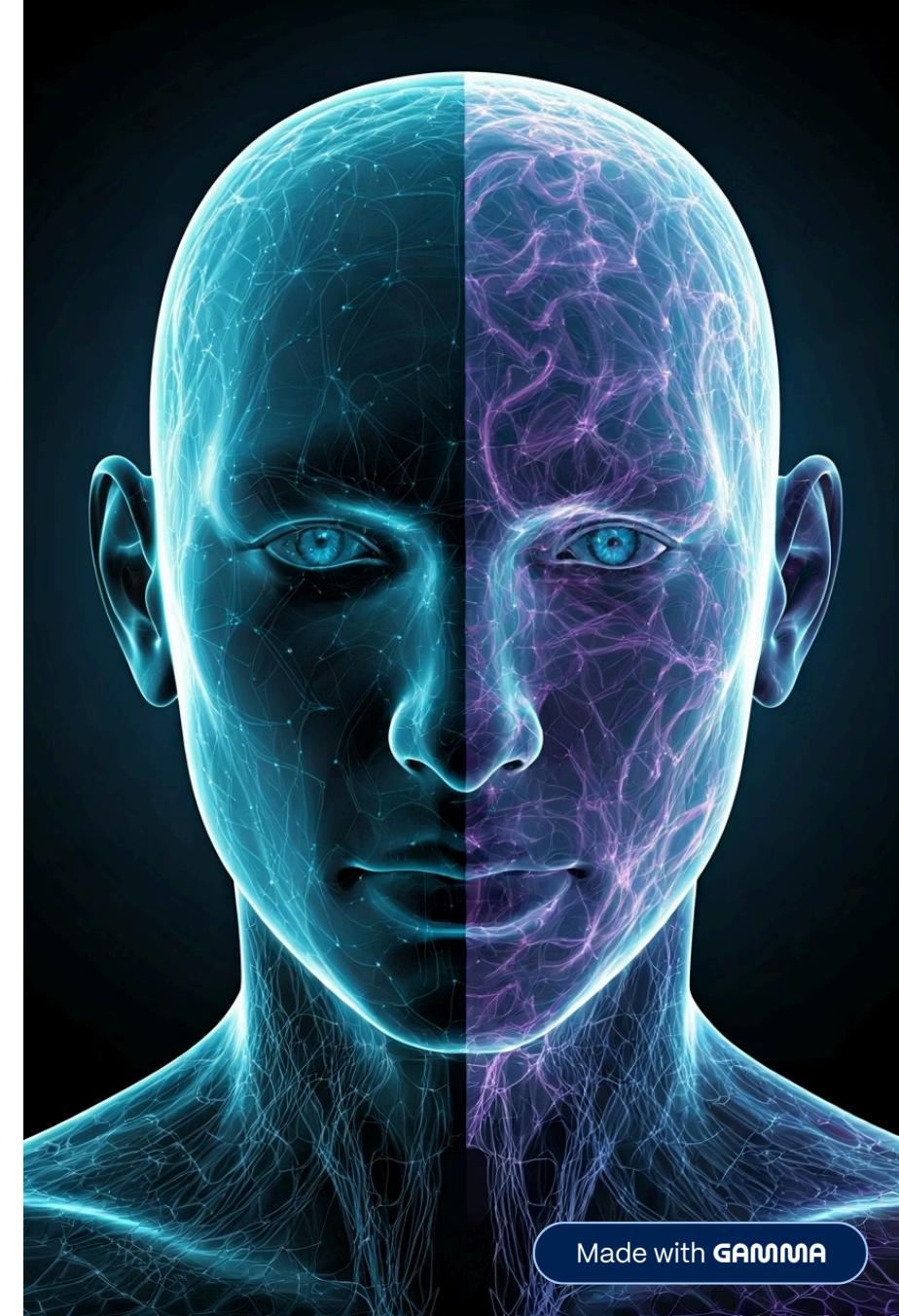
