical Sciences*, 7 (170), 177-178 (2022).
12. M.V. Dagaeva, D.V. Kataseva, A.S. Katasev, *Information and Security*, **21**, 4, 540-545 (2018).
13. A.S. Katasev, Ch.F. Akhatova, *Science and Education: Scientific Publication of the Bauman Moscow State Technical University*, 12, 34-42 (2012).
14. M.G. Nuriev, R.M. Gizatullin, V.A. Drozdikov, E.I. Pavlova, *Journal of Radio Electronics*, 6, 14-29 (2019).
15. A.D. Obukhov, *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*, **25**, 5, 833-843 (2025).
16. YES. Nabiullin, V.V. Kononova, S.V. Novikova, *Herald of Technological University*, **24**, 6, 103-107 (2021).
17. K.A. Matveeva, R.N. Minnikhanov, A.S. Katasev, *Herald of Technological University*, **27**, 1, 76-80 (2024).
18. D.V. Kataseva, A.I. Barinov, *Herald of Technological University*, **25**, 1, 69-72 (2022).
19. O.A. Pynova, D.P. Nikonov, *Economics and Management: Problems, Solutions*, **12**, 2 (155), 118-123 (2025).
20. R.I. Yusupova, R.S. Zaripova, M.G. Nuriev, *Kazan science*, 2, 201-203 (2025).
21. L.Yu. Emaletdinova, N.R. Vildanov, A.S. Katasev, *Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*, 6, 62-64 (2023).
22. E.V. Burnaev, *Information Processes*, **20**, 2, 161-170 (2020).
23. R.G. Asadullaev, A.N. Afonin, E.S. Shchetinina, *Economics. Informatics*, **48**, 4, 735-746 (2021).
24. <https://archive.ics.uci.edu/>: website. – URL: <https://archive.ics.uci.edu/dataset/730/physical+therapy+exercises+dataset> (date of access: 24.03.2026).
25. D.V. Kataseva, D.D. Loseva, *Herald of Technological University*, **25**, 1, 77-80 (2022).
26. D.T. Le, M.H. Dao, Q.L.T. Nguyen, *Information and Control Systems*, 3 (106), 59-70 (2020).
27. R.N. Minnikhanov, T.R. Batorshin, R.M. Gabbazov, R.I. Fakhrzиеv, A.S. Katasev, *Bulletin of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technology*, 3, 110-122 (2025).
28. V.V. Dyakova, *In Situ*, 6, 8-11 (2022).
29. A.S. Katasev, D.V. Kataseva, Yu.N. Smirnov, V.L. Vasiliyev, *Herald of Technological University*, **27**, 9, 115-119 (2024).
30. T.A. Puzynya, *Innovations and Investments*, 5, 520-521 (2024).
31. I.V. Anikin, R.N. Minnikhanov, M.V. Dagaeva, A.Z. Makhmutova, A.R. Mardanov, *Bulletin of the National Center for Railways*, 4 (50), 24-34 (2021).
32. K.V. Bellonin, A.V. Shokurov, *Intelligent Systems. Theory and Applications*, **25**, 4, 256-260 (2021).
33. I.V. Anikin, A.R. Mardanov, *Mathematical methods in technology and engineering*, 1, 83-87 (2021).
34. C. Wang, C. Deng, S. Wang, *Pattern Recognition Letters*, **136**, 190-197 (2020).
35. O. N. Madyar, E. A. Popova, *Economy: Yesterday, Today, Tomorrow*, **14**, 11-1, 226-239 (2024).
36. V.A. Bulanov, O.E. Fomicheva, *Devices and systems. Management, control, diagnostics*, 3, 33-37 (2020).
37. B. Kurbanov, A.S. Katasev, D.V. Kataseva, B.R. Zinnurov, *Herald of Technological University*, **27**, 12, 158-164 (2024).
38. A.N. Boruah, S.K. Biswas, S. Bandyopadhyay, *Evolving Systems*, **14**, 1, 69-83 (2023).
39. O.A. Pynova, A.S. Katasev, *Engineering Herald of the Don*, 4 (112), 578-584 (2024).
40. Q. Qiu, *Applied and Computational Engineering*, **135**, 1, 175-183 (2025).

© **А. С. Катасёв** – д-р техн. наук, профессор кафедры Систем информационной безопасности (СИБ), Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева (КНИТУ им. А.Н. Туполева), Казань, Россия, ASKatasev@kai.ru; **А. Р. Ильин** – магистрант кафедры СИБ, КНИТУ им. А.Н. Туполева, ilyin.alexander.of@bk.ru.

© **А. S. Katasev** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor of Information Security Systems (ISS) Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev (KNRTU named after A.N. Tupolev), Kazan, Russia, ASKatasev@kai.ru; **А. R. Ilyin** – Master-student of the ISS Department, KNRTU named after A.N. Tupolev, ilyin.alexander.of@bk.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 03.03.26.

Дата принятия рукописи в печать – 08.04.26.