

УДК 004.89

**TINYML: ТЕХНОЛОГИИ, ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ НА ПЛАТФОРМЕ GROVE
VISION AI V2****Стародуб Ярослав Николаевич,**Студент магистратуры, 1 курс
МГТУ им. Н.Э. Баумана (КФ), г. Калуга
yaroslavl.ja@yandex.ru**Вершинин Евгений Владимирович,**Начальник управления научно-технической политики, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой «Системы обработки информации»
МГТУ им. Н.Э. Баумана (КФ), г. Калуга**Аннотация**

В работе приведен краткий обзор технологии TinyML, рассмотрены современные фреймворки и библиотеки. Перечислены ключевые области применения TinyML. Подробно рассмотрена архитектура модуля Grove Vision AI V2. Проведено сравнение характеристик Grove V2 с другими TinyML-платформами: Raspberry Pi 4B, NVIDIA Jetson Nano, Arduino Nicla Vision. Представлена сравнительная таблица по производительности (FPS), энергопотреблению и цене на основе измерений и данных из других научных работ. Экспериментально выполнены задачи детекции и трекинга объектов с помощью Grove Vision AI V2: описаны настройка, запуск готовых моделей через платформу SenseCraft AI, а также замеры производительности (FPS, время отклика) и энергопотребления. Проведен анализ результатов: уточнены точность и стабильность распознавания, отмечены ограничения и перспективы развития.

Ключевые слова: TinyML, искусственный интеллект, микроконтроллер, Grove Vision AI V2, нейронные сети, детекция объектов, одноплатный компьютер, встроенные системы, компьютерное зрение, Edge AI.

**TINYML: TECHNOLOGIES, APPLICATIONS AND EXPERIMENTAL
IMPLEMENTATION ON THE GROVE VISION AI V2 PLATFORM****Starodub Iaroslav Nikolaevich,**Master's student, 1st year
BMSTU (Kaluga branch), Kaluga**Vershinin Evgeny Vladimirovich**

Head of the Department of Scientific and Technical Policy, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Information Processing Systems,

BMSTU (Kaluga branch), Kaluga

ABSTRACT

The paper provides a brief overview of TinyML technology and reviews modern frameworks and libraries. Key areas of TinyML application are listed. The architecture of the Grove Vision AI V2 module is examined in detail. A comparison of the characteristics of Grove V2 with other TinyML platforms: Raspberry Pi 4B, NVIDIA Jetson Nano, and Arduino Nicla Vision. A comparative table of performance (FPS), power consumption, and price is presented based on measurements and data from other scientific works. Object detection and tracking tasks were experimentally performed using Grove Vision AI V2: the configuration, launch of ready-made models via the SenseCraft AI platform, as well as performance measurements (FPS, response time) and power consumption are described. The results were analyzed: the accuracy and stability of recognition were clarified, and limitations and prospects for development were noted.

Keywords: TinyML, artificial intelligence, microcontroller, Grove Vision AI V2, neural networks, object detection, single-board computer, embedded systems, computer vision, Edge AI.

Введение

TinyML (Tiny Machine Learning) – это направление машинного обучения, ориентированное на выполнение моделей прямо на ресурс-ограниченных устройствах с низким [1, 2]. Основная цель TinyML – обеспечить возможность запуска алгоритмов машинного обучения на «границе» сети (edge) без постоянного подключения к облаку. TinyML-устройства выполняют анализ данных локально, что повышает приватность, снижает задержки и уменьшает энергозатраты [3]. TinyML-системы обычно разрабатываются с учетом жестких ограничений: маленький объем памяти, ограниченные вычислительные ресурсы и низкие энергозатраты [2, 3].

