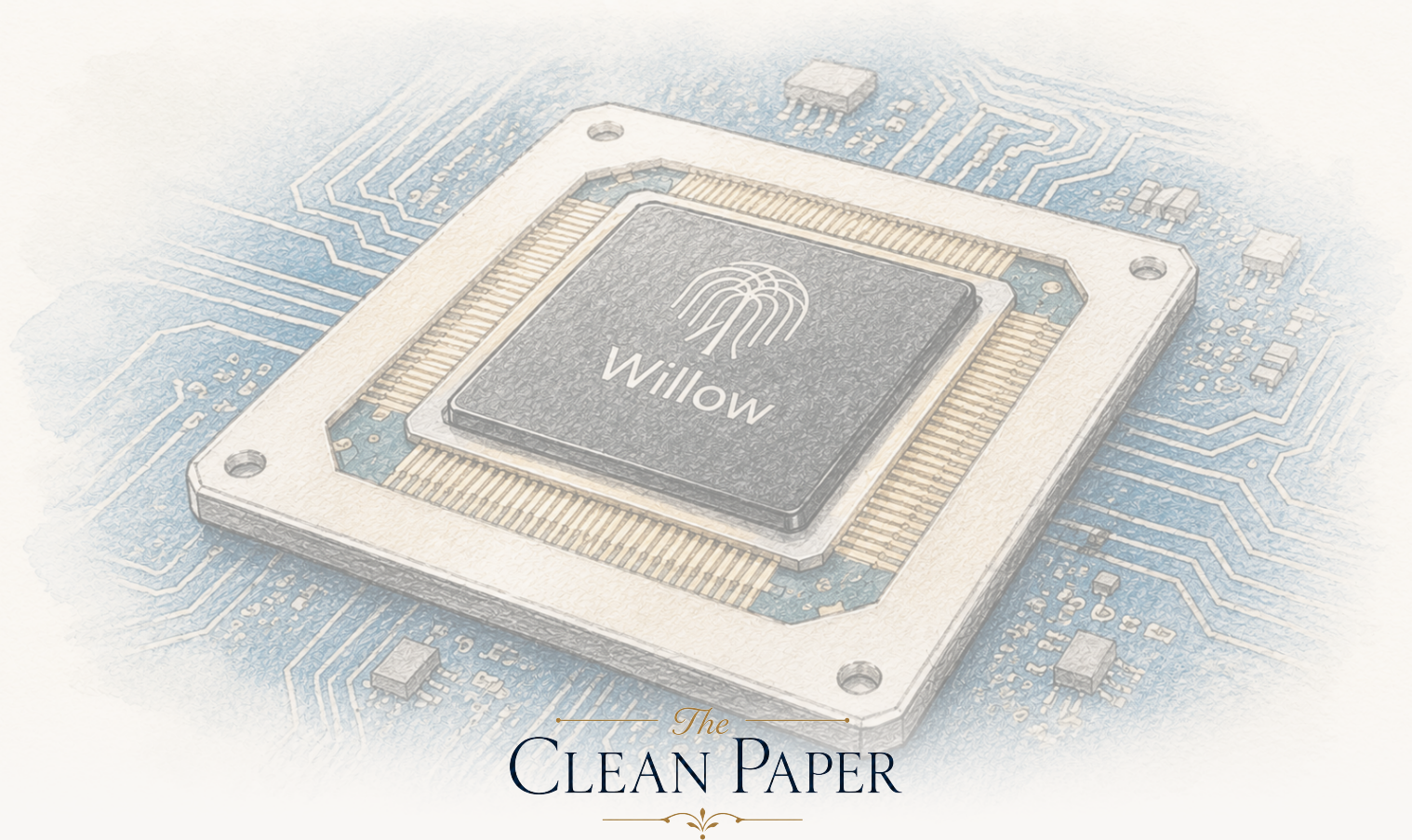




WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Квантовая память наконец стала лучше при увеличении — настоящая веха, но ещё не готовая машина

