НЕЗАВИСИМОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ · ПУБЛИЧНАЯ ВЕРСИЯ

2026 · 11

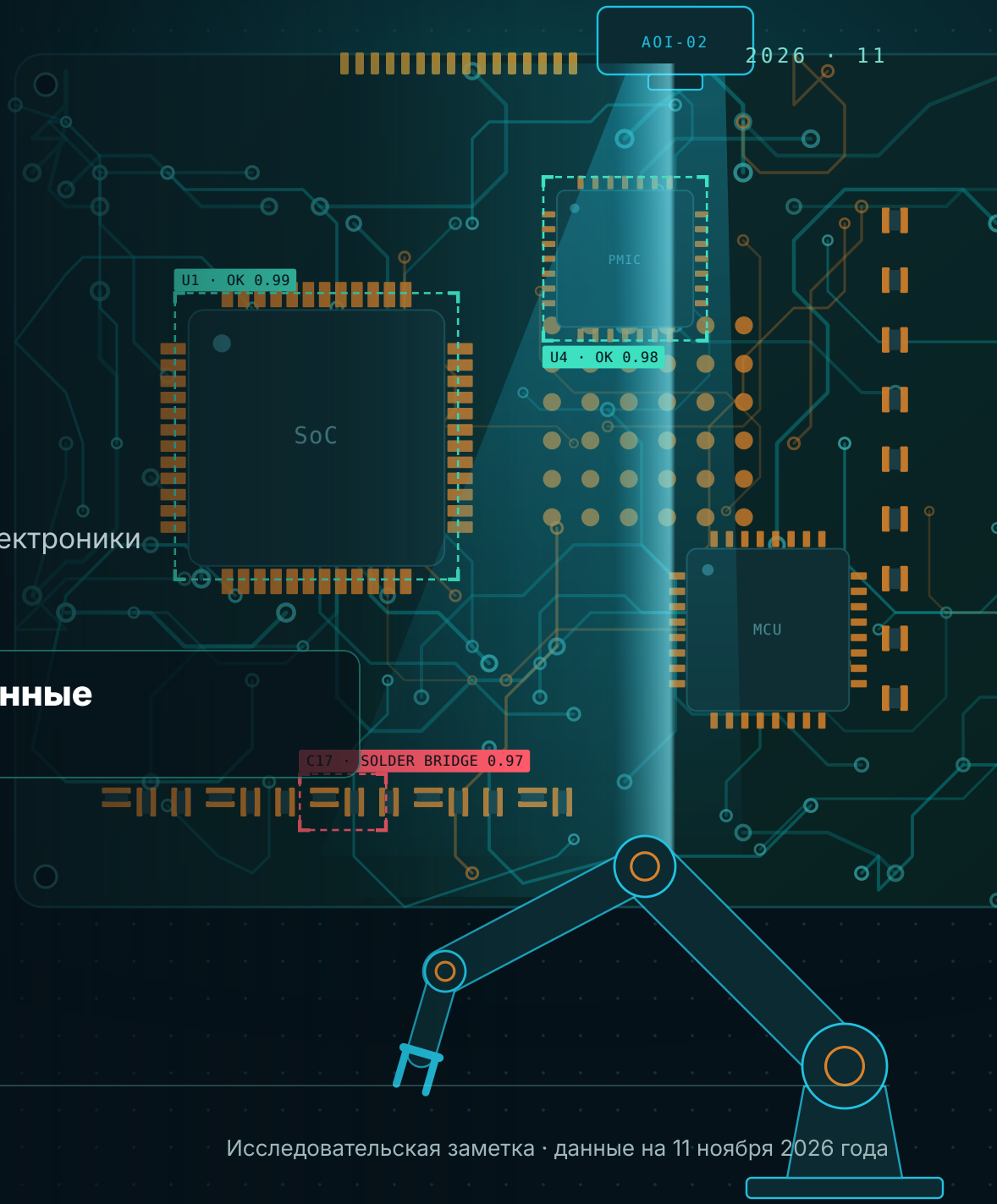
ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОНИКИ · ИИ-ИНСПЕКЦИЯ × РОБОТОТЕХНИКА

ИИ на линии SMT:

что окупается в 2026

Визуальный контроль на основе ИИ и роботы-манипуляторы на заводах электроники

Материковый Китай · Тайвань · Юго-Восточная Азия · США



КЛЮЧЕВОЙ ВЫВОД

AI-перепроверка стоит того, но узко. Воплощённые манипуляторы могут подождать.

Tan Shuai
tanshuai.comi@tanshuai.com

Исследовательская заметка · данные на 11 ноября 2026 года

Стоит делать, но узко, сейчас и с партнёрами

КЛЮЧЕВОЙ ВЫВОД

Что зрело в 2026 и за что заводы будут платить, — это AI-перепроверка и нишевая инспекция на изображениях AOI плюс программируемое обслуживание станков роботами, а не «большая модель, смотрящая на платы, плюс воплощённые роботы, которые их разбирают».

0.46–0.65 yr

Окупаемость AI-перепроверки в США, на Тайване и в Шэньчжэне при 50 тыс. RMB на линию

≥95% · <20 PPM

Внутренняя AI-перепроверка ведущего EMS: планка для продаж EMS первого эшелона

100–700 RMB M

Обслуживаемый рынок сторонней модернизации в материковом Китае, разово, окно ≈5 лет

0 scores

Баллы флагманов ноября 2026 на промышленных дефектах

1.1–1.5 yr

Окупаемость ячейки обслуживания станков коботом, две смены

0.003–0.14 FTE

Труд, который экономит манипулятор для отбора за смену: он никогда не окупается

Источник: краткое содержание отчёта и главы 4–5; цифры окупаемости и рынка — оценки автора.

Шесть вопросов, шесть ответов

① Что запускают заводы

3D SPI, AOI до и после оплавления, выборочный рентген, ICT/FCT. За каждым AOI сидит человек на перепроверке; такт ≈13–22 с на плату.

② Насколько далеко заходит технология

Инспекция индустриального уровня — это «детектор + AI-перепроверка + несколько человек»; ноль людей не достигается ни за какие деньги. Материковый Китай: отечественные модели; Тайвань: решает заказчик; США: пошлины и сертификация.

③ Локально и изолированно

Практично; ограничения процедурные. Безвентиляторный бокс ≤100 Вт у линии, серверы в серверной, 8-bit по умолчанию.

④ Учитель и ученик

Инспекция: фронтир-модели предразмечают, люди выносят решения, золотой набор — ворота. Манипуляторы: учителя — по-прежнему человеческие демонстрации и симуляция.