В России исследования TinyML активно ведутся начиная с 2019–2020 гг. В здравоохранении были реализованы проекты по локальному анализу биосигналов с использованием TinyML-моделей [4]. Кроме того, российские инженеры применяют TinyML в IoT-приложениях для «умного дома» [3], а также активно исследуют нейросетевые решения на ARM-микроконтроллерах для компьютерного зрения и обработки сигналов [5]. Исследования по разработке встроенных ML-систем на базе микроконтроллеров (MCU) растут с каждым годом. [6]

Современные фреймворки и инструменты для TinyML позволяют разрабатывать, оптимизировать и внедрять модели машинного обучения в ограниченные устройства. Наиболее распространенные библиотеки и платформы включают:

- TensorFlow Lite (Micro) – облегченная версия TensorFlow для встраиваемых устройств, предоставляющая компактные бинарные модели для микроконтроллеров [1];
- Edge Impulse – облачная платформа и набор инструментов, упрощающих весь цикл разработки TinyML-моделей (от сбора данных до развертывания на устройстве) [2];
- uTensor – сверхлегковесный фреймворк для инференса на основе TensorFlow, оптимизированный для платформ Arm Cortex-M [7];
- PyTorch Mobile и CoreML – расширения популярных фреймворков для мобильных/встраиваемых устройств;
- STM32Cube.AI, X-Cube-AI и др. – производственные решения (например, для STM32, NXP);
- Microsoft Embedded Learning Library – фреймворк от Microsoft для TinyML.

TinyML-фреймворки обычно предоставляют средства для квантования моделей, чтобы они умещались в ОЗУ микроконтроллера, и поддерживают разработку на Python, C/C++ или даже визуальные интерфейсы для разметки данных и обучения моделей. Например, TensorFlow Lite позволяет конвертировать и запускать модели нейронных сетей на Arduino и других платах с малым

объемом памяти [1]. Платформа Edge Impulse помогает упростить весь цикл разработки под edge AI: от сбора и разметки данных до загрузки моделей на устройства [2].

TinyML как область активно развивается и привлекает внимание благодаря сочетанию ИИ и Интернета вещей. Считается, что TinyML-устройства могут выполнять свою задачу при энергопотреблении порядка нескольких милливатт [2], что кардинально отличается от классических вычислительных платформ.

В отличие от «большого» ML, где модели обычно обучаются и инференсятся на серверах, TinyML требует «оптимизации до микроплотности» - упрощенных архитектур и специальных моделей, адаптированных под очень ограниченные ресурсы. TinyML повсюду: в датчиках, носимых устройствах, умных приборах, роботах и других системах, где энергоэффективность и отсутствие задержек критичны.

Области применения TinyML

Технологии TinyML находят применение во многих областях благодаря своей способности обрабатывать данные на месте, без «облачной зависимости». Ключевые направления включают:

- Промышленность: TinyML-устройства используются для предиктивного обслуживания (износ оборудования, вибрационный анализ), мониторинга качества продукции, контроля параметров производства. Они могут выполнять детекцию дефектов на конвейере или анализировать изображения для системы контроля качества. Примеры: сенсоры на станках, отслеживающие вибрации и оповещающие при аномалиях, или камеры, распознающие дефекты на производстве [3, 8];

- Медицина и здравоохранение: носимые гаджеты с TinyML-системами (умные часы, браслеты) постоянно мониторят жизненно важные показатели - пульс, уровень кислорода. TinyML позволяет на месте обнаруживать аномалии (например, аритмию) и мгновенно реагировать, при этом все данные обрабатываются локально без риска утечки в сеть. Также разрабатываются медицинские датчики (например, анализатор легких, мониторинг сна) с TinyML-аналитикой, обеспечивающие быструю [3, 9];

- Умный дом и IoT: локальные системы управления (голосовые ассистенты, камеры наблюдения, системы безопасности) используют TinyML для распознавания лиц, голоса, обнаружения вторжений. Например, миниатюрные камеры-датчики могут анализировать видеопоток и сообщать о присутствии человека или задымления без подключения к облаку. Это снижает задержки при аварийных ситуациях и повышает приватность жильцов. TinyML в IoT-устройствах («умное освещение», термостаты, датчики движения) позволяет мгновенно обрабатывать события и экономить электроэнергию (устройства могут долго работать от батареек);

- Транспорт и автомобили: системы помощи водителю и бортовые камеры используют TinyML для распознавания дорожных знаков, пешеходов, мониторинга состояния водителя. Модули слежения могут выполнять быстрый детект объектов вокруг автомобиля на скоростных трассах. TinyML также используется в беспилотных транспортных средствах и дронах для локального анализа данных (например, обнаружение препятствий на маршруте) без зависимости от удаленных серверов [9];

- Сельское хозяйство и экология: автономные датчики в полях измеряют влажность, кислотность почвы, засоренность растений и локально оценивают состояние урожая. TinyML-модели могут определять наличие вредителей или болезней по изображениям листьев и оперативно сообщать фермеру. Аналогично используются умные станции мониторинга качества воздуха и воды, где модели TinyML быстро классифицируют загрязненность на местах, экономя энергию и уменьшая время отклика.

