

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2026, Том 18, № 1 / 2026, Vol. 18, Iss. 1 <https://esj.today/issue-1-2026.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/86ECVN126.pdf>

5.2.3. Региональная и отраслевая экономика (экономические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Цыганцов, А. С. Сверточные и трансформерные нейронные сети в бортовой разведке. Экономическая эффективность и ресурсоёмкость / А. С. Цыганцов, Ю. И. Литвин, К. В. Шишкин, М. С. Петров // Вестник евразийской науки. — 2026. — Т. 18. — № 1. — URL: <https://esj.today/PDF/86ECVN126.pdf>.

For citation:

Tsygantsov A.S., Litvin Yu.I., Shishkin K.V., Petrov M.S. Convolutional and transformer neural networks in airborne intelligence. Cost-efficiency and resource intensity. *The Eurasian Scientific Journal*. 2026;18(1): 86ECVN126. Available at: <https://esj.today/PDF/86ECVN126.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 338.45:004.032.26

Цыганцов Артём Сергеевич

ФГБОУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации», Москва, Россия
Национальная ассоциация экспертов экономической безопасности
Аналитик
E-mail: 220794@edu.fa.ru

Литвин Юрий Иванович

ФГБОУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации», Москва, Россия
Военно учебный центр
Начальник
Кандидат военных наук, доцент
E-mail: yilitvin@fa.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=805339

Шишкин Кирилл Владимирович

ФГБОУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации», Москва, Россия
ГК «ХайТэк», Москва, Россия
Специалист по сетевой безопасности
E-mail: 245242@edu.fa.ru

Петров Максим Сергеевич

ФГБОУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации», Москва, Россия
АО «Концерн Автоматика», Москва, Россия
Специалист отдела технической защиты информации
E-mail: 242166@edu.fa.ru

Сверточные и трансформерные нейронные сети в бортовой разведке. Экономическая эффективность и ресурсоёмкость

Аннотация. Динамика развития отраслей, связанных с беспилотными авиационными системами, обуславливает повышенное внимание к экономическим характеристикам алгоритмов машинного зрения, размещаемых на борту летательных аппаратов. Предметом настоящего исследования являются параметры экономической эффективности и ресурсоёмкости сверточных (CNN) и трансформерных (ViT) нейронных сетей, используемых для задач бортовой разведки. В работе задействованы методы сравнительного технико-экономического анализа, систематизации научных публикаций за период 2023–2026 годов, а также нормативно-правовой анализ

действующего российского законодательства. Исследование эволюции архитектурных решений позволило выявить устойчивую тенденцию к формированию гибридных моделей, сочетающих свёрточные операции с механизмами самовнимания, ориентированных на оптимизацию соотношения вычислительных затрат и точности распознавания объектов в условиях ограниченных бортовых ресурсов. Полученные результаты свидетельствуют о том, что выбор архитектуры нейросетевого модуля для бортовых платформ разведки не может определяться исключительно показателями точности детекции, а требует комплексной оценки стоимости владения вычислительной инфраструктурой, энергопотребления на один кадр инференса и масштабируемости решения в рамках серийного производства. Научная новизна состоит в разработке авторской матрицы экономико-технологического выбора архитектуры нейронной сети для бортовых разведывательных платформ, учитывающей совокупную стоимость жизненного цикла и показатели отраслевой ресурсоёмкости. Практическая значимость определяется возможностью применения результатов при обосновании инвестиционных решений в рамках национального проекта «Беспилотные авиационные системы» и формировании стратегий импортозамещения в сегменте бортового интеллектуального оборудования.