⑤ Затраты и окупаемость

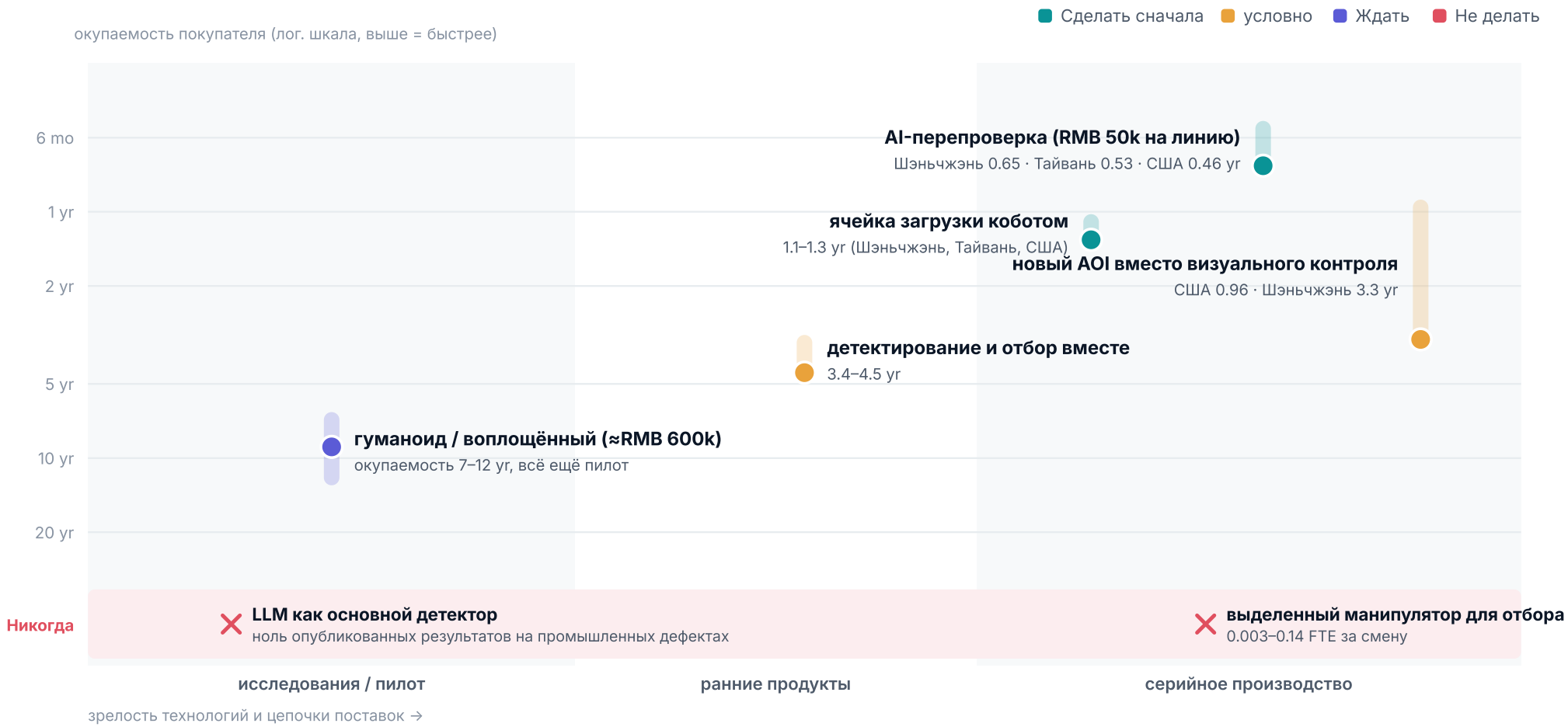
AI-перепроверка — в пределах года в США, на Тайване и в Шэньчжэне; обслуживание коботом — 1.1–1.5 года; Юго-Восточная Азия — 2–6 лет; манипулятор для отбора — никогда.

⑥ Сейчас или подождать

Реальный спрос, переполненное предложение; OEM-ИИ оставляет окно модернизации ≈5 лет. Инспекция — сейчас, узко; воплощённый ИИ — после данных 2027–28.

Источник: краткое содержание отчёта.

Где ИИ вписывается в заводской цех сегодня



Источник: Окупаемость по модели автора (глава 4); ось зрелости — оценка автора.

Люди сидят за AOI. Именно туда входит ИИ

Серийная SMT-линия

такт ≈13–22 s на плату · 3–5 AOI на линию



Источник: Публичная отчётность и материалы вендоров (Huaqin, DBG, Sinic-Tek и др.); сводка автора.

Около 97–99% срабатываний AOI — ложные

на каждые 100 срабатываний AOI

≈97–99 — ложные: плата на самом деле исправна

истинные дефекты 1–3

Сегодня: люди проверяют каждое срабатывание

42–55 s каждый

≈448 ложных срабатываний за смену на загруженной линии

→ 5.2–6.8 h за смену ≈ 1 штатный рецензент

штат в кейсе: 2 на смену

AI-перепроверка: снять ложные, остальное — людям

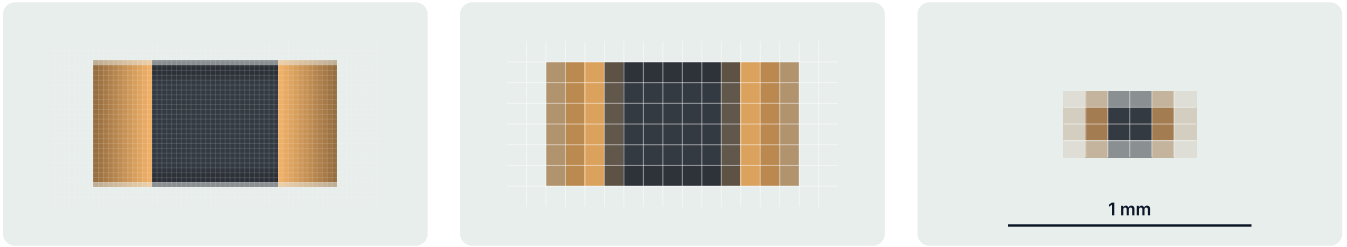
ложные срабатывания или часы перепроверки сокращены на 60–90% (заявление вендоров)

бенчмарк крупных EMS: охват ≥95% отмеченных компонентов, пропуски <20 PPM, ручная перепроверка снижена ≥85%

при сбое — людям, линия не останавливается

Источник: Кейс Siemens, iFactory (заявление вендора), годовой отчёт DBG 2025; часы перепроверки оценены автором.