Таким образом, TinyML «расширяет границы» традиционных IoT-приложений: от носимых фитнес-трекеров и умных домов до промышленных автоматизированных систем и автономных транспортных средств [3, 9]. Во всех перечисленных случаях преимущества TinyML - низкая задержка при принятии решений, повышенная приватность (данные не покидают устройство) и долгая автономность - делают его предпочтительным выбором для многих вариантов использования.

Архитектура Grove Vision AI V2

Grove Vision AI V2 - компактный модуль для задач компьютерного зрения с ИИ от Seed Studio. Он представляет собой «платформу на проводнике» (Grove) и рассчитан на работу в составе

пользовательских систем (например, подключаясь к хост-плате через интерфейс I2C). На Рис. 1 показан модуль Grove Vision AI V2 с подключенной камерой OV5647 (слева) и управляющей платой Seeed XIAO (ESP32) (справа) для демонстрации совместимости с микроконтроллерами.

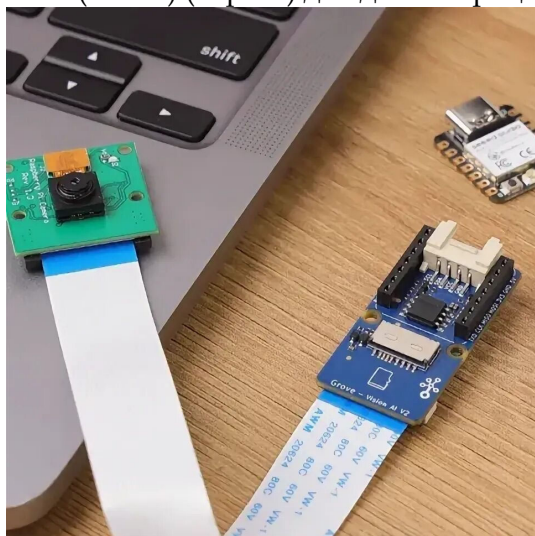


Рис.1. Модуль Grove Vision AI V2 с камерой OV5647 и платой SEEED XIAO ESP32.

Архитектурно модуль Grove Vision AI V2 основан на микроконтроллере HiMax WiseEye2 HX6538, содержащем два ядра Arm Cortex-M55 (с тактовой частотой 400 МГц и 150 МГц) и встроенный ускоритель ИИ Arm Ethos-U55 (400 МГц) [10, 11]. Основные аппаратные характеристики устройства:

- Микроконтроллер: HiMax WiseEye2 HX6538 - dual-core Cortex-M55 (400 МГц + 150 МГц) с микронейронным ускорителем Arm Ethos-U55 @400 МГц [10, 11].
- Память и хранение: 2432 КБ SRAM для программ и данных; 16 МБ флэш-памяти (QSPI) для прошивки и моделей; слот microSD (до 25 МГб) для хранения дополнительных данных [10].
- Камера: стандартный разъем MIPI CSI для подключения камеры. По умолчанию в комплект входит модуль OV5647 [10]. Модуль Grove V2 совместим с разнообразными камерами Raspberry Pi.
- Микрофон: встроенный цифровой микрофон (PDM) для захвата звуковых сигналов [10].
- Интерфейсы: USB Type-C -порт питания и программирования (USB Serial для загрузки прошивки); стандартизированный разъем Grove I2C для связи с внешним хостом (Arduino, Raspberry Pi, ESP32, XIAO и др.) по протоколу I2C [10]. Дополнительно имеется интерфейс Grove UART для отладки.
- Поддерживаемые модели: готовые и оптимизированные под TinyML ИИ-модели. В документации указано, что модуль способен запускать эффективные нейросети: MobileNetV1/V2, EfficientNet-lite, а также детекторы YOLOv5 и YOLOv8 (с помощью инструмента SenseCraft AI) [11]. Фактически модели конвертируются в формат TensorFlow Lite или специфичный бинарный формат и загружаются в модуль без необходимости программирования (no-Code через платформу SenseCraft AI).