Google Quantum AI впервые ясно показала, что квантовая память на surface code может работать ниже порога: при увеличении кода от distance 3 до 5 и 7 логическая частота ошибок экспоненциально падала — примерно в 2,14 раза на каждые два шага, — а крупнейшая distance-7 память на 101 кубите переживала свой лучший физический кубит, то есть вышла beyond breakeven, при коррекции ошибок в реальном времени. Это давно ожидаемая инженерная веха. Но это также лишь один логический кубит в роли памяти, с частотой ошибок всё ещё далёкой от потребностей реальных алгоритмов, без логических операций, с непонятным полом ошибок, который подчёркивают авторы, и со многими порядками масштабирования впереди. Порог пересечён, а готовый компьютер не доставлен.

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Vera Rubin · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Quantum error correction below the surface code threshold*, Google Quantum AI and Collaborators, Nature 638, 920 (2025) · DOI: 10.1038/s41586-024-08449-y

Момент, когда кривая наконец изогнулась в правильную сторону

Тридцать лет квантовая коррекция ошибок держалась на обещании, которое ещё никогда не выполнялось настолько чисто. Теория говорит: если распределить одну единицу квантовой информации — один *логический* кубит — между множеством шумных физических кубитов и если эти физические кубиты достаточно качественны, то добавление *ещё большего* их числа должно делать логический кубит *лучше*, а ошибки должны экспоненциально снижаться по мере увеличения кода. Условие спрятано в «если»: ниже критического порога шума большее число кубитов помогает; выше него оно лишь добавляет шум. Все предыдущие эксперименты находились не по ту сторону этой границы или не показывали тренд достаточно чисто. Увеличение кода делало ситуацию хуже, а не лучше.

В декабре 2024 года Google Quantum AI сообщила о первой ясной демонстрации другого режима. На Willow, новом поколении сверхпроводящих процессоров компании, исследователи построили память с surface code на расстояниях кода 3, 5 и 7 и увидели, как логическая частота ошибок *падает* каждый раз, когда код становится больше — в $\Lambda = 2,14 \pm 0,02$ раза на каждое увеличение расстояния на два. Крупнейшая система — distance-7 память на 101 кубите — удерживала логический кубит с ошибкой $0,143\% \pm 0,003\%$ за цикл коррекции и, что стало отдельным заголовком внутри заголовка, жила *дольше лучшего физического кубита*, из которого была построена, в $2,4 \pm 0,3$ раза. Это называют «beyond breakeven» — выходом за точку безубыточности, — и это первый случай, когда весь аппарат коррекции ошибок на этом оборудовании действительно окупил собственные накладные расходы.