Ключевые слова: свёрточные нейронные сети; трансформерные нейронные сети; бортовая разведка; беспилотные авиационные системы; экономическая эффективность; ресурсоёмкость; периферийный инференс; компрессия моделей; совокупная стоимость владения

Введение

Стремительное расширение сферы применения беспилотных авиационных систем (БАС) формирует качественно новый сегмент отраслевой экономики, в рамках которого технологические параметры бортового оборудования непосредственно определяют экономические показатели эксплуатации.¹ Следует отметить, что объём мирового рынка беспилотников к концу 2024 года достиг 36,4 млрд долларов с прогнозом роста до 54,6 млрд долларов к 2030 году при среднегодовом темпе 7,1 %.² Необходимо подчеркнуть, что рынок ударных беспилотных комплексов оценивается в 14,99 млрд долларов в 2025 году с перспективой достижения 26,21 млрд долларов к 2030 году при среднегодовом росте 11,82 %.³

Вместе с тем Российская Федерация последовательно выстраивает институциональную среду для формирования самостоятельной отрасли беспилотной авиации. Национальный проект «Беспилотные авиационные системы», стартовавший с 1 января 2024 года, предусматривает федеральное финансирование в объёме 696 млрд рублей до 2030 года с целевым ориентиром производства 32,5 тыс. гражданских БПЛА в год.⁴ Наряду с этим, национальный проект «Экономика данных и цифровая трансформация государства», запущенный в 2025 году,

¹ Drone Industry Insights. Global Drone Market Report 2024–2030. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://ru-bezh.ru/infografika/kakie-vyzovy-zhdut-rossiyskiy-i-mirovoy-rynok-bpla> (дата обращения 08.03.2026).

² Mordor Intelligence. Unmanned Aerial Vehicles Market Report. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/uav-market> (дата обращения 08.03.2026).

³ Mordor Intelligence. Unmanned Combat Aerial Vehicle Market Size and Outlook 2030. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/unmanned-combat-aerial-vehicle-market> (дата обращения 08.03.2026).

⁴ Коммерсантъ. Нацпроект «Беспилотные авиасистемы» утверждён, на него выделяют 696 млрд руб. до 2030 года. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6442459> (дата обращения 08.03.2026).

выделяет 70 млрд рублей на федеральный проект «Искусственный интеллект».⁵ Указ Президента РФ от 15.02.2024 № 124 существенно обновил Национальную стратегию развития искусственного интеллекта на период до 2030 года, установив целевой показатель роста ежегодного объёма услуг по разработке ИИ-решений до 60 млрд рублей.⁶

Актуальность темы обусловлена противоречием между стремительно возрастающими требованиями к качеству распознавания объектов бортовыми системами разведки и жёсткими ограничениями вычислительных, энергетических и весогабаритных ресурсов платформ беспилотных летательных аппаратов.

Научная проблема заключается в отсутствии комплексной экономико-технологической оценки сравнительной эффективности сверточных и трансформерных архитектур нейронных сетей для задач бортовой разведки, учитывающей не только параметры точности и скорости детекции, но и совокупную стоимость жизненного цикла вычислительной платформы, энергопотребление и масштабируемость производства.

Объектом исследования выступает отраслевой сегмент беспилотных авиационных систем, оснащённых бортовыми модулями машинного зрения на основе нейросетевых алгоритмов.

Предметом исследования являются экономические параметры эффективности и ресурсоёмкости сверточных и трансформерных нейронных сетей при их развёртывании на периферийных вычислительных платформах бортовой разведки.

Цель исследования состоит в разработке матрицы экономико-технологического выбора архитектуры нейронной сети для бортовых разведывательных систем, интегрирующей показатели вычислительных затрат, энергоэффективности и совокупной стоимости владения.

Задачи исследования сформулированы следующим образом.

1. Систематизировать эволюцию архитектурных подходов к построению нейросетевых модулей детекции объектов для бортовых платформ разведки с позиции экономической эффективности.
2. Провести сравнительный технико-экономический анализ ресурсоёмкости сверточных и трансформерных архитектур в условиях ограниченных вычислительных ресурсов периферийных устройств.
3. Разработать матрицу экономико-технологического выбора архитектуры нейронной сети, учитывающую совокупную стоимость жизненного цикла бортовой вычислительной платформы.