Универсальная камера — это не AOI



AOI: 8–20 µm на пиксель
0402 ≈ 100×50 px

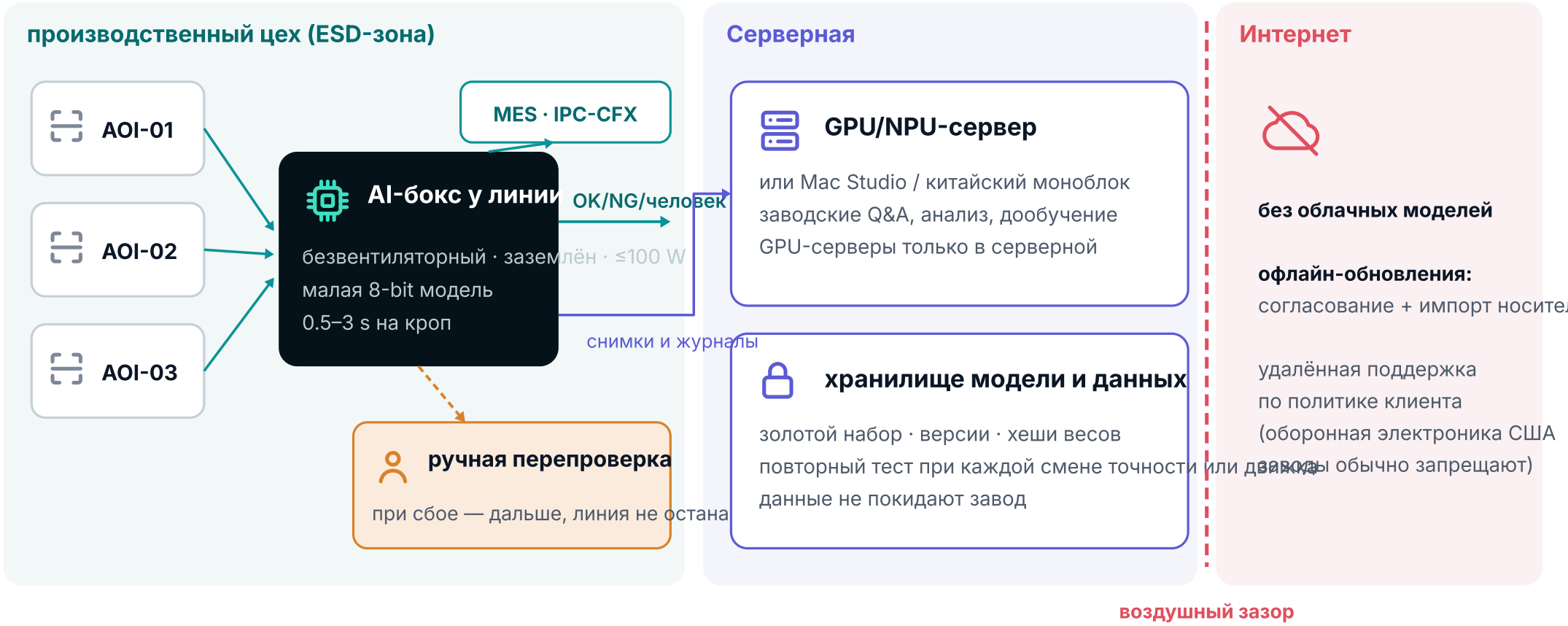
камера 4K на панель 300 mm: ≈78 µm/px
0402 сжимается до ≈13×6 px: хватает лишь на наличие и грубое смещение

та же камера на 01005
≈5×3 px: фактически невидимо

- **AOI:** 8–20 µm на пиксель, разноракурсная разноцветная подсветка и структурированный свет
- **4K на панель 300 mm:** ≈78 µm на пиксель; 0402 — это ≈13×6 пикселей, достаточно для наличия, но не для паяных соединений
- **01005:** ≈5×3 пикселей, фактически невидим
- **Итак:** ИИ работает на изображениях самого AOI; он не заменяет оптику

Источник: Circuits Assembly; расчёт автора для панели 300 mm и сенсора 4K. Сетки пикселей иллюстративны.

Изолированное развёртывание: бокс решает, серверная отвечает



Источник: Сводка автора (глава 2).

Зоны чистоты и ESD определяют, где стоят вычисления; ограничения по скорости зависят от применения

требования чистоты →

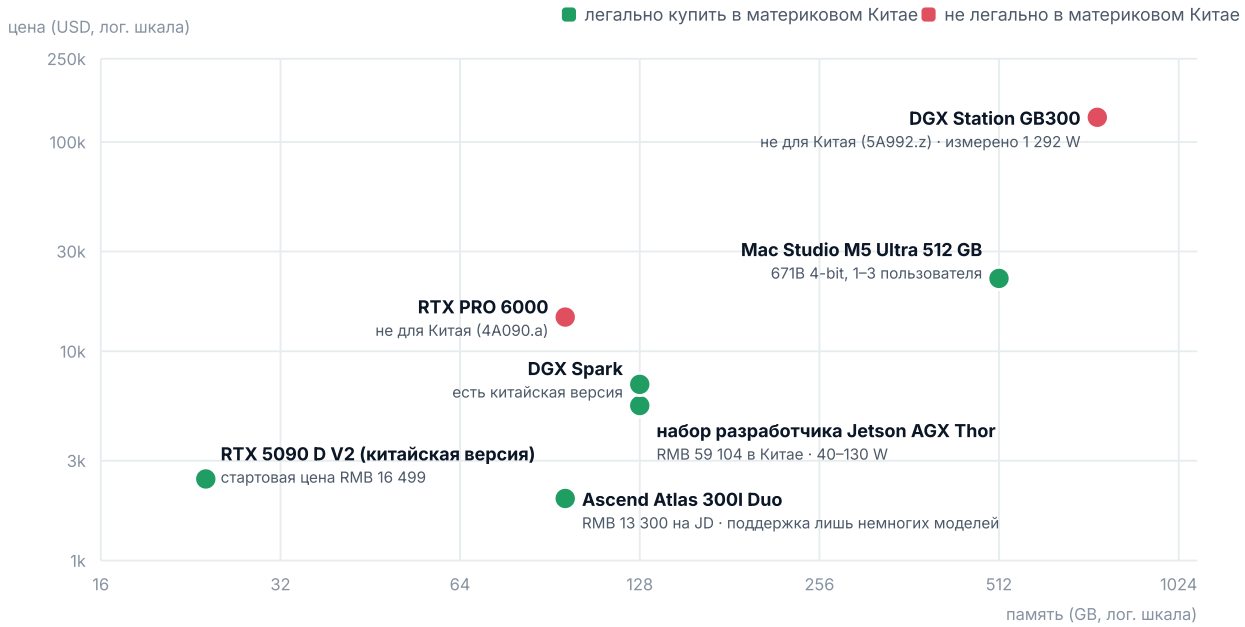
обычный цех SMT/PCBA	чистая комната ISO 7–8	мини-среда ISO 5–6	фаб, ISO 5 или чище
ESD-зона (≈ISO 8) **влажность 40–60%**	медицина, камерные модули, ЭТ **чистая комната + ESD**	голый кристалл, разварка, оптика **мини-среда**	SEMI E78 ESD · E187/E188… **фаб-специфичные планы**
вычисления у линии безвентиляторный заземлённый металлический блок рядом с AOI или местом перепроверки	**вычисления у линии** безвентиляторный, герметичный IP65/66, легко моется; запросите данные ISO 14644-14	**вычисления у линии** только камеры и свет; вычислительный блок снаружи	**вычисления у линии** только контроллеры, интегрированные в инструмент и сертифицированные фабом
GPU/NPU-сервер серверная или ИТ-стойка с кондиционированием	**GPU/NPU-сервер** снаружи чистой комнаты, сеть заходит внутрь	**GPU/NPU-сервер** Серверная	**GPU/NPU-сервер** стойки с жидкостным охлаждением в субфабе или ЦОД



Ключевой момент Обычный цех SMT — это ESD-защищённая зона, а не классифицированная чистая комната: безвентиляторный бокс в заземлённом металлическом корпусе стоит у AOI или места перепроверки, а GPU-серверы никогда не ставятся на линию.