Иными словами, Grove Vision AI V2 – это «AI-компьютер» на базе энергосберегающего микроконтроллера с внешней камерой. Он «первый» в своем классе использует HX6538 с интегрированным Ethos-U55 и оптимизирован под датчики компьютерного зрения [11]. Благодаря этому модуль может работать автономно, выполнять сложные задачи компьютерного зрения и передавать результаты ведущему контроллеру или системе.

Сравнение с другими платформами TinyML

Ниже приведены характеристики Grove Vision AI V2 и других популярных TinyML/AI-платформ: Raspberry PI 4B, NVIDIA Jetson Nano, Arduino Nicla Vision. Основные параметры – вычислительная мощность (FPS детекции), энергопотребление и цена – сводятся в таблицу. Данные для Grove V2 получены экспериментально, для PI и Nicla – из открытых тестов и спецификаций [12], Jetson Nano – из данных сторонних источников [13]. Фреймворки и особенности интеграции также указаны для каждой платформы.

Таблица 1. Сравнение характеристик платформ для TinyML

Платформа	CPU/Ускоритель	Поддержка фреймворков и особенности интеграции	Производительность (FPS)	Энергопотр. (Вт)	Цена (USD)	Примечания
Grove Vision AI V2	HiMax WiseEye2 HX6538: 2×Cortex-M55 (400/150MHz) + ARM Ethos-U55 (400MHz)	Поддерживает TinyML-модели TensorFlow Lite/PyTorch (через SenseCraft AI). Нужен внешний хост (например, Arduino, XIAO ESP32) по I2C	≈30.3 (модель «YOLO» на 300×300)	≈0.35	\$24	Высокая производительность на ПОК; маленькая. Хорошо подходит для встроенных приложений.
Raspberry Pi 4B	Broadcom BCM2711: 4×Cortex-A72 @1.5GHz (no NPU)	Полноценный Linux, поддерживаются TensorFlow, PyTorch, OpenCV и др. Требуется установка ОС. Камера подключается по CSI/USB.	≈113.2 (TFLite EfficientDet)	≈3.8	\$55	Высокая вычисл. мощность CPU, но большой расход энергии. Универсальная среда разработки.
NVIDIA Jetson Nano	NVIDIA Tegra X1: 4×Cortex-A57 + 128-ядерный GPU Maxwell	Поддерживает CUDA, cuDNN, TensorRT, PyTorch, TensorFlow и др. (Linux).	≈27 (YOLOv5n с TensorRT)	5–10 (переменный режим)	~\$100	Наивысшая производительность за счёт GPU. Используется в более тяжёлых задачах.
Arduino Nicla Vision	ST STM32H747AI I6: Cortex-M7 @480MHz + Cortex-M4 @240MHz	Поддерживает TensorFlow Lite, интегрируется с OpenMV и MicroPython. Имеет Wi-Fi/BLE, микрофон, IMU, ToF-сенсор.	≈5.59 (OpenMV Blob Detection)	≈0.59	\$115	Компактный и автономный. Невысокая скорость инференса на тяжёлых моделях, но расширенный набор сенсоров.

Из сравнения видно, что Jetson Nano обеспечивает рекордную производительность благодаря мощному GPU. Raspberry Pi 4B – полноценная одноплатная машина: с нейтральным CPU она тоже справляется с моделями на уровне сотен FPS. В то же время Grove Vision AI V2 показывает ≈30 FPS при инференсе «сжатой» модели (300×300), что сопоставимо с небольшой частью возможностей Pi, но при крайне низком энергопотреблении (~0.35 Вт) и гораздо меньшей цене. Nicla Vision более медленный (≈5.6 FPS) из-за менее мощного микроконтроллера, но предлагает встроенные средства связи и датчики. В целом Grove Vision AI V2 находится между этими устройствами по показателю «производительность/энергия»: он мощнее других TinyML-платформ MCU, но гораздо энергоэффективнее обычных SBC.