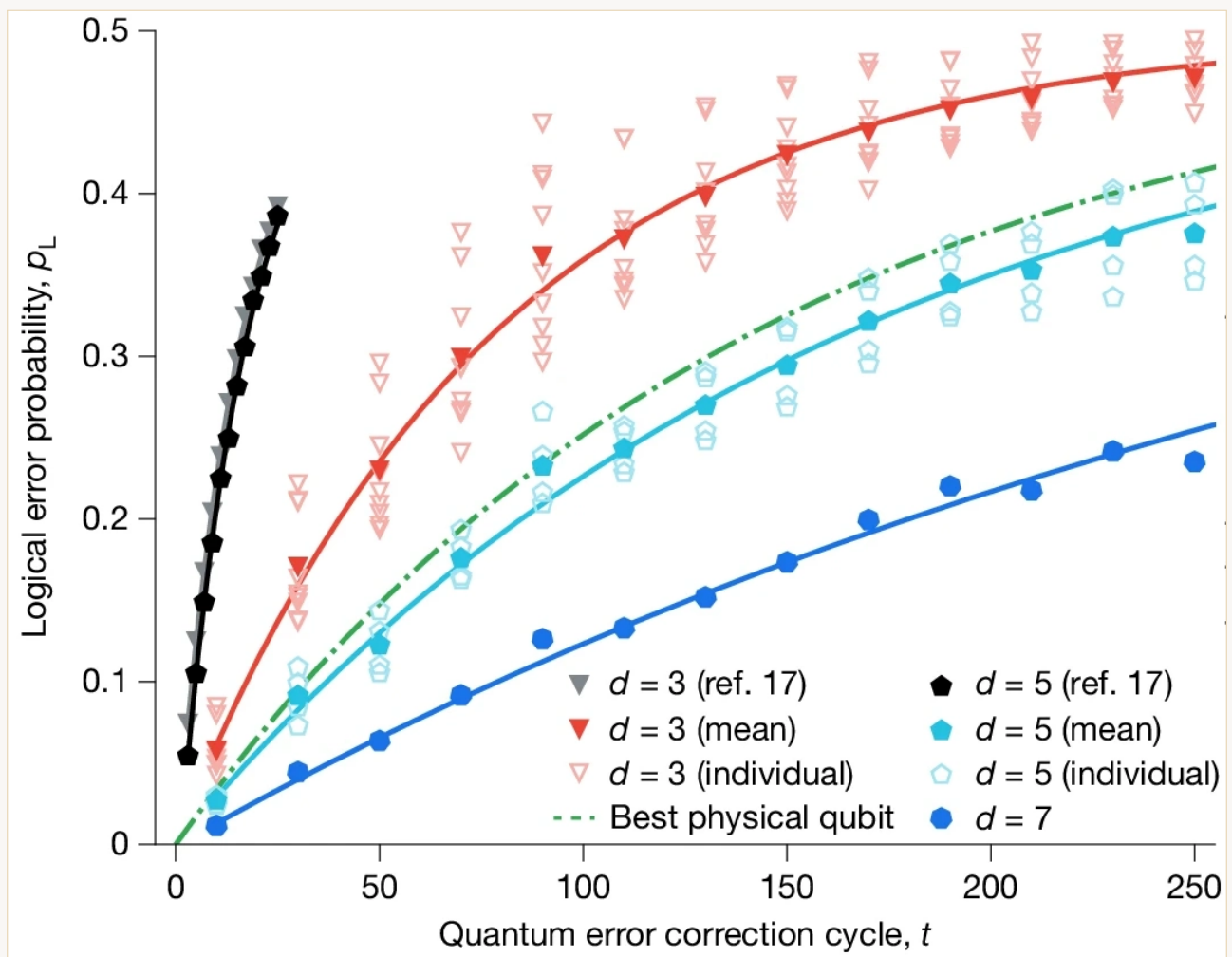
Это настоящая веха, и важно точно сказать, какого типа. Это доказательство того, что масштабирование теперь идёт в правильную сторону. Это не готовый квантовый компьютер, и статья этого не утверждает.

Что означают «surface code», «distance» и «below threshold»

Логический кубит — одна защищённая единица квантовой информации, закодированная во многих физических кубитах. **Surface code** — конкретный способ такого кодирования на двумерной решётке, где дополнительные «измерительные» кубиты постоянно проверяют наличие ошибок, не разрушая сохранённую информацию. **Расстояние кода** d — не физическое расстояние: это минимальное число правильно расположенных ошибок, способных испортить логический кубит так, чтобы код этого не заметил. Большее d означает более крупный и устойчивый участок кода: он расходует больше физических кубитов — примерно $2d^2 - 1$ — и исправляет больше одновременных ошибок, до $(d - 1)/2$. Поэтому три проверенных здесь размера — расстояния 3, 5 и 7 — исправляют соответственно 1, 2 и 3 одновременные ошибки и теоретически требуют примерно 17, 49 и 97 физических кубитов; построенная Google distance-7 память

использовала 101 — немного больше этого учебникового минимума.

«**Below threshold**» — ключевая фраза. Коррекция ошибок помогает лишь тогда, когда физическая частота ошибок лежит ниже критического значения; в этом режиме каждое увеличение расстояния экспоненциально подавляет логическую частоту ошибок. Коэффициент подавления Λ измеряет именно это: $\Lambda > 1$ означает, что увеличивать код полезно, и чем больше Λ , тем лучше. Google сообщает $\Lambda \approx 2,14$, то есть каждое увеличение расстояния на два примерно вдвое уменьшало логическую частоту ошибок. Сам факт, что Λ уверенно выше 1, и есть центральный результат.