Источник: ANSI/ESD S20.20, IEC 61340-5-1, ISO 14644, стандарты SEMI и материалы вендоров; сводка автора. Сводка автора (главы 1–2).

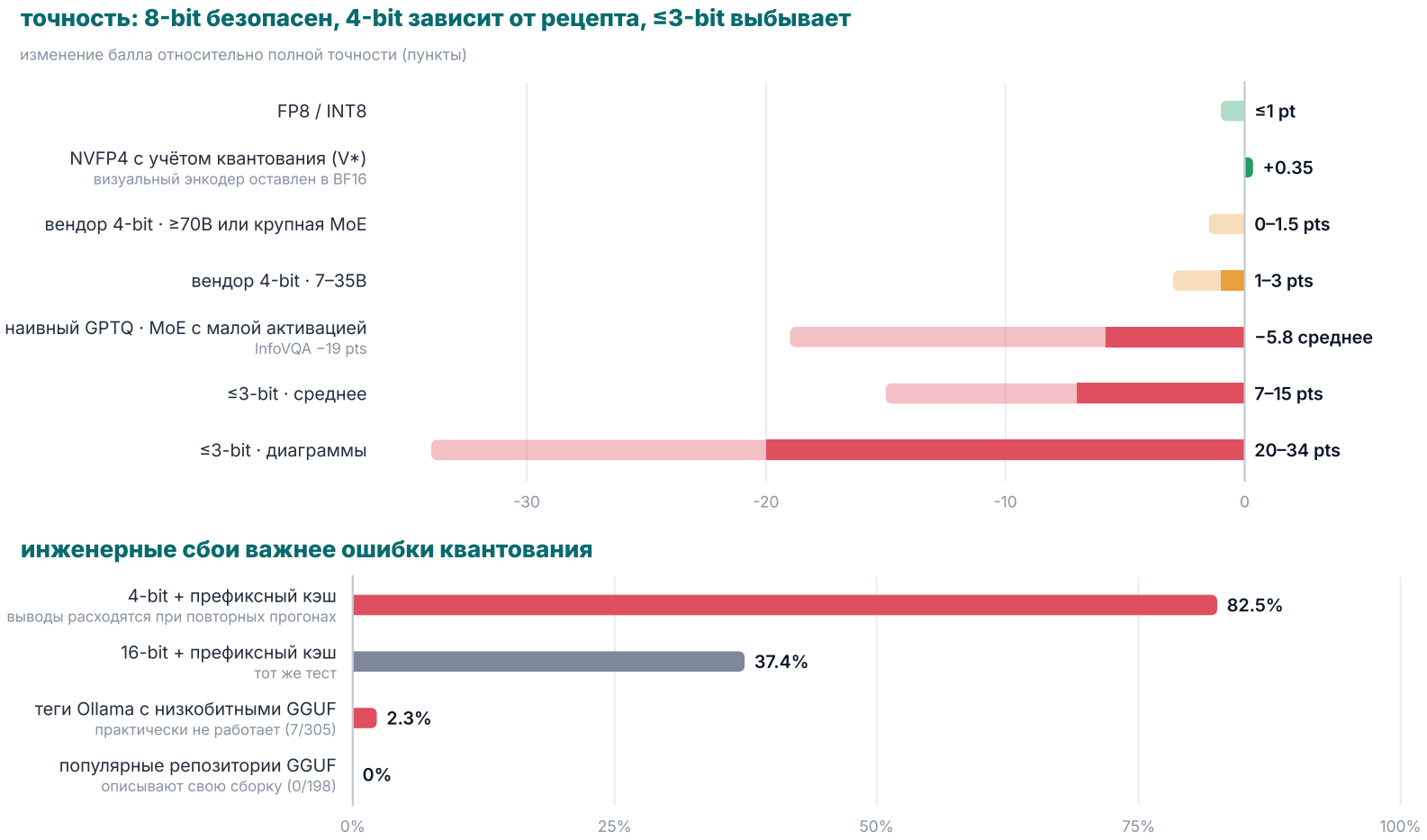
Экспортные правила определяют короткий список оборудования раньше, чем бенчмарки



- **Jetson Thor:** 128 GB, 40–130 Вт; модели зрения 2–8B на кропах AOI, VLA класса 3B в реальном времени; 59 104 RMB в Китае
- **Mac Studio 512 GB:** DeepSeek 671B в 4-bit для 1–3 пользователей
- **DGX Station:** 5A992.z, не для материкового Китая; модель 743B даёт 32 пользователям ≈4 токена/с каждому
- **Отечественные ускорители:** два восьмикарточных сервера Ascend для полноразмерных многопользовательских Q&A

Источник: Экспортные классификации NVIDIA, Apple, RS China, JD.com и обзорные цены (ноябрь 2026). StorageReview (авг и окт 2026); ServeTheHome. Независимые тесты из одного источника.

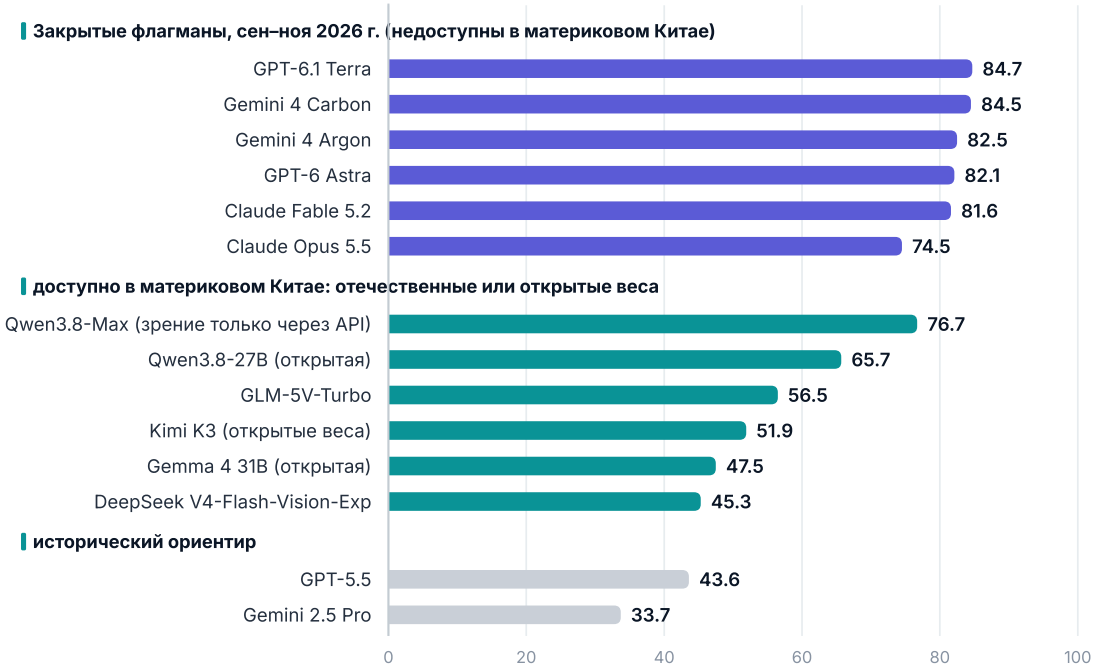
Квантование: 8-bit безопасен, 4-bit зависит от рецепта, 3-bit и ниже — вне игры



