

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ COMPUTER SIMULATION HISTORY

УДК: 004.31

DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-1-137-144

Построение геометрической модели изделия на основе мультимодальной обработки бумажной конструкторской документации

Басов О.О., Носков Д.А.

Акционерное общество «АСТ», пер. Капранова, 3, стр. 2, Москва, 123242, Россия
o.basov@acti.ru

Аннотация. В работе предложено решение задачи построения геометрической (3D) модели изделия на основе его чертежа, представленного в виде конструкторской документации на бумажном носителе. Для выделения проекций изделия (детали) использован ранее разработанный нейросетевой подход. В настоящем исследовании геометрическая модель детали формируется из облака точек, построенных в рамках масок проекций, генерируемых с использованием нейронной сети. Для определения масок использовалась модель YOLOv8, а достигаемая ею точность составила более 90 % по метрике mAP. Особенности примененного подхода к построению геометрической модели детали являются использование информации об элементах вращения (в частности, радиусов округлых частей детали), а также применение алгоритма корректировки центра вращения. Рассмотрен сквозной пример, демонстрирующий перспективность выбранного подхода к построению геометрических моделей на основе скалярных изображений чертежей деталей и изделий.

Ключевые слова: конструкторская документация, чертеж, изделие, цифровой двойник, аннотированная геометрическая модель

Для цитирования: Басов О.О., Носков Д.А. 2025. Построение геометрической модели изделия на основе мультимодальной обработки бумажной конструкторской документации. *Экономика. Информатика*, 52(1): 137–144. DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-1-137-144

Construction of a Geometric Model of a Product Based on Multimodal Processing of Paper Design Documentation

Oleg O. Basov, Dmitry A. Noskov

Joint Stock Company «AST», building 2, 3 Kapranov Ln, Moscow 123242, Russia
o.basov@acti.ru

Abstract. The paper proposes a solution to the problem of constructing a geometric (3D) model of a product based on its drawing, presented in the form of design documentation on paper. A previously developed neural network approach was used to highlight the projections of the product (part). In this study, the geometric model of the part is formed from a point cloud constructed within the projection masks generated using a neural network. The YOLOv8 model was used to determine the masks, and the accuracy it achieved was more than 90 % according to the mAP metric. The features of the applied approach to constructing the geometric model of the part include the use of information about the elements of rotation (in particular, the radii of the rounded parts of the part), as well as the application of an algorithm for adjusting the center of

© Басов О.О., Носков Д.А., 2025

rotation. An end-to-end example is considered, demonstrating the prospects of the chosen approach to constructing geometric models based on scalar images of drawings of parts and products. The authors suggest the following areas of further research that ensure increased accuracy of detailing of geometric models: (1) additional training of the model for constructing part masks with the addition of new classes; (2) accumulation and use of information on frequently used elements of drawings; (3) combination of an approach to geometric modeling of a part/product based on the application of generative neural networks to the obtained parameters of simple and complex primitives.

Keywords: design documentation, drawing, product, digital twin, annotated geometric model

For citation: Basov O.O., Noskov D.A. 2025. Construction of a Geometric Model of a Product Based on Multimodal Processing of Paper Design Documentation. *Economics. Information technologies*, 52(1): 137–144 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-1-137-144

Введение

В условиях интенсификации цифровизации промышленности особую актуальность приобретает процесс создания и развития цифровых моделей деталей и изделий. Требуется разработка цифровых двойников деталей и изделий для различных отраслей и областей применений.

Под цифровым двойником, как правило, понимают виртуальную модель, которая на различных уровнях описывает реально существующий объект (изделие, деталь и т. д.) и при тестировании (использовании) которой получается информация, которая получалась бы при физическом взаимодействии с реальным объектом [Анализ размера и доли рынка...].

Конструкторская документация, поступающая к технологу, может иметь различные недостатки и ошибки, и если они выявляются только на стадии производства, то это приводит к тому, что затраты на ее исправления возрастают на порядок. Переход от двухмерного проектирования к моделированию цифровых двойников открывает для любого производства уникальные возможности для совершенствования конструкторской и технологической подготовки производства, прежде всего заключающиеся в многократном улучшении точности обработки поверхностей и сокращении времени создания управляющих программ для инструментов производства (например, станков ЧПУ), а также позволяет повысить технологичность производства, выявляя неэффективную обработку или целые операции с помощью визуализации [Басов, Демин, Носков, 2024].