Как логическая ошибка накапливается в течение циклов коррекции для памяти с расстояниями 3, 5 и 7 — сверху вниз. Линия, на которую стоит смотреть, — зелёная пунктирная: лучший одиночный физический кубит на чипе. Distance-7 память — синяя, самая нижняя — накапливает ошибку медленнее этой линии, поэтому закодированный кубит живёт дольше, чем лучший физический кубит, из которого он построен: «beyond breakeven», в $2,4\times$ раза. Это результат о времени жизни; само подавление ниже порога ($\Lambda = 2,14$ при росте кода от distance 3 до 5 и 7) содержится в числах в тексте.

Что сделали авторы

- Построили surface-code память на двух чипах Willow: 105-кубитном процессоре, который запускал коды distance-3, -5 и -7 для теста масштабирования — крупнейшая конфигурация была 101-кубитной distance-7 памятью с 49 кубитами данных, — и 72-кубитном процессоре, который запускал distance-5 память с декодером реального времени и repetition codes большого расстояния.
- Измерили, как логическая ошибка за цикл меняется при увеличении расстояния кода от 3 до 5 и 7, и получили коэффициент подавления Λ .
- Сравнили время жизни логического кубита с лучшим отдельным физическим кубитом на том же чипе, чтобы проверить «breakeven».
- Запустили distance-5 код с **декодером реального времени** — классическим оборудованием, которое интерпретирует проверки ошибок по мере их появления, — до миллиона циклов, чтобы показать, что коррекция способна работать в темпе самой машины.
- Распирили более простые **repetition codes** до distance 29, чтобы искать редкие глубинные источники ошибок, задающие нижнюю границу производительности.

Что они обнаружили

- **Код работает ниже порога.** Логическая ошибка за цикл уменьшалась в $\Lambda = 2,14 \pm 0,02$ раза на каждое увеличение расстояния на два — чистое экспоненциальное подавление, именно то поведение, которое обещала теория и которое ни один процессор раньше не демонстрировал настолько однозначно.
- **Distance-7 память достигла $0,143\% \pm 0,003\%$ ошибки за цикл** и жила в $2,4 \pm 0,3$ раза дольше, чем её лучший физический кубит — beyond breakeven.
- **Декодирование в реальном времени успевало.** Для distance 5 средняя задержка декодера составляла 63 микросекунды при длительности цикла 1,1 микросекунды и стабильно работала в течение миллиона циклов — коррекция выполнялась вживую, а не только в анализе после эксперимента.
- **Остаётся редкий глубинный источник ошибок.** В тестах repetition code производительность в конце концов ограничивали коррелированные всплески ошибок примерно **раз в час** — около одного случая на 3×10^9 циклов, — что создаёт пол ошибок около 10^{-10} ; происхождение этих всплесков, по словам авторов, **пока не понятно**.

Чего это не доказывает

- Это **не** квантовый компьютер, выполняющий вычисления. Это квантовая *память*: она хранит и защищает один логический кубит. Она не выполняет логические операции — gates — между логическими кубитами и не запускает алгоритмы.

- Это **не** означает, что до полезных машин остался один кубит. Логический кубит distance-7 расходует около 101 физического кубита; частота ошибок около 0,1% за цикл всё ещё намного выше примерно 10^{-6} – 10^{-10} , необходимых реальным алгоритмам. Закрывание этого разрыва требует гораздо больших расстояний — значительно больше физических кубитов на один логический, — а полезным алгоритмам нужны *тысячи* логических кубитов одновременно. Физический бюджет для такого масштаба уходит в миллионы.
- Фраза **«если масштабировать» действительно несёт вес**. Собственный вывод статьи: производительность устройства, *если её масштабировать*, может соответствовать требованиям больших алгоритмов. Показать правильный тренд на одном логическом кубите — не то же самое, что построить масштабируемую машину, и ничто здесь не гарантирует, что тренд сохранится на значительно больших размерах.
- **Непонятный пол ошибок — живая проблема**. Коррелированные всплески, ограничивающие repetition code, по словам авторов, на порядки больше ожидаемых и помешали бы более крупным fault-tolerant приложениям, пока их не поймут. Это открытый недостаток, прямо признанный в работе, а не мелочь, которую уже решили.
- Статья ничего не говорит о **взломе шифрования или «квантовом преимуществе» в полезных задачах**. Для этого нужна полноценная отказоустойчивая машина, фундаментом для которой является этот результат, а не сам этот демонстратор.