Источник: Карта модели NVIDIA Nemotron, VLMQ, VEQ, arXiv 2609.05881, 2610.19498, 2609.04748 и др.

Универсальное зрение удвоилось за поколение; баллы на промышленных дефектах отсутствуют

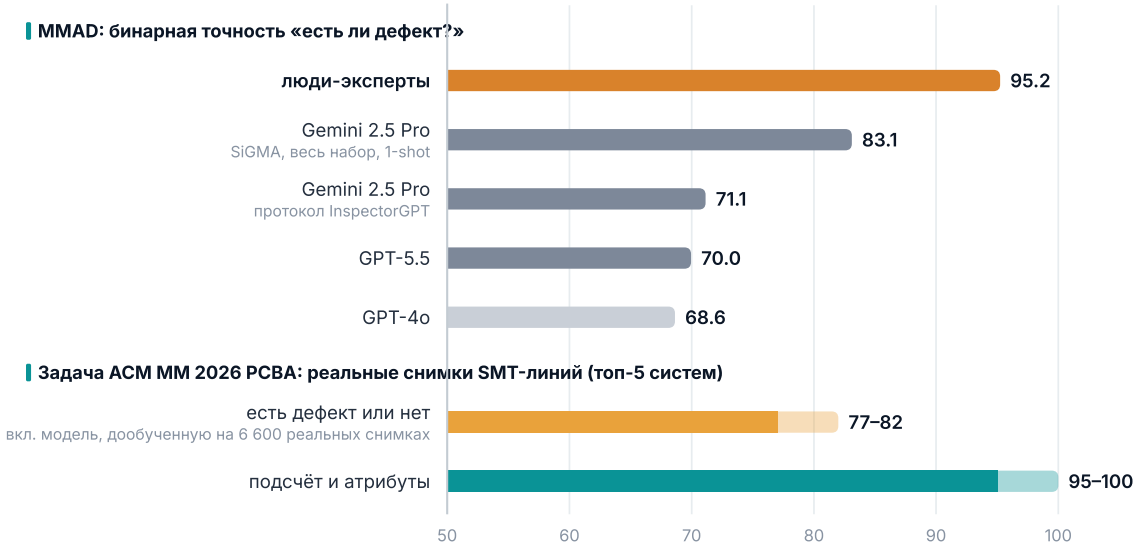
Roboflow универсальное детектирование mAP@50



бенчмарки промышленных дефектов (MMAD, MVTec AD 2, VisA, Real-IAD, UniPCB): ноль опубликованных результатов у ф

универсальные баллы детектирования удвоились за поколение, но это не суждение о дефектах; тестируйте на своём золотом наборе

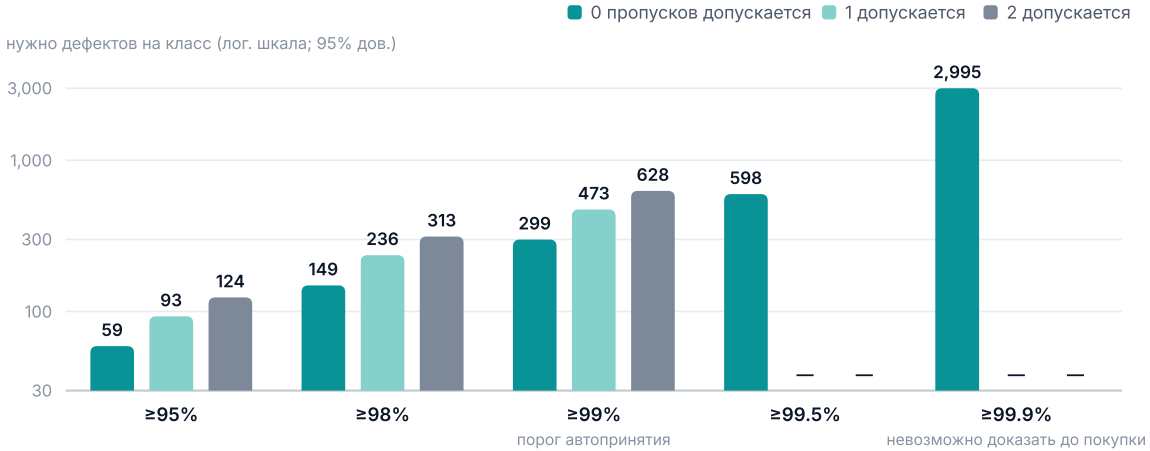
точность или балл (%)



Источник: Roboflow Vision Evals; заметки о релизах моделей; страницы бенчмарков MMAD, MVTec AD 2 и др. (на 11 ноя 2026). MMAD; SiGMA; InspectorGPT; задача ACM MM 2026 PCBA.

Фронтир-модели предразмечают, люди выносят решения, золотой набор — ворота





Ключевой момент Автоматически принимать метки учителя только для класса с нулём пропусков на ≥299 золотых дефектах (99% recall при 95% уверенности); критическим классам, таким как замыкания, отсутствующие компоненты и полярность, нужно больше.

Источник: Сводка автора (глава 3); стоимости и объёмы выборок — оценки. Точные биномиальные доверительные интервалы (95%).