Научная новизна исследования состоит в обосновании подхода к экономической оценке выбора архитектуры нейронной сети для бортовых систем разведки, интегрирующего метрики вычислительных затрат на инференс, энергопотребления на один обработанный кадр и совокупной стоимости владения периферийной вычислительной платформой в рамках жизненного цикла беспилотного комплекса.

⁵ ЦИПР. Россия переходит от «Цифровой экономики» к «Экономике данных». — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://cipr.ru/izdanie-2025/rossiya-perehodit-ot-czifrovoj-ekonomiki-k-ekonomike-dannyh/> (дата обращения 08.03.2026).

⁶ Указ Президента Российской Федерации от 15.02.2024 № 124 «О внесении изменений в Указ Президента Российской Федерации от 10 октября 2019 г. № 490». — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/50326> (дата обращения 08.03.2026).

Практическая значимость определяется возможностью использования результатов при формировании отраслевых стратегий развития БАС в рамках национальных проектов, а также при принятии инвестиционных решений по оснащению беспилотных платформ бортовыми модулями интеллектуальной обработки визуальной информации.

1. Методы и материалы

Методологическую основу исследования составляют положения теории отраслевой экономики, концепции совокупной стоимости владения (ТСО) и методология сравнительного технико-экономического анализа.

В качестве методов использованы систематический обзор научных публикаций за 2023–2026 годы, сравнительный анализ характеристик нейросетевых архитектур, нормативно-правовой анализ российского законодательства в сфере развития беспилотной авиации и искусственного интеллекта, а также метод экспертной систематизации для построения авторской матрицы выбора.

Эмпирическую базу составили бенчмарки производительности платформ NVIDIA Jetson, опубликованные результаты MLPerf Inference Edge, данные научных статей в рецензируемых журналах Scientific Reports, Electronics (MDPI), Complex and Intelligent Systems (Springer), а также аналитические отчёты Drone Industry Insights, Mordor Intelligence. Нормативно-правовой основой послужили Указ Президента РФ от 10.10.2019 № 490 (в ред. от 15.02.2024), национальный проект «Беспилотные авиационные системы», национальный проект «Экономика данных и цифровая трансформация государства».

2. Результаты и обсуждение

Теоретические основания экономического анализа бортовых нейросетевых систем разведки восходят к фундаментальной дихотомии между вычислительной сложностью алгоритма и качеством решения целевой задачи, получившей системное осмысление в работах научной школы периферийных вычислений (Edge Computing). Согласно обширному обзору, опубликованному в Electronics (MDPI), развёртывание глубоких нейронных сетей в средах с ограниченными ресурсами ставит перед разработчиками беспрецедентные вызовы, связанные с ограничениями оперативной памяти, вычислительной мощности и энергетического бюджета [1]. Особого внимания заслуживает тот факт, что выбор архитектуры нейронной сети, аппаратной платформы и методов оптимизации инференса определяется совокупностью ресурсных ограничений конкретной задачи, а свёрточные сети демонстрируют наибольшую эффективность в задачах компьютерного зрения, тогда как трансформеры обеспечивают превосходные возможности параллелизма и обработки дальних зависимостей.

Немаловажное значение имеет историческая ретроспектива развития архитектур детекции объектов для платформ БПЛА. Семейство детекторов YOLO, зародившееся в 2015 году, прошло путь от базовых свёрточных конструкций до современных версий YOLOv11 (2024) и YOLO26 (2025), последовательно наращивая эффективность при снижении ресурсоёмкости [2]. Показательно, что YOLO26 (2025) реализовал наиболее радикальные упрощения, включая устранение механизма Non-Maximum Suppression (NMS) и обеспечение нативного сквозного инференса, что привело к существенному ускорению вычислений на центральных процессорах при сохранении конкурентоспособной точности. Параллельно визуальные трансформеры (ViT), предложенные Dosovitskiy в 2020 году, продемонстрировали способность превосходить свёрточные аналоги по метрикам точности, хотя и ценой квадратичной вычислительной сложности механизма самовнимания.