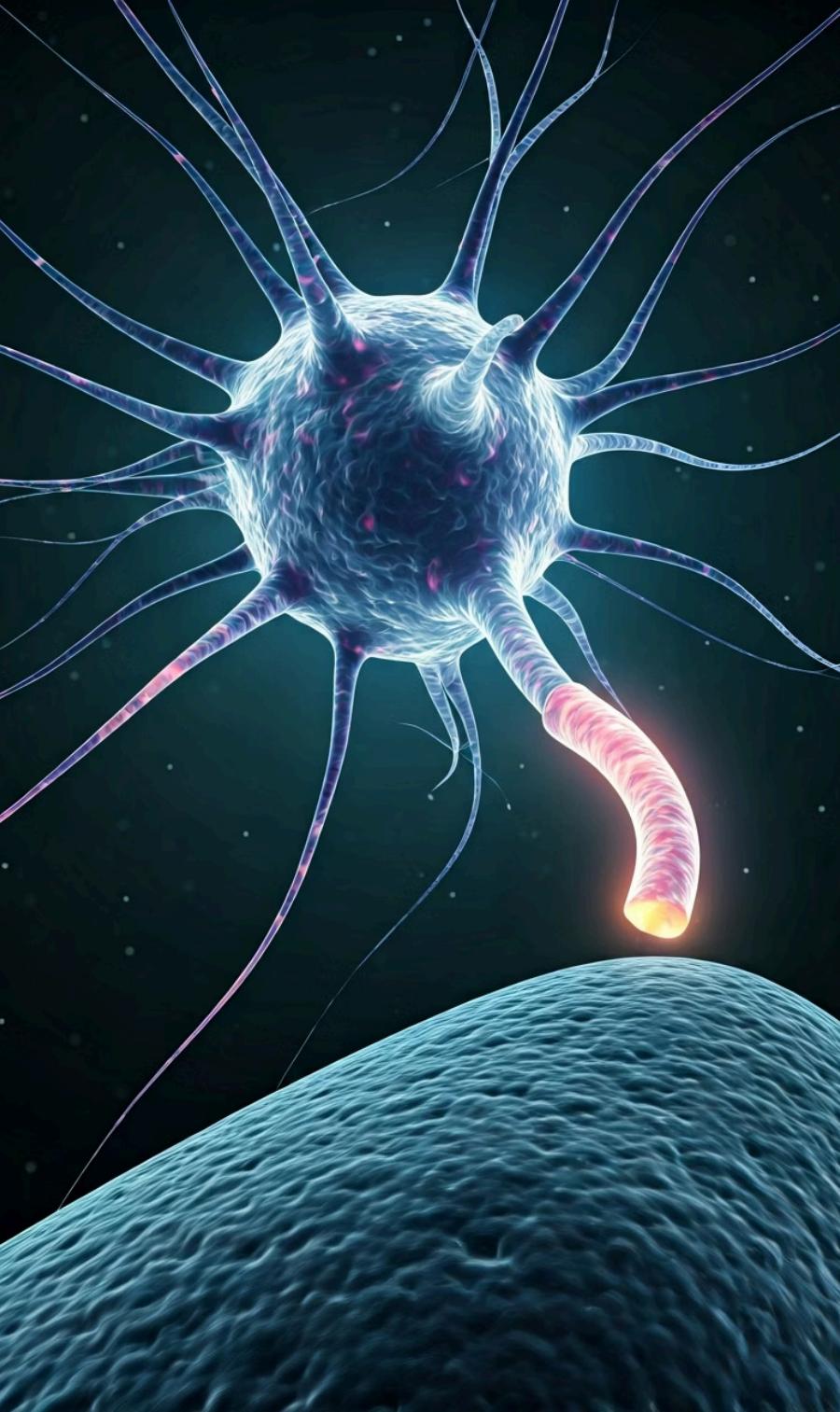