В качестве исходной информации для генерации траекторий движения инструментов используется геометрическая модель изделия, которая может быть синтезирована в CAD (CAM, CAE) системе или импортирована из других систем геометрического моделирования. Все это применимо, если производство работает в едином продукте CAD/CAM/CAE, который обеспечивает взаимодействие с различными форматами и расширениями файлов, а изделия «с нуля» проектируются в нём. Между тем предприятия различных отраслей имеют значительные объёмы бумажных архивов конструкторской документации на выпускаемую номенклатуру продукции. Простое сканирование чертежей изделий, элементов деталей и сборочных единиц не даёт «цифровым копиям» всех преимуществ цифровых двойников [Прохоров, Лысачев, 2020].

Несмотря на значительное число решений, обеспечивающих возможность преобразования отсканированных изображений чертежей в векторные изображения в ручном или полуавтоматическом режиме, вопрос автоматического (или хотя бы автоматизированного) построения геометрических (3D) моделей до сих пор остаётся открытым. До сих пор этот процесс осуществляется в ручном режиме собственными силами подразделений предприятия (с использованием высококвалифицированных инженеров-конструкторов) или специализированными компаниями (через аутсорсинг).

Однако и такие геометрические модели не являются цифровыми двойниками, даже типа DTI (Digital Twin Instance), поскольку не содержат аннотации, сведений о материалах

и компонентах изделия, информации о рабочих процессах, итогов тестов и пр. [Demchenko, Bagramshina, Gromov, 2020]

Обогащение цифровых двойников типа DTI указанными данными возможно на основе спецификаций изделий и их описаний, содержащихся в конструкторской документации на бумажном носителе [Макарова, Лагереv, 2022]. Такие данные в основном являются слабоструктурированными (исключение – спецификации), что значительно усложняет процесс построения цифровых моделей.

Очевидно, что в описанных условиях своевременной и злободневной является задача разработки платформы построения цифровых двойников на основе мультимодальной обработки бумажной конструкторской документации. Обработка изображений чертежей, полученных в различных спектральных диапазонах, и их итерационная структурированная параметризация (векторизация) обеспечат создание высокоточных геометрических моделей изделий, а совместная обработка полученных векторных представлений изделий и их описания, содержащегося в конструкторской документации, обогатят модели необходимыми данными для моделирования цифровых двойников. Разработка изделий и продукции на основе технологии цифрового двойника в сравнении с традиционными подходами позволяет обеспечивать снижение временных, финансовых затрат в разы, в некоторых случаях – в 10 и более раз ¹.

Разработка платформы построения цифровых двойников на основе мультимодальной обработки бумажной конструкторской документации

Для построения цифровых двойников DTI по конструкторской документации, представленной на бумажном носителе, предполагается итерационная обработка отсканированных изображений конструкторской документации, включающая следующие шаги:

1) предобработка, включающая в себя улучшение качества изображения, ухудшение которого вызвано как старением бумажного носителя (ветхость, потертости, изменение цветности резкости/четкости, читаемости надписей, пограничные переходы в местах сгиба чертежей и др.) в процессе хранения и использования конструкторской документации, так и артефактами, возникшими при сканировании (засветка/затемнение отдельных областей, наличие полос и т. д.);

2) определение вида документа конструкторской документации (графический или текстовый);

3) детектирование элементов на графическом документе (рамка, основная надпись, спецификация, основные элементы чертежа детали/изделия) и определение его вида (чертеж детали, сборочный чертёж, габаритный чертеж и т. д.);

4) поиск и распознавание текста на чертежах, разделение его на размерные числа и надписи;

5) поиск размерных и выносных линий;

6) векторизация размерных чисел, размерных и выносных линий;

7) параметризация надписей;

8) итерационный поиск и параметризация простых (линии, кривые, окружности) и сложных (часто используемые элементы чертежей отверстия, фаски, зубья, шлицы, шестерни и т. д.) примитивов, описывающих чертеж детали/изделия;

9) геометрическое моделирование детали/изделия на основе двух подходов к геометрическому моделированию: граничного-кусочно-аналитического описания объекта на основе параметров простых примитивов [Климентьев, Свирский, 2006] и конструктивной геометрии, осуществляющего построение модели с помощью регуляризованных булевых операций на базе сложных примитивов;

10) распознавание (OCR) текстовых документов конструкторской документации;

¹ https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2019/12_december/28/cifrovoy_dvoinik.pdf

11) сопоставление надписей на чертежах и информации текстовых документов, аннотирование геометрической модели;

12) обработка текстовой документации и обогащение цифрового двойника DTI.