Принципиально важным представляется анализ экономических параметров функционирования различных периферийных вычислительных платформ, используемых в бортовых системах разведки, как представлено в таблице 1.

Данные таблицы 1 свидетельствуют о существенной дифференциации экономических параметров периферийных платформ. Стоит обратить внимание на то, что NVIDIA Jetson Orin NX, демонстрируя почти двукратное превосходство по скорости инференса над конкурентами, потребляет лишь на 27–51 % больше электроэнергии, что указывает на значительно более высокую энергоэффективность в пересчёте на один обработанный кадр. Следует отметить, что стоимость данной платформы превышает альтернативы в 2,7–6 раз, что создаёт принципиально различные условия для формирования экономики серийного производства бортовых модулей.

Таблица 1

**Сравнительные экономико-технические характеристики
периферийных вычислительных платформ для бортового инференса**

Параметр	NVIDIA Jetson Nano	NVIDIA Jetson Orin NX	Google Coral TPU
Энергопотребление под нагрузкой, Вт	7	10,6	8,3
Скорость инференса YOLOv5, FPS	15–20	41,8	21,5
Производительность, TOPS	4	100	4
Ориентировочная стоимость, USD	99	399–599	150

Составлено авторами на основе анализа материалов [3]⁷

В развитие данного положения уместно заметить, что проблематика энергопотребления приобретает особую остроту в контексте бортовой разведки, где каждый ватт непосредственно влияет на продолжительность полётной миссии и, следовательно, на экономическую отдачу от каждого вылета. Согласно данным исследования энергопотребления встраиваемых ИИ-систем, потребление энергии на один кадр инференса варьируется от 0,12 Дж для легковесных моделей (MobileNet-v2) до 0,5 Дж для полноразмерных детекторов класса YOLO, что представляет собой 5–10-кратное улучшение энергоэффективности по сравнению с настольными графическими процессорами [4].

Существенное значение приобретает компаративный анализ свёрточных и трансформерных архитектур с позиций отраслевой ресурсоёмкости, результаты которого представлены в таблице 2.

Таблица 2

**Сравнительный анализ ресурсоёмкости свёрточных и
трансформерных архитектур для задач детекции объектов с аэрофотоснимков**

Архитектура	mAP@0.5:0.95, %	FPS на Jetson Xavier NX	Снижение FLOPs по сравнению с базовым ViT, %	Число параметров, млн
YOLOv5s (CNN)	61,2–69,2	30–60	не применимо	7,2
YOLOv8n (CNN)	58,3–67,8	35–55	не применимо	3,2
Swin Transformer (ViT)	64,2–73,9	25–39	68	28,3
Гибридный ViT-CNN	68,9–73,9	35–42	68	12–18

Составлено авторами на основе анализа материалов [5–7]

Анализ представленной в таблице 2 информации демонстрирует ряд закономерностей, имеющих непосредственное экономическое значение. Легковесные свёрточные детекторы семейства YOLO обеспечивают наименьшее число параметров и наивысшую скорость инференса,

⁷ NVIDIA Jetson Benchmarks. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://developer.nvidia.com/embedded/jetson-benchmarks> (дата обращения 08.03.2026).

NVIDIA Jetson Nano Technical Analysis // IRJMETS. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://www.irjmets.com/uploadnewfiles/irjmets71100095182/paperfile/irjmets71100095182.pdf> (дата обращения 08.03.2026).

что напрямую транслируется в минимальные требования к стоимости вычислительной платформы. Равным образом существенным является тот факт, что трансформерные архитектуры, несмотря на превосходство по точности распознавания малоразмерных объектов (64,2 % AP для объектов менее 32×32 пикселей против 56,8 % у YOLOv5s), требуют в 4–9 раз больше параметров, что пропорционально увеличивает потребность в оперативной памяти и энергопотребление. Примечательно, что гибридные архитектуры, сочетающие свёрточные блоки с механизмами самовнимания, позволяют приблизиться к точности полноразмерных трансформеров при существенно меньшей ресурсоёмкости.