Насколько сильны доказательства

- **Центральное утверждение сильное и важное**. Работа ниже порога с чистым экспоненциальным подавлением на трёх расстояниях кода, плюс beyond-breakeven время жизни и работающий декодер реального времени — именно та комбинация, которой область пыталась достичь, и она показана напрямую, а не выведена косвенно. Это не артефакт хайпа, а реальный инженерный результат ведущей группы.
- **Авторы осторожны с масштабом вывода**. Они называют результат below-threshold *memory*, сами подчёркивают непонятный пол коррелированных ошибок и привязывают будущее к заметному «if scaled». Преувеличение появляется главным образом в окружающем медийном пересказе, который округляет «защищённый от ошибок кубит памяти улучшился при увеличении кода» до «квантовые компьютеры уже здесь».
- **Честный статус — фундаментальный шаг, сделанный чисто**. Один логический кубит, защищённый настолько хорошо, что дополнительная избыточность наконец помогает, — но впереди долгий, тяжёлый и не гарантированный путь масштабирования, логических операций и объяснения неизвестных ошибок.

Почему это важно

Отказоустойчивые квантовые вычисления всегда имели привкус проблемы курицы и яйца: полезным машинам нужны частоты ошибок, которых не способен достичь ни один физический кубит, а исправление — коррекция ошибок — работает лишь тогда, когда само физическое оборудование уже достаточно хорошо, чтобы оказаться ниже порога. Пересечь эту границу хотя бы один раз, хотя бы для одного логического кубита, меняет вопрос с «возможно ли это вообще?» на «насколько далеко это можно масштабировать и как быстро?». Это реальное и содержательное изменение, поэтому результат заслуживает внимания.

Но та же осторожность, которая делает результат надёжным, должна сдерживать историю вокруг него. Это первый хорошо уложенный кирпич фундамента. Не здание — и люди, которые его уложили, первыми это признают. Правильный способ следить за квантовыми вычислениями в ближайшие годы — смотреть именно на эту неэффективную кривую: сохраняется ли коэффициент подавления при росте кодов, удаётся ли выполнять логические gates так же чисто, как логическую память, и будет ли когда-нибудь объяснена та загадочная ошибка раз в час.

Краткий итог

Google Quantum AI впервые ясно показала, что квантовая память на surface code может работать *ниже порога*: когда код увеличивали от distance 3 до 5 и 7, логическая частота ошибок экспоненциально падала — примерно в 2,14 раза на каждые два шага, — а крупнейшая distance-7 память на 101 кубите переживала свой лучший физический кубит, то есть вышла beyond breakeven, при этом коррекция ошибок работала в реальном времени. Это настоящая, давно ожидаемая инженерная веха для квантовых компьютеров. Но это также один логический кубит в роли памяти, с частотой ошибок всё ещё далёкой от требований реальных алгоритмов, без выполненных логических операций, с непонятным полом ошибок, который подчёркивают сами авторы, и со многими порядками масштабирования впереди. Настоящий порог пересечён — квантовый компьютер ещё не доставлен.

Источники

Google Quantum AI and Collaborators, Quantum error correction below the surface code threshold, Nature 638, 920 (2025)

<https://doi.org/10.1038/s41586-024-08449-y>

Author Correction: Quantum error correction below the surface code threshold, Nature 653, E5 (2026) — corrects a Fig. 3a axis label and legend keys; does not affect the below-threshold (Fig. 1) results

<https://www.nature.com/articles/s41586-026-10559-8>