Указанная последовательность шагов обеспечивает полную автоматизацию всего процесса создания цифрового двойника, что не обеспечивается имеющимися решениями даже при их последовательном применении.

Реализация шагов 2–8 описана в предыдущей работе авторов [Басов, Демин, Носков, 2024], ниже рассмотрен подход к построению геометрической модели детали на основе сквозного примера (рис. 1).

Геометрическое моделирование детали

Процесс геометрического моделирования детали на основе её проекций (рис. 1), полученных в результате работы модели детектирования элементов на графическом документе, представлен на рисунке 2.

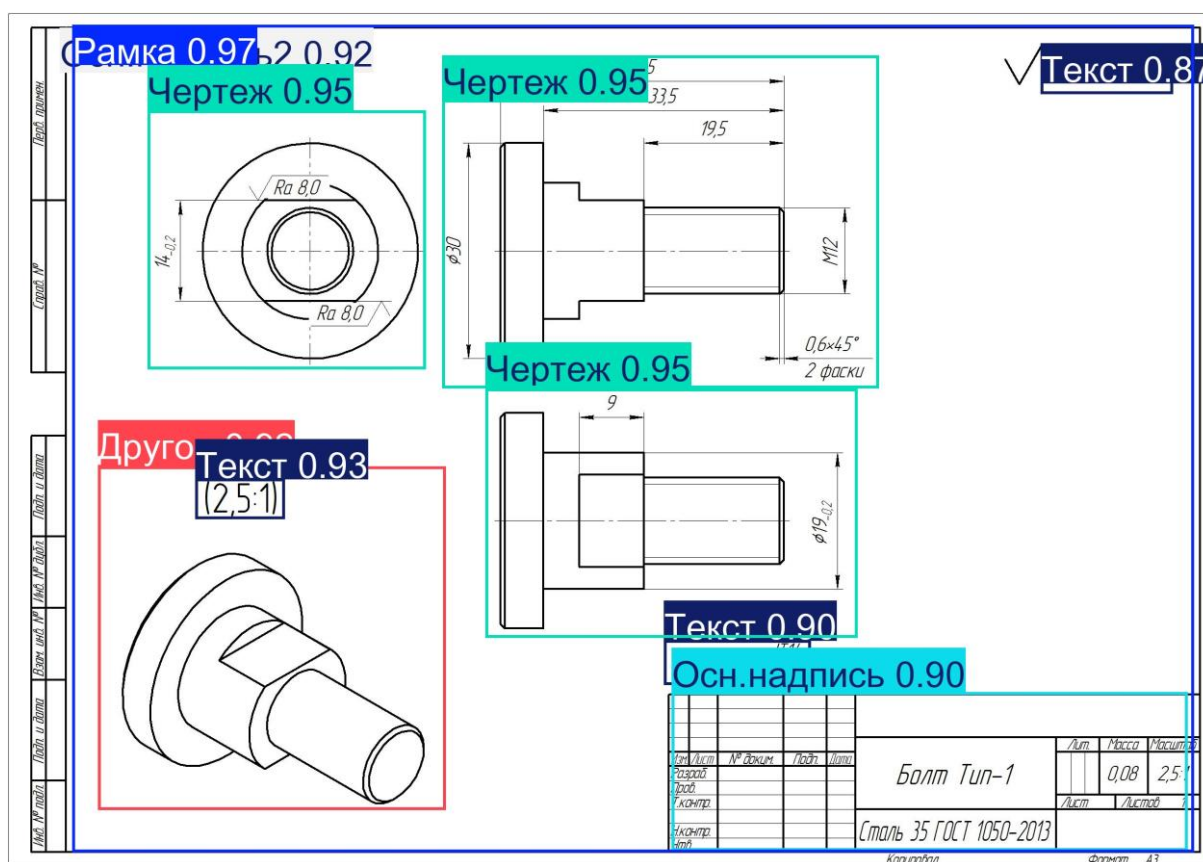


Рис. 1. Исходное, разделенное на элементы изображение чертежей детали

Fig. 1. Part drawing: original image divided into elements

Выделенный фрагмент отличается тем, что на каждой части чертежа сама деталь выделена более жирными линиями, а размерные – более тонкие. По границам детали выделяется маска, которая дает возможность убирать ненужные для построения 3D модели детали, такие как размерные линии, надписи и другие части чертежей.