Дополнительно следует отметить различия в простоте интеграции. Grove Vision AI V2 легко программируется через веб-сервис SenseCraft AI. Raspberry Pi и Jetson Nano – полноценные компьютеры, гибкие, но их настройка более сложна (установка ОС и библиотек) [13]. Nicla Vision программируется как Arduino/ESP, но для визуальных задач обычно используется OpenMV IDE.

Экспериментальная часть

В эксперименте на платформе Grove Vision AI V2 были реализованы классические задачи детекции и трекинга объектов. В частности, использовалась предварительно обученная модель распознавания лиц для задачи слежения. Модель загружалась на модуль через интерфейс SenseCraft

AI – веб-платформу, позволяющую без программирования «запустить» TFLite-модель в устройство. Ведущим контроллером служила плата SEEED XIAO ESP32, соединенная с Vision AI V2 по I2C (см. Рис. 1). После загрузки модели модуль начал воспроизводить кадры с камеры (OV5647).

Режимы работы:

- Детекция объектов: модуль V2 определял объекты классов «человек», «животное» и т.д. При успешном распознавании модель рисовала рамку вокруг объекта. На основе видеопотока можно было оценить FPS в реальном времени;

- Трекинг лиц: в демо-проекте «следающий вентилятор» на официальном сайте [8], модуль распознавал лицо оператора и выдавал координаты обнаруженного лица в каждом кадре. С помощью этих координат управлялись сервоприводы. На рис. 2 представлен фрагмент эксперимента.



Рис.2. Экспериментальный модуль с моделью для трекинга лица, построенная на базе Grove Vision AI V2, SEEED XIAO ESP32 и камеры OV5647.

В нашем случае Grove Vision V2 достиг времени обработки $\sim 33\text{--}35$ мс (≈ 30 FPS). Средний ток на модуле составлял ~ 70 мА (при 5V) – это примерно 0.35 Вт потребляемой энергии.

Дополнительно фиксировалась стабильность работы: при хорошей видимости (дневной свет или нейтральная лампа) модуль уверенно детектировал объекты и лица. В условиях слабой освещенности (вечернее слабое освещение) точность распознавания снижалась, как и на большинстве камер. Лог-файлы показывали, что инференсы проходили без зависаний и с равномерным временем отклика ($\sim 33\text{--}35$ мс) в течение длительного периода, что свидетельствует о стабильной работе аппаратуры.

Анализ результатов эксперимента

Эксперимент показал, что Grove Vision AI V2 способна выполнять сложные задачи компьютерного зрения в режиме реального времени с неплохой точностью. Модель детекции корректно выявляла большинство целевых объектов при разрешении 300×300 пикселей. Точность несколько уступает десктопным системам из-за упрощенных моделей, однако находится на приемлемом уровне для многих областей применения.

Стабильность работы также удовлетворительна: инференс без сбоев происходил при постоянной нагрузке, модули не нагревались критично (потребление ~ 0.35 Вт), а все процессы оставались детерминированными (время отклика изменялось не более чем на несколько миллисекунд). Тем не менее следует отметить ограничения TinyML-подхода: малый размер модели ограничивает детализацию распознавания (трудно обнаружить мелкие или перекрытые объекты), и модель чувствительна к сложным фону и освещению.

Еще про ограничения: в TinyML, устройство имеет очень ограниченные ресурсы памяти и вычислений, что негативно сказывается на размере входного изображения (до $\sim 300 \times 300$) и архитектуру модели (легковесные CNN), что сказывается на точности.

Для повышения качества и скорости распознавания можно использовать более продвинутые микроконтроллеры (например, Cortex-M7/M33 или решения на RISC-V) и акселераторы нового поколения. Также полезны дополнительные датчики (например, инфракрасная камера).

Заключение

В данной работе проведено всестороннее исследование TinyML и его возможностей на примере модуля Grove Vision AI V2. TinyML позволяет совмещать ИИ и «мир» IoT за счёт оптимизированных моделей и фреймворков (TensorFlow Lite, uTensor, Edge Impulse и др.), обеспечивая локальный анализ данных с низкой задержкой [1]. Основные области применения TinyML включают промышленность, здравоохранение, умные дома и автотранспорт [3, 8, 9].

