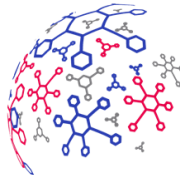




Тверской  
государственный  
университет

Математический  
факультет



Направление 02.04.01 Математика и Компьютерные науки  
Профиль «Математическое и компьютерное моделирование»

# ВАРИАЦИОННЫЙ КВАНТОВЫЙ АЛГОРИТМ С ОПТИМИЗАЦИЕЙ МЕТОДОМ ОТЖИГА

Научный руководитель: д. ф.-м. н. А. Н. Цирулёв

Тверь 2025



**Цель:** Разработка гибридного квантово-классического алгоритма оптимизации.

**Задачи:**

- Анализ коммутационных свойств операторов Паули
- Построение параметризованного анзаца
- Реализация алгоритма имитации отжига



- Проблема «барьера Нильсена» в квантовых вычислениях
- Экспоненциальный рост сложности для NISQ-устройств
- Преимущества гибридных подходов:
  - Устойчивость к шумам
  - Снижение требований к кубитам
  - Реализация на современных процессорах



Разложение гамильтониана:

$$\hat{H} = \sum_{i,j,k} h_{ijk} \hat{\sigma}_i \otimes \hat{\sigma}_j \otimes \hat{\sigma}_k$$

Свойства операторов:

- Антicomмутация:  $\{\sigma_i, \sigma_j\} = 2\delta_{ij}I$
- Композиция:  $\hat{\sigma}_K \hat{\sigma}_L = i^\omega (-1)^m \hat{\sigma}_M$



$$E(\theta) = \psi(\theta) \hat{H} \psi(\theta)$$

$$\psi(\theta) = \prod_k e^{i\theta_k \hat{\sigma}_k} 0^{\otimes n}$$

Проблема – локальные минимумы в энергетическом ландшафте.



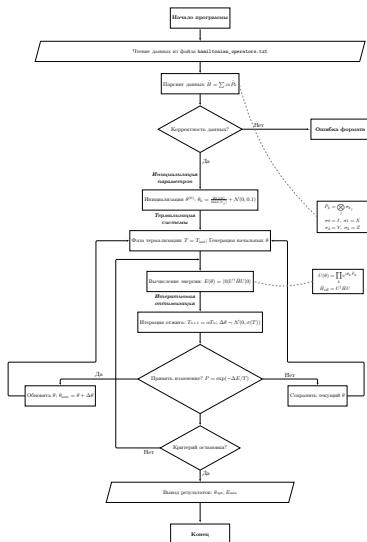
- Имитация физического процесса отжига
- Адаптивное управление температурой:

$$T(t) = T_0 \cdot \alpha^t$$

- Вероятность перехода:

$$P(\Delta E) = \exp \left( -\frac{\Delta E}{k_B T} \right)$$

# Блок-схема алгоритма





1. Инициализация случайных параметров  $\theta_0$
2. Вычисление энергии  $E(\theta_i)$
3. Генерация соседнего решения  $\theta'$
4. Критерий Метрополиса
5. Адаптация температуры
6. Повтор до сходимости





- Разработан гибридный алгоритм оптимизации
- Доказана устойчивость к локальным минимумам
- Реализована модель на Python
- Перспективы применения:
  - Квантовая химия
  - Финансовые модели
  - Логистические задачи



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