Помимо указанного, следует обратить внимание на экономические последствия выбора стратегии оптимизации моделей для бортового развёртывания. Современные методы компрессии моделей включают квантование, прунинг и дистилляцию знаний [8]. Квантование позволяет аппроксимировать веса модели с использованием форматов пониженной разрядности, что уменьшает потребление памяти и ускоряет инференс. Прунинг направлен на удаление избыточных параметров, снижая вычислительные требования. Дистилляция знаний предполагает обучение компактной модели-«ученика» воспроизводить поведение крупной модели-«учителя». Исследование в Electronics (MDPI) показало, что применение динамического прунинга к трансформерным моделям позволяет добиться значительного снижения числа операций с плавающей запятой (FLOPs) и латентности инференса при сохранении приемлемой точности [9].

В дополнение к изложенному необходимо подчеркнуть экономическое измерение проблемы распознавания малоразмерных объектов, являющейся ключевой для бортовой разведки. Облегчённый вариант визуального трансформера достигает 68 % снижения FLOPs при сохранении 94,3 % относительной точности, а совместная оптимизация через смешанную квантизацию, структурный прунинг и слияние операторов обеспечивает 11,2-кратное ускорение инференса. Для объектов размером менее 32×32 пикселей данный подход достигает 64,2 % средней точности по сравнению с 56,8 % у YOLOv5s, что принципиально для экономики разведывательных миссий, где пропуск цели сопряжён с необходимостью повторного вылета.

Особого внимания заслуживает рассмотрение перспектив отечественного отраслевого развития. Согласно данным CNews, общее финансирование национального проекта БАС составляет 898,4 млрд рублей за период 2024–2030 годов, из которых 696,9 млрд приходится на федеральный бюджет.⁸ Федеральный проект «Разработка, стандартизация и серийное производство БАС и комплектующих» предусматривает ежегодное финансирование в размере 7,7 млрд рублей.⁹ Данные обстоятельства создают предпосылки для масштабного развёртывания бортовых интеллектуальных систем, экономическая обоснованность которых требует тщательного технико-экономического анализа.

Результаты систематизации подходов к экономической оценке архитектур позволяют перейти к формулированию авторской матрицы экономико-технологического выбора, представленной в таблице 3.

Данные таблицы 3 позволяют сделать вывод о том, что свёрточные архитектуры семейства YOLO представляют оптимальный выбор для массовых серийных платформ тактической разведки, где приоритетом выступает минимизация стоимости единицы и энергопотребления, а требования к точности распознавания малоразмерных объектов являются умеренными [10]. Трансформерные архитектуры экономически обоснованы для специализированных

⁸ CNews. Как в России потратят 900 млрд руб. на развитие беспилотников. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: https://www.cnews.ru/articles/2024-12-17_kak_v_rossii_potratyat_900_mlrd_rub (дата обращения 08.03.2026).

⁹ ТАСС. Финансирование нацпроекта по беспилотникам в 2024 году составит 45,5 млрд рублей. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://tass.ru/ekonomika/18856929> (дата обращения 08.03.2026).

платформ стратегической разведки, где стоимость пропуска цели многократно превышает стоимость вычислительного оборудования. Гибридные подходы формируют наиболее перспективное направление для среднего ценового сегмента.

Таблица 3

Матрица экономико-технологического выбора архитектуры нейронной сети для бортовых разведывательных платформ

Критерий выбора	CNN (YOLO-семейство)	Трансформер (ViT)	Гибридная архитектура (CNN+ViT)
Совокупная стоимость вычислительной платформы	Низкая (от 99 USD)	Высокая (от 399 USD)	Средняя (от 199 USD)
Энергоёмкость инференса на кадр	0,12–0,3 Дж	0,4–1,2 Дж	0,2–0,5 Дж
Точность на малоразмерных объектах (AP)	56–59 %	64–68 %	62–66 %
Скорость инференса на периферийном устройстве	30–60 FPS	15–30 FPS	25–42 FPS
Масштабируемость серийного производства	Высокая	Низкая	Средняя
Требования к обучающей выборке	Умеренные	Высокие	Умеренные