Подробный разбор Grove Vision AI V2 показал, что модуль оснащён мощным для своего класса процессором (Cortex-M55 + Ethos-U55) и поддерживает современные TinyML-модели (MobileNet, YOLO) [7, 8]. В сравнении с другими платформами V2 демонстрирует отличное соотношение производительности и энергоэффективности: примерно 30 FPS при инференсе и всего ≈ 0.35 Вт потребления.

В эксперименте были успешно запущены задачи обнаружения и слежения за объектами, подтвердив способность Grove V2 работать в реальном времени. Модуль показал надёжность и приемлемую точность распознавания.

Для улучшения работы рекомендуются: расширить поддерживаемые модели и архитектуры (например, добавить CNN-подсистему или GPU), обеспечить встроенную связь (Wi-Fi/BLE) для автономной работы без внешнего хоста, а также продолжать оптимизацию ПО (библиотеки TinyML, автоматические инструменты квантования). В целом Grove Vision AI V2 является удачной платой для демонстрации TinyML-подхода, объединяющим компактность аппаратуры и возможности современных ИИ-моделей, и может быть использован в промышленных и бытовых приложениях, где требуется распознавание изображений при низкой мощности.

Результаты исследования позволяют сделать вывод о том, что каждый из подходов имеет свои преимущества и недостатки, и выбор между ними должен быть обоснован исходя из конкретных условий и требований проекта.

Список литературы:

1. Habr. Как TinyML помогает запускать модели машинного обучения на микроконтроллерах [Электронный ресурс]. – URL: <https://habr.com/ru/companies/otus/articles/540276/> (дата обращения: 07.05.2025).
2. DFRobot. Обзор Grove Vision AI V2 от Seeed Studio [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.dfrobot.com/blog-13921.html> (дата обращения: 07.05.2025).
3. Бхатт Р., Шюань Т. Создание IoT-приложений с помощью TinyML и машинного обучения // Control Engineering Russia. 2022. Июнь. URL: <https://controleng.ru/innovatsii/cifrovye-dvojniki/tinyml/>
4. Гусев А.В., Владзимирский А.В., Шарова Д.Е., Арзамасов К.М., Храмов А.Е. Развитие исследований и разработок в сфере технологий искусственного интеллекта для здравоохранения в Российской Федерации: итоги 2021 года // Digital Diagnostics. - 2022. - Т. 3. - №3. - С. 178-194. doi: 10.17816/DD107367
5. Шевцов Д. Нейросетевые решения на ARM-микроконтроллерах // СТА. 2024. №4. URL: <https://www.cta.ru/articles/cta/obzory/apparatnye-sredstva/180773/>
6. Фомина, А. Н. Проблемы и перспективы развития рынка искусственного интеллекта в России / А. Н. Фомина // Вопросы инновационной экономики. – 2022. – Т. 12, № 2. – С. 1051-1068. – DOI 10.18334/vines.12.2.114607
7. uTensor. Lightweight machine learning framework for microcontrollers [Электронный ресурс]. – URL: <https://github.com/uTensor/uTensor> (дата обращения: 07.05.2025).
8. Seeed Studio Wiki. Grove Vision AI V2 Demo [Электронный ресурс]. – URL: https://wiki.seeedstudio.com/grove_vision_ai_v2_demo/ (дата обращения: 07.05.2025).