Определение масок производилось моделью YOLOv8 с задачей сегментации изображения. Модель отличается более высокой восприимчивостью на малых датасетах на несложных задачах с малым количеством классов, чем не могут похвастаться другие модели для сегментации, которые требуют больших наборов данных для обучения. Из выделенных частей чертежа был сформирован датасет, где на вход подавалось изображение, а на выходе получалась маска из двух классов: фон и деталь. Общая точность

после завершения обучения получилась более 90 % (рис. 3) по метрике mAP. Результатом будут маски, копирующие часть чертежа, но уже в бинарном виде, где 0 – пустое пространство, а 1 – присутствие детали (рис. 4), но они содержат поля, которые не содержат активные пиксели, и эти поля нужно удалить (рис. 5).

Посредством выделения маски детали (совокупности пикселей изображения проекции, принадлежащих детали) из частей чертежа, относящихся к изображениям детали, определяются её проекции (рис. 6), а на основе них строятся множества точек, соответствующие силуэтам [Мсаллам, Сырямкин, 2023].

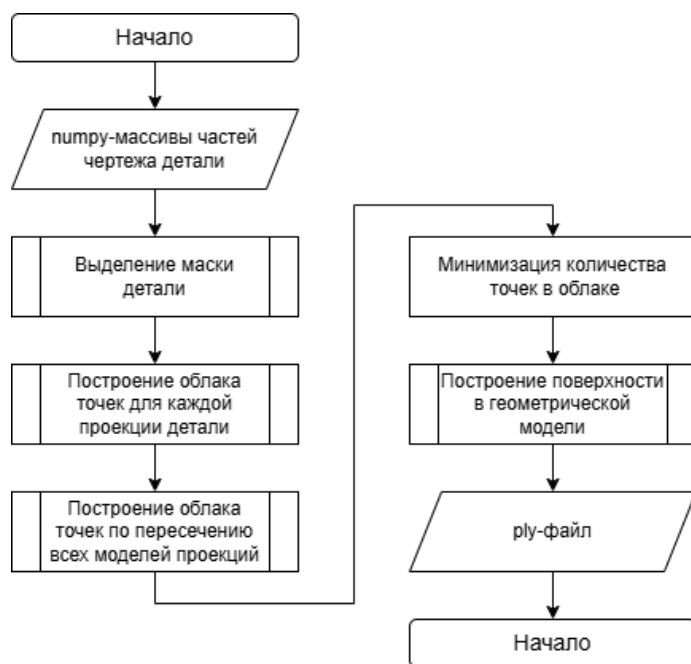


Рис. 2. Обобщенный алгоритм построения геометрической модели детали на основе ее проекций

Fig. 2. Generalized algorithm for constructing a geometric model of a part based on its projections