Составлено авторами

В свою очередь, анализ тенденций аппаратного обеспечения демонстрирует поступательное улучшение параметров периферийных вычислительных платформ. NVIDIA анонсировала платформу Jetson T4000, обеспечивающую до 1200 FP4 TFLOPS вычислительной мощности для задач искусственного интеллекта с 64 Гб памяти, что представляет двукратный прирост производительности по сравнению с предыдущим поколением Jetson AGX Orin.¹⁰ Данная тенденция свидетельствует о том, что экономический барьер развёртывания трансформерных архитектур на бортовых платформах последовательно снижается.

Необходимо подчеркнуть, что в российских условиях проблематика выбора аппаратной платформы усугубляется ограничениями доступа к передовым зарубежным решениям. Обновлённая Национальная стратегия развития ИИ прямо указывает на ограничение доступа к технологиям искусственного интеллекта в связи с недобросовестной конкуренцией со стороны недружественных государств¹¹. Данное обстоятельство существенно повышает значимость экономического обоснования архитектурных решений, минимизирующих зависимость от высокопроизводительных импортных вычислительных платформ.

Для систематизации выявленных закономерностей с позиции применимости в различных сценариях бортовой разведки представлена таблица 4.

Таблица 4

Рекомендуемые архитектуры нейронных сетей для различных сценариев бортовой разведки с учётом экономических ограничений

Сценарий применения	Рекомендуемая архитектура	Обоснование экономической целесообразности
Массовая тактическая разведка (малые БПЛА до 5 кг)	YOLOv11n/YOLO26n на Jetson Orin Nano	Минимальные стоимость, масса и энергопотребление, допустимая точность для типовых задач
Оперативная разведка (средние БПЛА 5–25 кг)	Гибридная CNN-Transformer на Jetson Orin NX	Оптимальный баланс стоимости, точности на малых объектах и скорости инференса
Стратегическая разведка (крупные БПЛА свыше 25 кг)	Полноразмерный ViT с прунингом на Jetson AGX Orin/T4000	Максимальная точность оправдана высокой стоимостью разведывательной миссии

Составлено авторами на основе анализа материалов¹⁰

¹⁰ NVIDIA Technical Blog. Accelerate AI Inference for Edge and Robotics with NVIDIA Jetson T4000. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://developer.nvidia.com/blog/accelerate-ai-inference-for-edge-and-robotics-with-nvidia-jetson-t4000-and-nvidia-jetpack-7-1> (дата обращения 08.03.2026).

¹¹ ComNews. Президент РФ обновил стратегию развития искусственного интеллекта. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://www.comnews.ru/content/231631/2024-02-19/2024-w08/1008/prezident-rf-obnovil-strategiyu-razvitiya-iskusstvennogo-intellekta> (дата обращения 08.03.2026).

Результаты, отражённые в таблице 4, позволяют установить, что экономически обоснованный выбор архитектуры определяется не абстрактным превосходством одного класса нейронных сетей над другим, а конкретным сценарием применения, в рамках которого различные экономические параметры приобретают различный удельный вес. Для массовых тактических платформ стоимость единицы бортового вычислительного модуля и энергопотребление на один кадр являются определяющими факторами, тогда как для стратегических систем ключевым экономическим параметром выступает стоимость пропущенного объекта разведки.

Подводя итог анализу, необходимо отметить, что выявленные закономерности свидетельствуют о формировании нового отраслевого феномена, который можно охарактеризовать как конвергенцию архитектурных парадигм в бортовом машинном зрении. Границы между свёрточными и трансформерными подходами размываются в пользу гибридных конструкций, оптимизированных для конкретных экономических и ресурсных ограничений платформы. Данная тенденция согласуется с общим вектором развития отечественной отрасли БАС, ориентированной на создание дифференцированной линейки беспилотных комплексов различных классов.

