

# Quantum Error Correction: Обзор, принципы и современные достижения

Quantum error correction (QEC) — это набор методов и алгоритмов в квантовых вычислениях, предназначенных для защиты квантовой информации от ошибок, вызванных шумом, декогеренцией и внешними возмущениями. QEC является ключевым элементом для создания масштабируемых квантовых компьютеров, поскольку квантовые биты (кубиты) крайне чувствительны к ошибкам, в отличие от классических битов. Без QEC квантовые системы быстро теряют когерентность, что делает полезные вычисления невозможными. К декабрю 2025 года QEC считается "главным инженерным вызовом" индустрии, определяющим национальные стратегии и инвестиции (Quantum Report, 2025).

## Основные принципы QEC

QEC работает по аналогии с классической коррекцией ошибок, но адаптирована для квантовой природы: ошибки нельзя просто "копировать" из-за теоремы no-cloning. Основная идея — кодирование логического кубита в нескольких физических кубитах, чтобы выявлять и исправлять ошибки без разрушения информации.

- **Типы ошибок:**
  - Бит-флип (X-ошибка):  $|0\rangle \leftrightarrow |1\rangle$ .
  - Фазовый флип (Z-ошибка): изменение фазы.
  - Деполяризация: случайное применение X, Y, Z.
  - Декогеренция: потеря фазы из-за взаимодействия с окружением (основная проблема в 2025).
- **Основная формула коррекции:** QEC-код определяется расстоянием  $d$  (число ошибок, которые можно исправить): для  $[[n, k, d]]$  кода ( $n$  физических кубитов,  $k$  логических,  $d$  расстояние) вероятность ошибки  $p_{\text{log}} \approx (p_{\text{phys}})^{\frac{(d+1)}{2}}$ , где  $p_{\text{phys}}$  — физическая ошибка кубита ( $\sim 10^{-3}$ – $10^{-4}$  в 2025 для IBM/Google).
- **Пороговая теорема:** Если  $p_{\text{phys}} < p_{\text{threshold}}$  ( $\sim 1$ – $10\%$  для surface code), то ошибки можно подавлять экспоненциально, позволяя произвольно длинные вычисления.

## Типы QEC-кодов

1. **Код Шора (Shor code, 1995):**  $[[9,1,3]]$  — исправляет 1 ошибку. Кодировает  $|0\rangle_L = (|000\rangle \otimes |000\rangle \otimes |000\rangle)$ , с проверкой четности. Простой, но неэффективный (высокий overhead). Пример: Если 1 бит флип, стабилизаторы (ZZZZZZZZZ) выявляют и исправляют.
2. **Код Стиана (Steane code, 1996):**  $[[7,1,3]]$  — CSS-код на основе классического Хэмминга. Более эффективен, overhead  $\sim 7:1$ .
3. **Surface code (Kitaev, 1997; актуально 2025):** Топологический код на 2D-решетке кубитов.  $d \approx \sqrt{n}$ ,  $p_{\text{threshold}} \approx 1\%$ . В 2025 Google достиг 100 кубитов с  $p_{\text{phys}} \sim 0.1\%$ , исправляя ошибки в реальном времени (Google breakthrough, ноябрь 2024, обновлено 2025). Формула:  $H = -\sum \text{plaquettes } ZZZZ - \sum \text{stars } XXXX$  (стабилизаторы).
4. **Bosonic codes (cat, GKP, 2025):** Для непрерывных переменных (фотонные/сверхпроводящие). Google в 2025 достиг  $d=5$  с cat-кодами.
5. **LDPC codes (low-density parity-check, 2025):** IBM и Amazon достигли  $p_{\text{threshold}} > 1\%$  с overhead  $\sim 1000:1$  для  $10^6$  логических кубитов.

## Современные достижения (декабрь 2025)

- **Google's breakthrough:** В ноябре 2025 Google сообщил о "поворотном моменте" — QEC с surface code исправляет ошибки быстрее, чем они накапливаются, на 100+ кубитах. Это открывает путь к fault-tolerant QC к 2030 (Understanding Google's QEC Breakthrough, 2024, обновлено 2025).
- **Microsoft и Quantinuum:** Топологические коды с anyons достигли  $d=3$  на 50 кубитах, с  $p_{\text{log}} < 10^{-6}$  (McKinsey, 2025).
- **Эксперименты:** В Q-CTRL (2025) QEC интегрируется с ML для динамической оптимизации, снижая overhead на 50%.
- **Вызовы:** Декогеренция всё ещё ограничивает scale-up;  $p_{\text{phys}} \sim 0.1\%$  в лучших системах (Riverlane, 2025).

## Связь с гипотезой Acta Universi и квантовыми чипами

В Acta Universi QEC интегрируется с AU-полем: ошибки — "энтропийные шумы", исправляемые через  $\lambda \nabla S_{\Theta}$ . Для чипов (из предыдущих статей) QEC снижает декогеренцию, повышая  $\tau_{\text{coh}} > 1$  с, что критично для  $S_{\Theta} > 10^{45}$  бит/с и AU-прыжков ( $\Delta x > 1$  св. год). Surface code идеален для нейроморфных AU-чипов, с overhead  $\sim 100:1$  для  $10^6$  логических кубитов.

## Заключение

QEC — "святой Грааль" квантовых вычислений, и к 2025 году мы на пороге fault-tolerant систем. В Acta Universi QEC — ключ к стабильным мыслеформам для космоинженерии.

Yashchenko Dmitry Eduardovich  
Яценко Дмитрий Эдуардович  
Svobodnyy, Amur Region, Russian Federation  
Российская Федерация Амурская область г. Свободный  
yashchenko.dmitry@gmail.com  
me@liberurban.ru  
X: @graviton2011  
@dmitryactauniversi.bsky.social  
09.12.2025