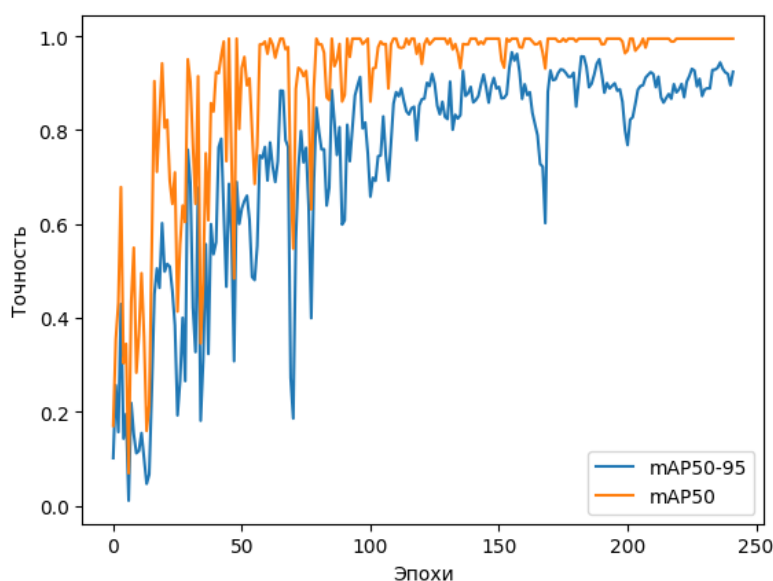


Рис. 3. График обучения модели

Fig. 3. Learning model graph

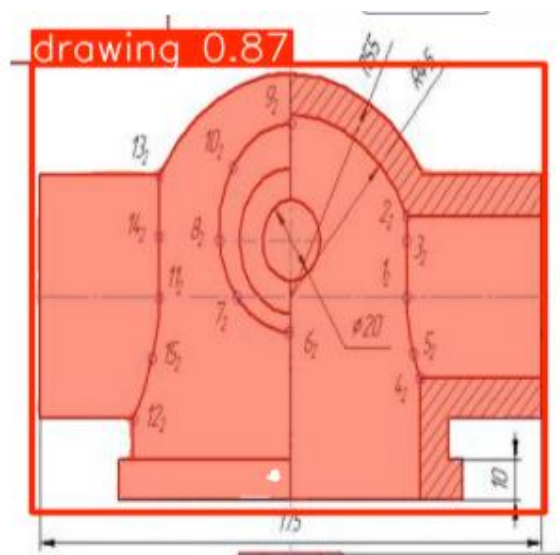


Рис. 4. Результат работы модели
Fig. 4. Result model



Рис. 5. Полученные маски
Fig. 5. Result masks



Рис. 6. Маски детали
Fig. 6. Masks details

На пересечении всех множеств точек, построенных по силуэтам, образуется геометрическая модель детали, представленная облаком точек (рис. 7, а). Затем путем оставления только минимальных и максимальных значений по каждой оси удаляются все внутренние точки облака. По оставшимся точкам на основе фигур строится поверхность (рис. 7, б).

Особенностями применённого подхода к построению геометрической модели детали являются использование информации об элементах вращения (в частности, радиусов округлых частей детали), а также применение алгоритма корректировки центра вращения.

Маски, получаемые с помощью нейронной сети, могут получиться немного сдвинутыми относительно центра вращения детали. Из-за неточности определения масок возможно несовпадение их центров, в результате чего появляется «подрезание» детали (незавершение построения её частей). Для компенсации данного недостатка разработан алгоритм корректировки, сдвигающий все координаты точек радиуса на несколько пикселей влево, вправо, вверх и вниз, подсчитывающий совпадающие точки между тремя геометрическими моделями с получением коэффициента IoU и выбирающий те координаты, у которых полученный коэффициент максимальный.

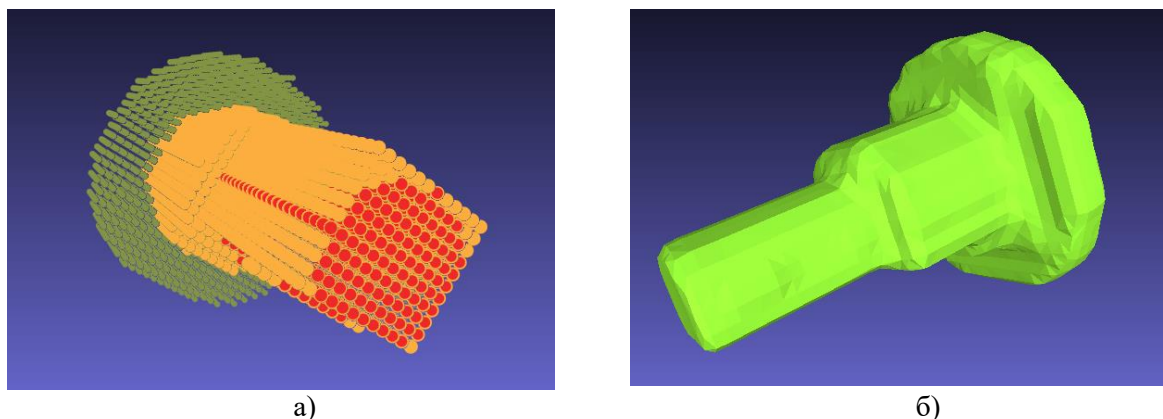


Рис. 7. Результаты построения геометрической модели с использованием сгенерированных масок и значений размеров детали
Fig. 7. Results of constructing a geometric model using generated masks and part size values

Выводы

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности выбранного подхода к построению геометрических моделей на основе скалярных изображений чертежей деталей и изделий.

В качестве направлений дальнейшего исследования, обеспечивающих повышение точности детализации геометрических моделей, рассматриваются:

- 1) дообучение модели построения масок деталей с добавлением новых классов;
- 2) накопление и использование информации о часто используемых элементах чертежей;
- 3) комбинирование подхода к геометрическому моделированию детали/изделия, основанному на применении генеративных нейронных сетей к полученным параметрам простых и сложных примитивов.