Роботы-ученики: почти производственный уровень только на структурированных станциях

процент успеха задачи

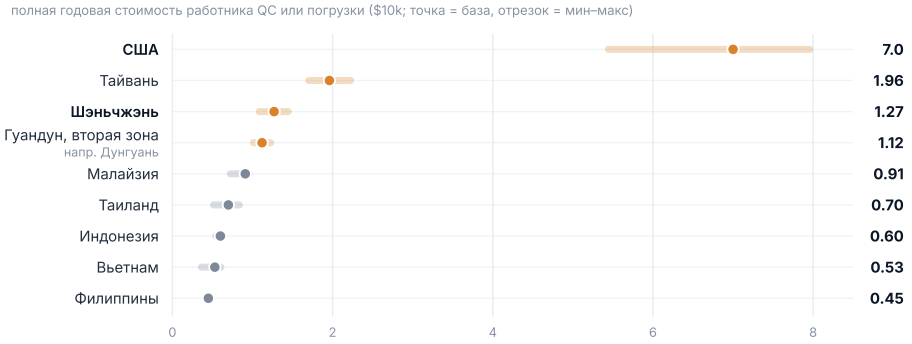


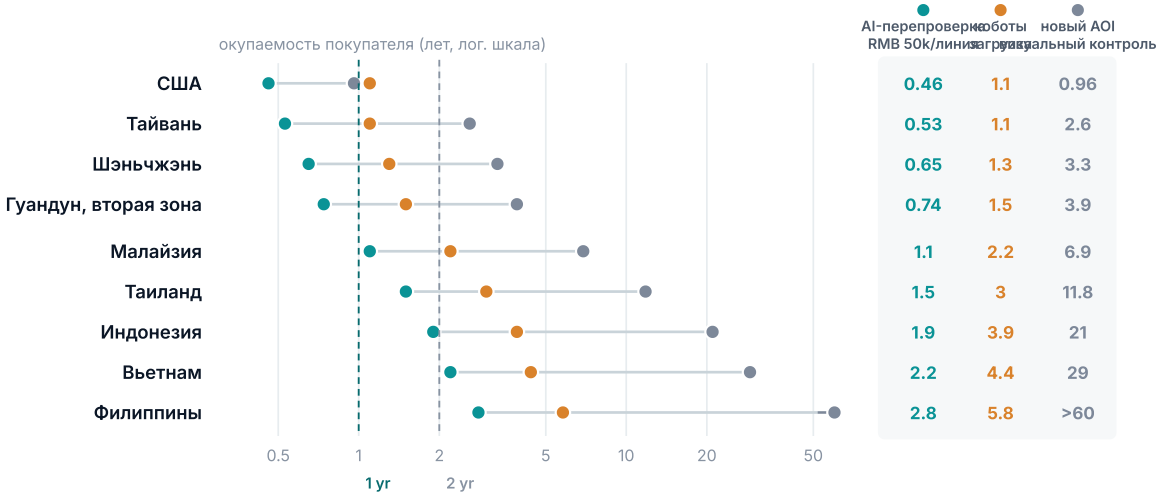
задержка инференса на чанк действий или цикл управления (лог. шкала)



Источник: Статьи и материалы вендоров из главы 3; часть цифр — заявления вендоров. Документация и форум D-Robotics (цифры вендора); порты сообщества GitHub; исследования Anthropic.

AI-перепроверка окупается за месяцы; обслуживание станков — примерно за год



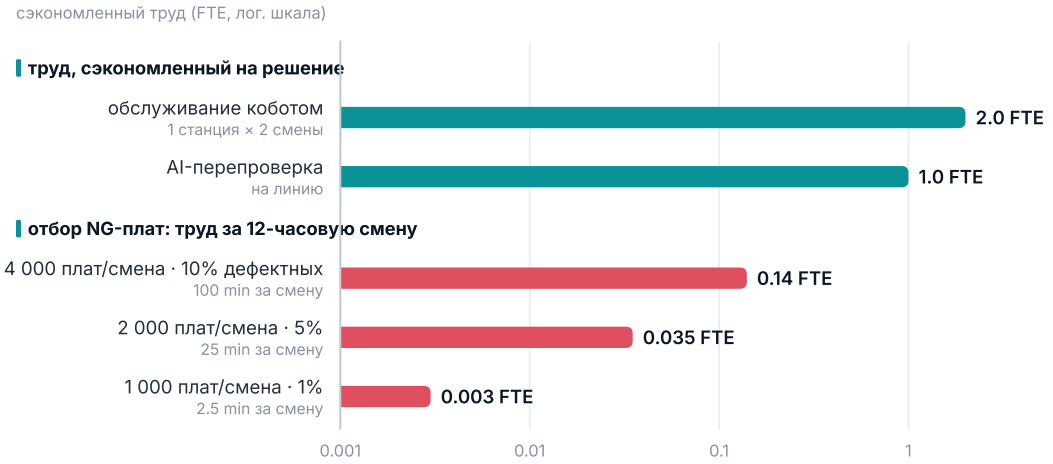


манипулятор только для отбора NG-плат никогда не окупается нигде
при выходе годных выше 90% отбор занимает лишь 0.003–0.14 FTE за смену

Ключевой момент При 50 000 RMB на линию AI-перепроверка окупается за 0.46 года в США, 0.53 на Тайване, 0.65 в Шэньчжэне и 2.2 во Вьетнаме; ячейка обслуживания коботом в две смены — за 1.1–1.5 года [estimates].

Источник: Официальные ориентиры зарплат Шэньчжэня, Минтруд Тайваня, JETRO, BLS; оценки автора. Модель автора: бокс AI-перепроверки RMB 50k на линию; ячейка обслуживания коботом RMB 200k или $140k, две смены.

Манипулятор для отбора никогда не окупается; место производства манипулятора меняет его пошлину в США





Ключевой момент При выходе годных с первого прохода выше 90% отбор NG-плат занимает 0.003–0.14 человека за смену, поэтому NG-отводчик или буфер справляются; манипулятор материкового производства также платит около 40% совокупной пошлины США.

Источник: Оценки автора. Гармонизированный тарифный список USITC, глава 99; Federal Register; USTR (ноябрь 2026).

Реально, но мало: 16 000 обслуживаемых линий, ≈320 млн RMB разово, окно в пять лет