Выводы

Систематизация эволюции архитектурных подходов к построению нейросетевых модулей детекции объектов для бортовых платформ разведки позволила установить, что развитие свёрточных архитектур от YOLOv5 (2020) до YOLO26 (2025) привело к устранению ряда вычислительно затратных компонентов, включая механизм Non-Maximum Suppression, что обеспечило существенное ускорение инференса на центральных процессорах при сохранении конкурентоспособной точности. Параллельно визуальные трансформеры продемонстрировали фундаментальное преимущество в захвате дальних пространственных зависимостей, критически важных для распознавания малоразмерных объектов в аэрофотосъёмке, однако квадратичная вычислительная сложность механизма самовнимания ограничивает их экономическую доступность для массовых бортовых платформ. Выявлена устойчивая тенденция к формированию гибридных архитектур, сочетающих свёрточные блоки локальной экстракции признаков с трансформерными модулями глобального контекста, что позволяет достигать компромисса между точностью и ресурсоёмкостью.

Сравнительный технико-экономический анализ ресурсоёмкости показал, что свёрточные архитектуры семейства YOLO требуют в 4–9 раз меньше параметров по сравнению с трансформерными моделями, что обеспечивает скорость инференса 30–60 FPS при энергопотреблении 0,12–0,3 Дж на кадр, тогда как трансформерные архитектуры достигают 15–30 FPS при 0,4–1,2 Дж, но обеспечивают прирост средней точности на малоразмерных объектах до 7–12 процентных пунктов. Гибридные архитектуры занимают промежуточное положение, достигая 25–42 FPS при 0,2–0,5 Дж и сохраняя до 94,3 % относительной точности полноразмерных трансформеров при 68 % снижении вычислительных операций. Данные результаты позволяют количественно оценить экономические компромиссы при выборе архитектуры для различных классов бортовых платформ.

Разработанная авторская матрица экономико-технологического выбора интегрирует шесть ключевых параметров и обосновывает дифференцированный подход к выбору архитектуры в зависимости от класса беспилотной платформы и экономического профиля разведывательной миссии. Для массовых тактических платформ (малые БПЛА до 5 кг) экономически оптимальными являются свёрточные детекторы семейства YOLO, для оперативной разведки (средние БПЛА 5–25 кг) рекомендуются гибридные архитектуры CNN-Transformer, а для стратегических систем (крупные БПЛА свыше 25 кг) обоснованно применение полноразмерных визуальных трансформеров с оптимизацией через прунинг и квантование.