9. Habr. TinyML: технологии, перспективы и вызовы [Электронный ресурс]. – URL: <https://habr.com/ru/companies/otus/articles/791040/> (дата обращения: 07.05.2025).
10. CNX Software. Модуль Grove Vision AI V2 стоимостью \$16 оснащен микроконтроллером WiseEye2 HX6538 (Cortex-M55 и Ethos-U55) [Электронный ресурс]. – URL: <https://cnx-software.ru/2024/01/21/modul-grove-vision-ai-v2-stoimostyu-16-dollarov-ssha-osnashhen-mikrokontrollerom-wiseeye2-hx6538-arm-cortex-m55-i-ethos-u55-ai/> (дата обращения: 07.05.2025).
11. Seeed Studio Wiki. Grove Vision AI V2A Documentation [Электронный ресурс]. – URL: https://wiki.seeedstudio.com/grove_vision_ai_v2a/ (дата обращения: 07.05.2025).
12. Hackster.io. 2024 MCU AI Vision Boards Performance Comparison [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.hackster.io/limengdu0117/2024-mcu-ai-vision-boards-performance-comparison-998505> (дата обращения: 07.05.2025).
13. Seeed Studio. Faster inference with TensorRT on Jetson Nano [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.seeedstudio.com/blog/2022/08/23/faster-inference-with-tensorrt-on-nvidia-jetson-run-yolov5-at-27-fps-on-jetson-nano/> (дата обращения: 07.05.2025).

References:

1. Habr. Как TinyML помогает запускать модели машинного обучения на микроконтроллерах [Electronic resource]. – URL: <https://habr.com/ru/companies/otus/articles/540276/> (accessed: 07.05.2025).
2. DFRobot. Обзор Grove Vision AI V2 от Seeed Studio [Electronic resource]. – URL: <https://www.dfrobot.com/blog-13921.html> (accessed: 07.05.2025).
3. Bhatt R., Khan T. Creating iOS applications using Tinyxml and software // Control Engineering Russia. 2022. June. URL: <https://controleng.ru/innovatsii/cifrovye-dvojniki/tinyml/>
4. Gusev A.V., Vladzimirsky A.V., Sharova D.E., Arzamasov K.M., Khramov A.E. Evolution of research and development in the field of artificial intelligence technologies for healthcare in the Russian Federation: results of 2021 // Digital Diagnostics. - 2022. - Vol. 3. - N. 3. - P. 178-194. doi: 10.17816/DD107367
5. Shevtsov D. Neural network solutions on ARM microcontrollers // СТА. 2024. No. 4. URL: <https://www.cta.ru/articles/cta/obzory/apparatnye-sredstva/180773/>
6. Fomina, A. N. (2022). Challenges and development trends of the artificial intelligence market in Russia. Russian Journal of Innovation Economics, 12(2), 1051-1068. <https://doi.org/10.18334/vinec.12.2.114607>
7. uTensor. Lightweight machine learning framework for microcontrollers [Electronic resource]. – URL: <https://github.com/uTensor/uTensor> (accessed: 07.05.2025).
8. Seeed Studio Wiki. Grove Vision AI V2 Demo [Electronic resource]. – URL: https://wiki.seeedstudio.com/grove_vision_ai_v2_demo/ (accessed: 07.05.2025).
9. Habr. TinyML: технологии, перспективы и вызовы [Electronic resource]. – URL: <https://habr.com/ru/companies/otus/articles/791040/> (accessed: 07.05.2025).
10. CNX Software. Модуль Grove Vision AI V2 стоимостью \$16 оснащен микроконтроллером WiseEye2 HX6538 (Cortex-M55 и Ethos-U55) [Electronic resource]. – URL: <https://cnx-software.ru/2024/01/21/modul-grove-vision-ai-v2-stoimostyu-16->

dollarov-ssha-osnashhen-mikrokontrollerom-wiseeye2-hx6538-arm-cortex-m55-i-ethos-u55-ai/ (accessed: 07.05.2025).

11. Seeed Studio Wiki. Grove Vision AI V2A Documentation [Electronic resource]. – URL: https://wiki.seeedstudio.com/grove_vision_ai_v2a/ (accessed: 07.05.2025).
12. Hackster.io. 2024 MCU AI Vision Boards Performance Comparison [Electronic resource]. – URL: <https://www.hackster.io/limengdu0117/2024-mcu-ai-vision-boards-performance-comparison-998505> (accessed: 07.05.2025).
13. Seeed Studio. Faster inference with TensorRT on Jetson Nano [Electronic resource]. – URL: <https://www.seeedstudio.com/blog/2022/08/23/faster-inference-with-tensorrt-on-nvidia-jetson-run-yolov5-at-27-fps-on-jetson-nano/> (accessed: 07.05.2025).