SMT-линии Китая

40 000 строк

35k–46k

× 80% × 50%

без ИИ пока: 75–85%
достижимо: 40–60%

обслуживаемые

16 000 строк

10.5k–23.5k

× RMB 20k

RMB 10–30k разово

разовый рынок установленной базы

RMB 320M

RMB 105–705M

÷ ≈5 лет

сжимается на 8–12%/yr

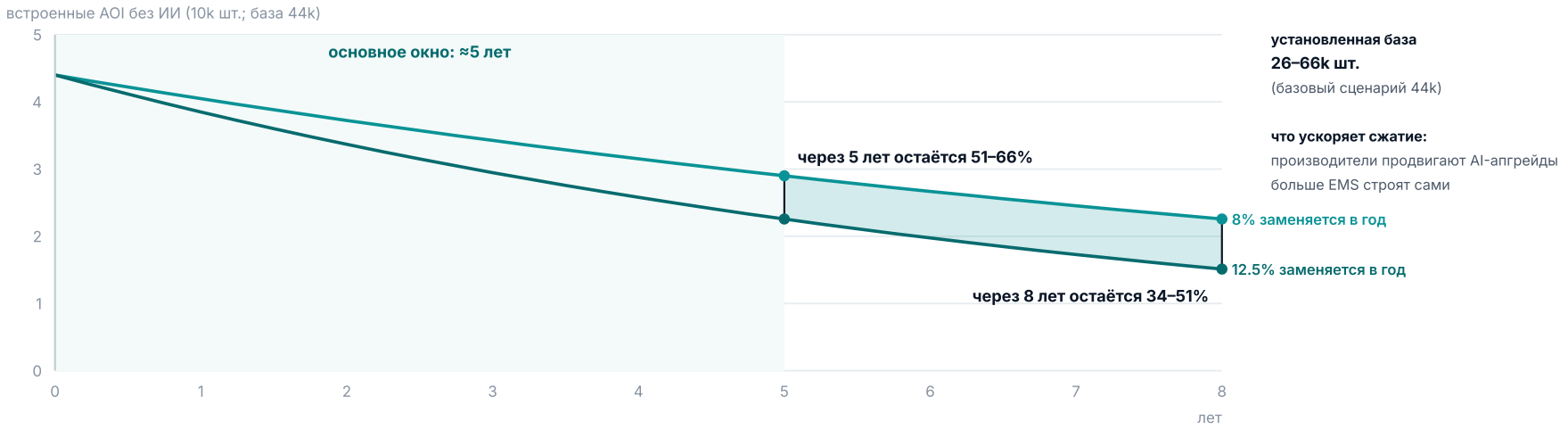
окно 5 лет

RMB 64M/yr

RMB 21–141M

новичок за 3 года берёт 2–5% обслуживаемых линий: ≈320–800 линий, ≈RMB 2–5M в год

как подписка (RMB 5k на линию в год): RMB 1.6–4M рекуррентно, лишь 0.3–2.3% прогноза IDC по промышленному AI-контролю Китая



Источник: NVR (база 2020); оценки автора. Оценки автора; установленная база и доли не проверялись независимо.

Клин перепроверки окружён; маржа — в продуктном железе

крупные EMS строят сами

DBG (2025): охватывает ≥95% отмеченных компонентов
пропуски <20 PPM, ручная перепроверка −85%
это и есть порог для продажи EMS первого эшелона

AI, встроенный в AOI производителями

Jutze AI 3D AOI в производстве, «устраняет ручную перепроверку на инспекции»
ViTrox V510Ai; Sinic-Tek совместно с Tencent
новые машины идут с ИИ; старым нужны апгрейды

сторонняя AI-перепроверка

коробка + ПО, навешиваемые на существующий AOI

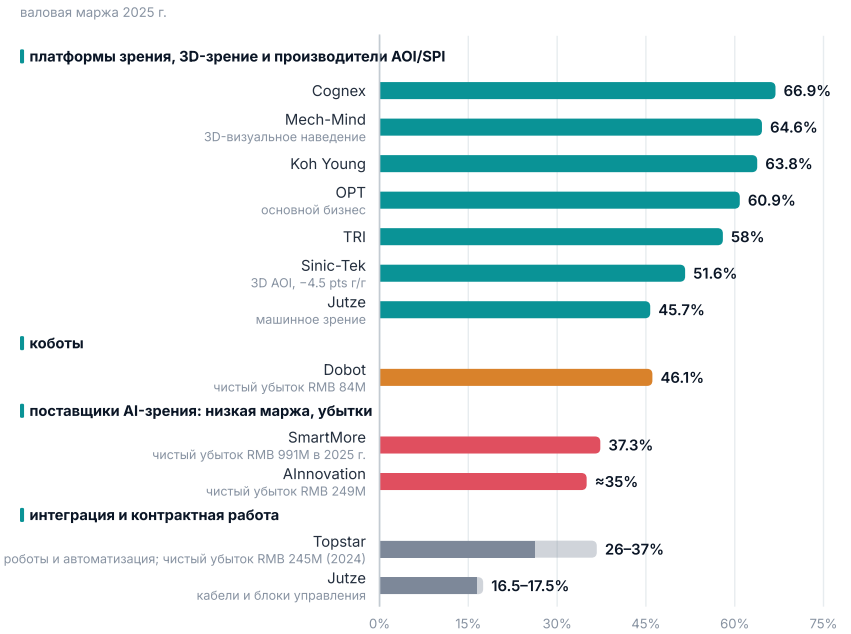
платформенные вендоры

Hikvision Guanlan и SmartMore IndustryGPT продаются
ведущий AI-вендор: выручка 2025 г. RMB 1.086B
чистый убыток RMB 991M: ценовая война

что остаётся третьим сторонам

средние EMS (≈10–40 линий) со старыми или разнородными AOI без AI-апгрейда от OEM

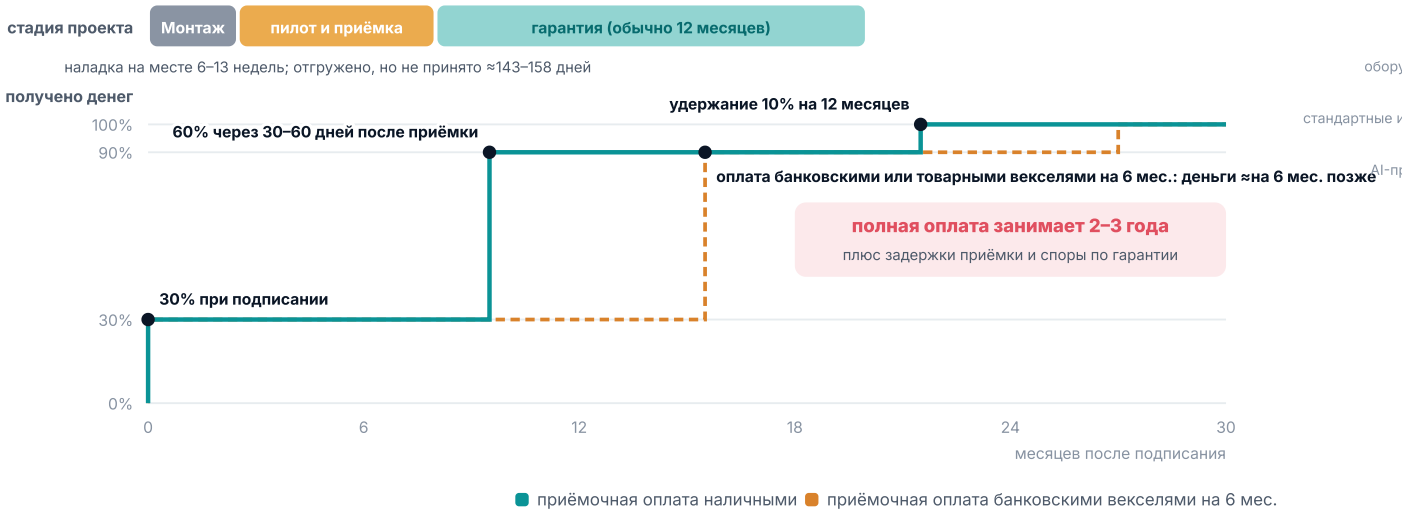
Ниши, слабо покрытые AOI: THT и ручная пайка, конформные покрытия, кабели/разъёмы/FPC, внешний вид и винты