Мозг vs ИИ: Архитектурная дихотомия

Сравнительный анализ фундаментальных различий между
биологическим интеллектом и искусственными нейронными сетями





Нейробиологическая архитектура



Массовый параллелизм

86 миллиардов нейронов формируют 10^{14} - 10^{15} синаптических соединений через спайковое кодирование



Модульность

Специализированные области неокортикса, гиппокампа и мозжечка образуют распределённые интегрированные сети



Рекуррентность

Преобладают рекуррентные связи с обратной связью, асинхронная обработка без глобального тактового генератора

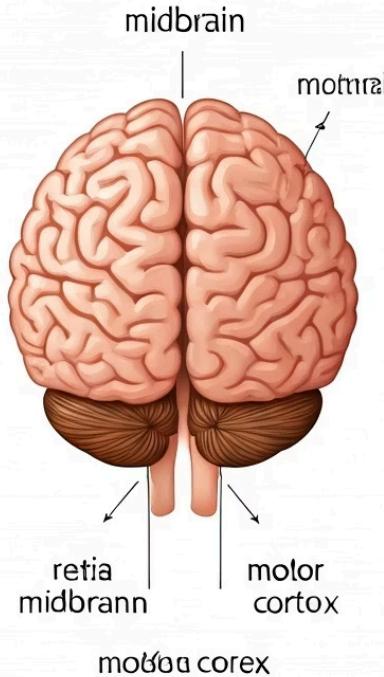
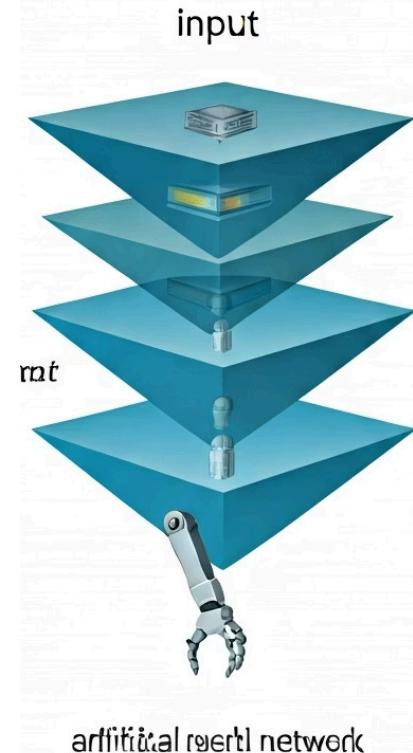
Архитектура ИНС vs Мозг

Искусственные нейронные сети

- Синхронная слоистая обработка
- Непрерывные значения интенсивности
- Детерминированные вычисления
- Однородность нейронов в слое
- Feed-forward архитектура

Человеческий мозг

- Асинхронная обработка
- Спайковое кодирование
- Аналоговые вычисления
- Гетерогенность нейронов
- Рекуррентная архитектура



Механизмы обучения



Нейропластичность

Долговременная потенциация (LTP) и депрессия (LTD) через правило Хебба и STDP. Локальная корректировка без глобального сигнала

Дофаминергическая система

Глобальный сигнал вознаграждения модулирует синаптическую пластичность, обеспечивая обучение с подкреплением

Backpropagation

Обратное распространение ошибки со стохастическим градиентным спуском. Требует глобального сигнала и больших аннотированных данных

Мозг использует гибридный подход: локальное неконтролируемое обучение с глобальными сигналами подкрепления. ИНС зависят от глобальной оптимизации



Энергоэффективность и производительность

20W

Потребление мозга

Беспрецедентная
энергоэффективность через
аналоговые вычисления и разреженное
кодирование

10^2Hz

Тактовая частота

Низкие частоты компенсируются
массовым параллелизмом 10^{11}
нейронов

GWh

Обучение ИИ

Крупные модели требуют гигаватт-
часов из-за бутылочного горлышка
памяти

Колокация памяти и обработки в синапсах обеспечивает уникальную эффективность мозга, недостижимую для архитектуры фон Неймана

Перспективы конвергенции

01

Нейроморфные вычисления

Специализированные процессоры на базе мемристоров, воплощающие спайковые нейронные сети (SNNs) для повышения энергоэффективности на порядки

02

Локальное обучение

Альтернативы backpropagation:
Forward-Forward Algorithm и
методы, приближенные к STDP,
без глобального сигнала ошибки

03

Разреженные представления

Внедрение принципов разреженного кодирования и ансамблевого представления для помехоустойчивости и эффективности

Будущее ИИ — в конвергенции: гибридные системы, сочетающие энергоэффективность мозга с вычислительной мощью кремния