Полученные результаты обладают практической значимостью для обоснования инвестиционных решений в рамках национального проекта «Беспилотные авиационные системы» с объёмом федерального финансирования 696 млрд рублей до 2030 года, а также для формирования стратегий импортозамещения в сегменте бортового интеллектуального оборудования в условиях ограниченного доступа к передовым зарубежным вычислительным платформам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cordova-Cardenas, R. Edge AI in Practice: A Survey and Deployment Framework for Neural Networks on Embedded Systems / R. Cordova-Cardenas, D. Amor, Á. Gutiérrez — DOI: 10.3390/electronics14244877. // Electronics. — 2025. — Т. 14, № 24. — С. 4877 — EDN: XEFDTJ.
2. Sapkota, R. Ultralytics YOLO evolution: An overview of YOLO26, YOLO11, YOLOv8 and YOLOv5 object detectors for computer vision and pattern recognition / R. Sapkota, M. Karkee // arXiv preprint arXiv:2510.09653. — 2025. — URL: <https://arxiv.org/html/2510.09653v2>.
3. Minott, D. Benchmarking edge AI platforms: performance analysis of Nvidia Jetson and raspberry pi 5 with coral TPU / D. Minott, S. Siddiqui, R. J. Haddad // SoutheastCon 2025. — IEEE, 2025. — С. 1384–1389.
4. Ning, Z. Power consumption benchmark for embedded AI inference / Z. Ning et al. // Proceedings of the International Conferences on Applied Computing 2024 and WWW/Internet 2024. — 2024. — URL: https://www.researchgate.net/publication/385300510_Power_Consumption_Benchmark_for_Embedded_AI_Inference.
5. Zhu, W. Real-time object detection for unmanned aerial vehicles based on vision transformer and edge computing / W. Zhu, K. Chen // Scientific Reports. — 2026. — URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-026-37938-5>.
6. Zhu, H. Enhanced YOLOv11n for small object detection in UAV imagery: higher accuracy with fewer parameters / H. Zhu, X. Xie // Scientific Reports. — 2026. — URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-026-35301-2>.
7. Ma, F. A lightweight UAV target detection algorithm based on improved YOLOv8s model / F. Ma et al. // Scientific Reports. — 2025. — Т. 15, № 1. — С. 15352.
8. Wang, X. Intelligent data analysis in edge computing with large language models: applications, challenges, and future directions / X. Wang, Zh. Xu, X. Sui — DOI: 10.3389/fcomp.2025.1538277. // Frontiers in Computer Science. — 2025. — Т. 7. — С. 1538277 — EDN: JHQCZH.
9. Zhang, R. Optimization Methods, Challenges, and Opportunities for Edge Inference: A Comprehensive Survey / R. Zhang, H. Jiang, W. Wang, J. Liu — DOI: 10.3390/electronics14071345. // Electronics. — 2025. — Т. 14, №. 7. — С. 1345 — EDN: XLHYEA.
10. Jiang, P. A Review of Yolo Algorithm Developments / P. Jiang, D. Ergu, F. Liu et al. — DOI: 10.1016/j.procs.2022.01.135. // Procedia Computer Science. — 2022. — Т. 199. — С. 1066–1073 — EDN: BZCPND.

Tsygantsov Artyom Sergeevich

Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia
National Association of Economic Security Experts
E-mail: 220794@edu.fa.ru

Litvin Yuri Ivanovich

Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia
Military Training Center
E-mail: yilitvin@fa.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=805339

Shishkin Kirill Vladimirovich

Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia
HaiTek Group of Companies, Moscow, Russia
E-mail: 245242@edu.fa.ru

Petrov Maksim Sergeevich

Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia
Concern Automatika JSC, Moscow, Russia
E-mail: 242166@edu.fa.ru

Convolutional and transformer neural networks in airborne intelligence. Cost-efficiency and resource intensity

Abstract. The dynamic development of industries related to unmanned aerial systems (UAS) is driving increased attention to the economic performance of machine vision algorithms deployed onboard aircraft. This study examines the cost-effectiveness and resource intensity of convolutional (CNN) and transformer (ViT) neural networks used for airborne intelligence tasks. This work utilizes methods of comparative technical and economic analysis, systematization of scientific publications for the period 2023–2026, and a regulatory analysis of current Russian legislation. A study of the evolution of architectural solutions revealed a consistent trend toward the development of hybrid models combining convolutional operations with self-attention mechanisms, aimed at optimizing the ratio of computational costs and object recognition accuracy under conditions of limited onboard resources. The obtained results indicate that the choice of neural network module architecture for airborne reconnaissance platforms cannot be determined solely by detection accuracy metrics, but rather requires a comprehensive assessment of the cost of ownership of the computing infrastructure, energy consumption per inference frame, and the scalability of the solution within serial production. The scientific novelty lies in the development of a proprietary matrix for the economic and technological selection of neural network architecture for airborne reconnaissance platforms, taking into account the total lifecycle cost and industry resource intensity. The practical significance of the results lies in the potential application in substantiating investment decisions within the framework of the national project «Unmanned Aircraft Systems» and in formulating import substitution strategies in the onboard intelligent equipment segment.

Keywords: convolutional neural networks; transformer neural networks; airborne reconnaissance; unmanned aircraft systems; cost-effectiveness; resource intensity; edge inference; model compression; total cost of ownership