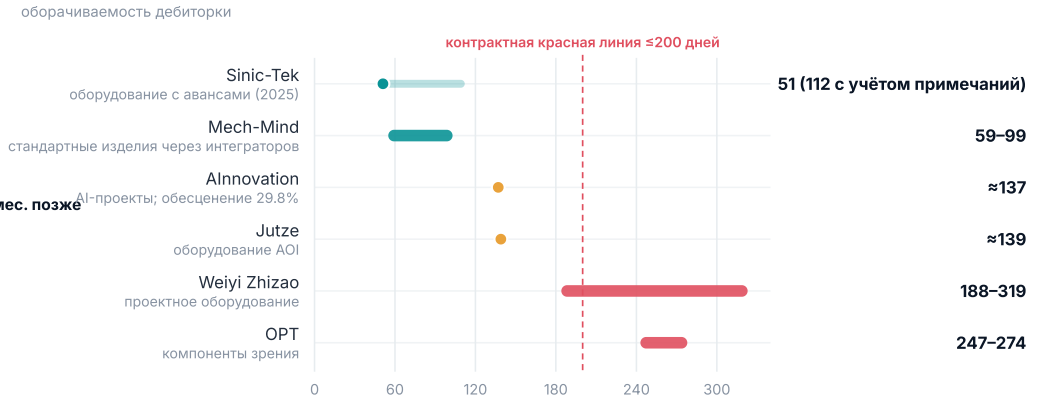


Доказательства Ведущий AI-вендор зрения имел выручку 2025 года 1.086 млрд RMB и чистый убыток 991 млн RMB; выручка 3C ближайшего листингованного аналога упала на 79.9% год к году в январе–мае 2026.

Источник: Годовые отчёты Jutze, Sinic-Tek и DBG; публичные материалы Hikvision и SmartMore; сводка автора. Годовые отчёты или проспекты 2025 г.

Покупатели платят 30/60/10; полная оплата занимает два–три года





Ключевой момент 30% поступает с заказом, 60% примерно через четыре–девять месяцев и последние 10% примерно через 16–21 месяц; от первого пилота у крупного EMS до полной оплаты может пройти два–три года [estimate].

Источник: Ответ Sinic-Tek на запрос, Mech-Mind, GKG, JT и другие отчёты; схема по обычным условиям, сроки оценены. Отчётность компаний; дебиторка (вкл. контрактные активы) ÷ выручка × 365.

Планируйте офлайн, действуйте малыми политиками, сохраняйте движение и безопасность детерминированными

Слой	что делает и насколько далеко заходят доказательства	временной масштаб · кто владеет
Планирование L4	**фронтир-модели (офлайн)** писать или менять программы робота офлайн, переналадка, объяснение сбоев переписывает программы ABB RAPID на 77–99.7%, выдаёт после симуляции контур управления лишь 0.2–0.4 Hz: вне реального времени	**секунды–минуты** модельные гиганты
навыки / политика L3	**ACT, диффузионные политики, малые VLA** структурированные станции с оснасткой 90–99.4% краевые чипы: Jetson Thor, D-Robotics RDK, Ascend, Rockchip	**чанки действий 100–300 ms** чипмейкеры · производители роботов
управление движе L2	**контроллер робота** траектории, серво, силовое управление, проверка столкновений детерминированный код; обученные политики лишь задают цели	**миллисекунды (реальному времени нужно >83 Hz)** производители роботов
Безопасность L1	**безопасный ПЛК, сканеры, ограничения силы и скорости** сертифицировано по ISO 10218-1/-2:2025 и местным нормам никакого ML в функциях безопасности: с 20 янв 2027 г. требуется оценка нотифицированного органа ЕС	**жёсткое реальное время** сертифицированный робот + интегратор

шанс малых фирм — в интеграции и сенсорном железе: встраивать обученное восприятие и малые политики в сертифицированные робоячейки, станция за станцией

	процент успеха	такт	вмешательства / телеуправление	надежность / сбои	серийный прогон
Figure 02 @ BMW	только цель >99%/смен	только цель 84 s	только цель 0/смена	н/д	1 250 h
Agility Digit @ GXO	н/д	н/д	н/д	н/д	100 000 контейнеров
Apptronik Apollo @ Mercedes	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
Agile ONE @ Audi	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
Nucleus (неназванный завод)	н/д	н/д	40% телеуправлени	н/д	≈2 h видео
AgiBot G2 @ Longcheer	99.99%	18–20 s на операцию	н/д	один сбой, 2 min	64+ h
гибридная ячейка Neuromeka	322/324	на 12.8% медленнее	н/д	н/д	324 цикла
π0.6 @ площадка заказчика	—	—	96.4% автономности	н/д	1 смена

* методика не раскрыта

раскрыто (в основном заявления вендоров) · только цели · н/д

чистое замещение труда на робота за смену



Источник: сводка автора (главы 3, 6) и оценки; ISO 10218:2025; регламент ЕС по машинам; публичные материалы BMW, Figure, Agility, Mercedes-Benz и других.

Стройте узко, докажите на собственных изображениях завода, затем масштабируйте

Строить	AI-перепроверка и классификация дефектов на изображениях AOI для средних EMS со старыми или разнородными AOI; инспекция того, что AOI покрывает слабо; ячейки с коботами, где обрабатывается каждая деталь
Не строить	Универсальная платформа «ИИ плюс манипулятор»; LLM как основной инспектор; манипулятор для отбора на линии SMT; гуманоиды и «роботы как услуга»; фронтир-модели в контурах управления или функциях безопасности

Пилот

1. **Недели 0–2:** соглашение о данных, классы дефектов, базовый уровень
2. **Недели 1–4:** золотой набор, размечен вслепую и арбитрирован
3. **Недели 2–4+:** теневой режим, сравнение по классам
4. **Недели 4–8:** ассистируемая работа только на пройденных классах
5. **Затем:** письменная приёмка, масштабирование линия за линией, повторная проверка при каждом изменении

Безопасность Никакого машинного обучения внутри функций безопасности: ЕС требует оценки нотифицированным органом с 20 января 2027 года, а пути сертификации ИИ не устоятся до 2027–2029.

Источник: главы 6–7 отчёта и краткое содержание; ISO, IEC, UL, EUR-Lex, SAC и национальные базы регулирования.

ОБ АВТОРЕ

Tan Shuai

Технолог и основатель, с более чем двадцатью годами работы в области чипов, аппаратного и системного программного обеспечения и 20 выданными патентами. Его работа провела его через Кремниевую долину, Нью-Йорк, Чикаго, Тайвань, Большой залив (Шэньчжэнь и Гонконг), Вьетнам и Малайзию, с долгим фокусом на передовом производстве и цепочках поставок. Сегодня он работает исследователем и разработчиком в области ИИ, сосредоточившись на том, как ИИ применяется в производственном цеху.

Полный отчёт (все рисунки, таблицы и источники) и статья — на tanshuai.com. Он приветствует диалог с людьми, работающими над ИИ в производстве: i@tanshuai.com