Список литературы

- Анализ размера и доли рынка цифровых двойников – тенденции роста и прогнозы (2024–2029 гг.) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/digital-twin-market> (дата обращения: 15.01.2025 г.)
- Басов О.О., Демин О.Д., Носков Д.А. 2024. Подход к векторизации чертежей конструкторской документации на бумажном носителе. *Научный результат. Информационные технологии*. 9(3): 55–62. DOI: 10.18413/2518-1092-2024-9-3-0-6, URL: <https://rriinformation.ru/journal/annotation/3560/>.
- Климентьев А.Л., Свирский Д.Н. 2006. Дискретное моделирование формообразования фасонных деталей. *Вестник ВГТУ*, 11: 74–78.
- Макарова Е.А., Лагерева Д.Г. 2022. Модель обработки слабоструктурированных текстовых данных на русском языке для интеллектуальной поддержки информационного управления в динамических организационных системах. *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. 3: 104–125. doi:10.21685/2227-8486-2022-3-7
- Модели семейства YOLO [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.ultralytics.com/> (дата обращения: 15.01.2025 г.)
- Мсаллам М., Сырякин В.И. 2023. Методика регистрации 3D облаков точек с использованием коррекции плоскостей и корреляции гистограмм. *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. 1(61): 73–89.
- Прохоров А., Лысачев М. 2020. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое, исправленное и дополненное. М.: ООО «АльянсПринт», 401 с.



- YOLO Показатели производительности [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.ultralytics.com/ru/guides/yolo-performance-metrics/#engage-with-the-broader-community> (дата обращения: 15.01.2025 г.)
- Demchenko D., Bagramshina V., Gromov A. 2020. Digital Twin Technology. 10.13140/RG.2.2.11556.30087.
- Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection // arxiv.org [Электронный ресурс]. URL: <https://arxiv.org/pdf/1506.02640> (дата обращения: 15.01.2025 г.)

References

- Analysis of the size and market share of digital twins — growth trends and forecasts (2024-2029) [electronic resource]. URL: <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/digital-twin-market>. (date accessed: 15.01.2025)
- Basov O.O., Demin O.D., Noskov D.A. 2024. Approach to vectorization of design documentation drawings on paper. *Research Result. Information Technologies*. 9(3): 55–62 (in Russian). DOI: 10.18413/2518-1092-2024-9-3-0-6, URL: <https://rrinformation.ru/journal/annotation/3560/>.
- Klimentyev A.L., Svirsky D.N. 2006. Discrete modeling of the shaping of shaped parts. *Vestnik VSTU*, 11: 74–78 (in Russian).
- Makarova E.A., Lagerev D.G. 2022. Model for processing weakly structured text data in Russian for intelligent support of information management in dynamic organizational systems. *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 3: 104–125 (in Russian). doi:10.21685/2227-8486-2022-3-7
- YOLO's models [electronic resource]. URL: <https://docs.ultralytics.com/> (date accessed: 15.01.2025)
- Msallam M., Syryamkin V.I. 2023. Methodology for registering 3D point clouds using plane correction and histogram correlation. *Caspian Journal: Management and High Technologies*, 1(61): 73–89 (in Russian).
- Prokhorov A., Lysachev M. 2020. Digital twin. Analysis, trends, world experience. First edition, corrected and expanded. – M.: AlliancePrint LLC, 401 pp.
- YOLO Performance Metrics [electronic resource]. URL: <https://docs.ultralytics.com/ru/guides/yolo-performance-metrics/#engage-with-the-broader-community> (date accessed: 15.01.2025 г.)
- Demchenko D., Bagramshina V., Gromov A. 2020. Digital Twin Technology. 10.13140/RG.2.2.11556.30087.
- Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection // arxiv.org [electronic resource]. URL: <https://arxiv.org/pdf/1506.02640> (date accessed: 15.01.2025)

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 15.01.2025

Received January 15, 2025

Поступила после рецензирования 28.02.2025

Revised February 28, 2025

Принята к публикации 04.03.2025

Accepted March 04, 2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Басов Олег Олегович, доктор технических наук, доцент, руководитель центра искусственного интеллекта, Акционерное общество «АСТ», г. Москва, Россия

Oleg O. Basov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Artificial Intelligence Center, Joint Stock Company «AST», Moscow, Russia

Носков Дмитрий Александрович, разработчик направления информационно-аналитических систем, Акционерное общество «АСТ», г. Москва, Россия

Dmitry A. Noskov, Developer of Information and Analytical Systems, Joint Stock Company «AST», Moscow, Russia