

Исследование производительности постреляционных баз данных с применением технологий тестирования

Начать презентацию >

Студент: Кучин Е.А.

Группа ИУ5-44М

Научный руководитель: Виноградова М.В.
доцент, к.т.н.

18.06.2025



ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

ПРОБЛЕМА

ЛАВИНООБРАЗНЫЙ РОСТ ДАННЫХ

Ежедневно генерируются огромные массивы информации (к 2025 г. – **175 зеттабайт**)

МНОГООБРАЗИЕ СУБД

Наряду с реляционными СУБД, широкое распространение получили NoSQL решения, каждое со своими особенностями

РЕШЕНИЕ: YCSB BENCHMARK

КРИТИЧНОСТЬ ВЫБОРА СУБД

От выбора системы напрямую зависят производительность, масштабируемость и эффективность приложений

ВЫСОКАЯ ЦЕНА ОШИБКИ

Неправильный выбор ведет к проблемам производительности и высоким эксплуатационным расходам

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

- Провести **комплексное сравнительное исследование** производительности постреляционных и реляционной СУБД
- Оценить поведение СУБД при обработке **больших объемов данных** (~12 ГБ)
- Использовать **стандартизированные методы** тестирования (YCSB)
- Выявить **сильные и слабые стороны** каждой СУБД в различных сценариях

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ



PostgreSQL

Реляционная СУБД



MongoDB

Документоориентированная NoSQL



Cassandra

Колоночная NoSQL

ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ

ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ

ops/sec

ВРЕМЯ ОТКЛИКА

Latency

МАСШТАБИРУЕМОСТЬ

Threads

РАБОЧИЕ НАГРУЗКИ

YCSB A-F

Показатели при различных рабочих нагрузках (CRUD, сканирование), генерируемых YCSB

ПЕРЕЧЕНЬ РЕШЕННЫХ ЗАДАЧ



ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ

Теоретическое обоснование

- 1 Исследование **архитектурных решений** и подходов к обработке больших объемов данных в PostgreSQL, MongoDB и Cassandra
- 2 Сравнительный **анализ технологий тестирования** СУБД и обоснованный выбор универсального бенчмарка YCSB
- 3 Анализ **технологий инструментов бенчмаркинга** баз данных и исследование тенденций их использования



ПОДГОТОВКА ДАННЫХ

Настройка окружения

- 4 Анализ и выбор реального **JSON-датасета** научных публикаций объемом ~12 Гб для тестирования производительности
- 5 Разработка специфических **стратегий подготовки** и загрузки данных для каждой СУБД с учетом их архитектурных особенностей
- 6 Создание и прецизионная настройка **изолированного тестового окружения** на виртуальной машине



ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Оптимизация и настройка

- 7 Техническая реализация **загрузки больших объемов** данных с преодолением совместимости инструментов
- 8 Комплексная оптимизация **конфигурационных файлов** PostgreSQL, MongoDB и Cassandra для высокопроизводительных нагрузок
- 9 Детальная конфигурация **YCSB** и разработка стандартизированных тестовых сценариев с широким диапазоном параллелизма



ТЕСТИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ

Сбор и визуализация результатов

- 10 Проведение комплексной **серии тестов** производительности с обеспечением статистической достоверности и контролем условий
- 11 Разработка специализированного **Python-скрипта** для автоматизированного сбора и обработки многомерных результатов
- 12 Создание интерактивных **дашбордов в Apache Superset** для визуализации данных и формулирование практических рекомендаций

ВСЕГО ВЫПОЛНЕНО: 12 задач | 4 этапа | 3 СУБД | 189 тестов

3 / 25

АРХИТЕКТУРНЫЕ РЕШЕНИЯ СУБД

Анализ архитектурных особенностей

PostgreSQL (постреляционная СУБД)

- Реляционная модель данных с определенной схемой
- MVCC (Multiversion Concurrency Control) для изоляции транзакций
- Полная поддержка ACID-свойств (Atomicity, Consistency, Isolation, Durability)
- JSON-поддержка для работы с полуструктурированными данными
- Расширяемость через пользовательские типы данных и функции

MongoDB (документоориентированная СУБД)

- Колоночная модель данных для эффективности определенных типов запросов
- Распределенная архитектура без единой точки отказа
- Линейная масштабируемость при добавлении узлов
- Настраиваемая консистентность для каждой операции
- Оптимизация для записи - архитектура, ориентированная на высокую производительность операций записи

Cassandra (колоночная СУБД)

- Колоночная модель данных для эффективности определенных типов запросов
- Распределенная архитектура без единой точки отказа
- Линейная масштабируемость при добавлении узлов
- Настраиваемая консистентность для каждой операции
- Оптимизация для записи - архитектура, ориентированная на высокую производительность операций записи

Сравнение подходов к обработке данных

- Реляционный подход (PostgreSQL): строгая схема, нормализация, SQL, транзакционность
- Документоориентированный подход (MongoDB): гибкая схема, вложенные документы, горизонтальное масштабирование
- Колоночный подход (Cassandra): денормализация, широкие строки, распределение данных

4 / 25

ТЕХНОЛОГИИ ТЕСТИРОВАНИЯ СУБД

ИНСТРУМЕНТ	ТИП	ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ	ОСОБЕННОСТИ	ОГРАНИЧЕНИЯ
pgBench	Специализированный	PostgreSQL	Простота использования, оптимизирован для PostgreSQL	Только для PostgreSQL
cassandra-stress	Специализированный	Cassandra	Встроенный инструмент, оптимизирован для Cassandra	Только для Cassandra
MongoDB Benchmarking Tools	Специализированный	MongoDB	Оптимизирован для дисковой подсистемы	Только для MongoDB
TPC (TPC-C, TPC-H)	Универсальный	Реляционные СУБД	Индустриальный стандарт	Сложность настройки, ориентирован на реляционные системы
Sysbench	Универсальный	Различные СУБД	Хороший инструмент	Ограниченная поддержка NoSQL
YCSB	Универсальный	Различные СУБД	Поддержка NoSQL и SQL, простота настройки	—

• Вывод

Для объективного сравнения производительности PostgreSQL, Cassandra и MongoDB был выбран **YCSB** как универсальный инструмент с поддержкой как реляционных, так и NoSQL систем.

5 / 25

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА YCSB

КРОСС-ПЛАТФОРМЕННОСТЬ

1

- Поддержка всех трех исследуемых СУБД
- Единый инструмент и единые метрики для сопоставимости результатов

СТАНДАРТИЗИРОВАННЫЕ РАБОЧИЕ НАГРУЗКИ

2

- **Workload A:** 50% чтение / 50% обновление (Update heavy)
- **Workload B:** 95% чтение / 5% обновление (Read heavy)
- **Workload C:** 100% чтение (Read only)
- **Workload D:** 95% чтение / 5% вставка (Read latest)
- **Workload E:** 95% сканирование / 5% вставка (Short ranges scan)
- **Workload F:** 50% чтение / 50% чтение-модификация-запись

РЕЛЕВАНТНЫЕ МЕТРИКИ

3

- Пропускная способность (ops/sec)
- Задержки операций (среднее, перцентили P95, P99)
- Конфигурируемость параметров тестирования

• Вывод

YCSB является оптимальным выбором для сравнительного анализа, обеспечивая единую методологию тестирования и объективные результаты для принятия обоснованных решений о выборе СУБД.

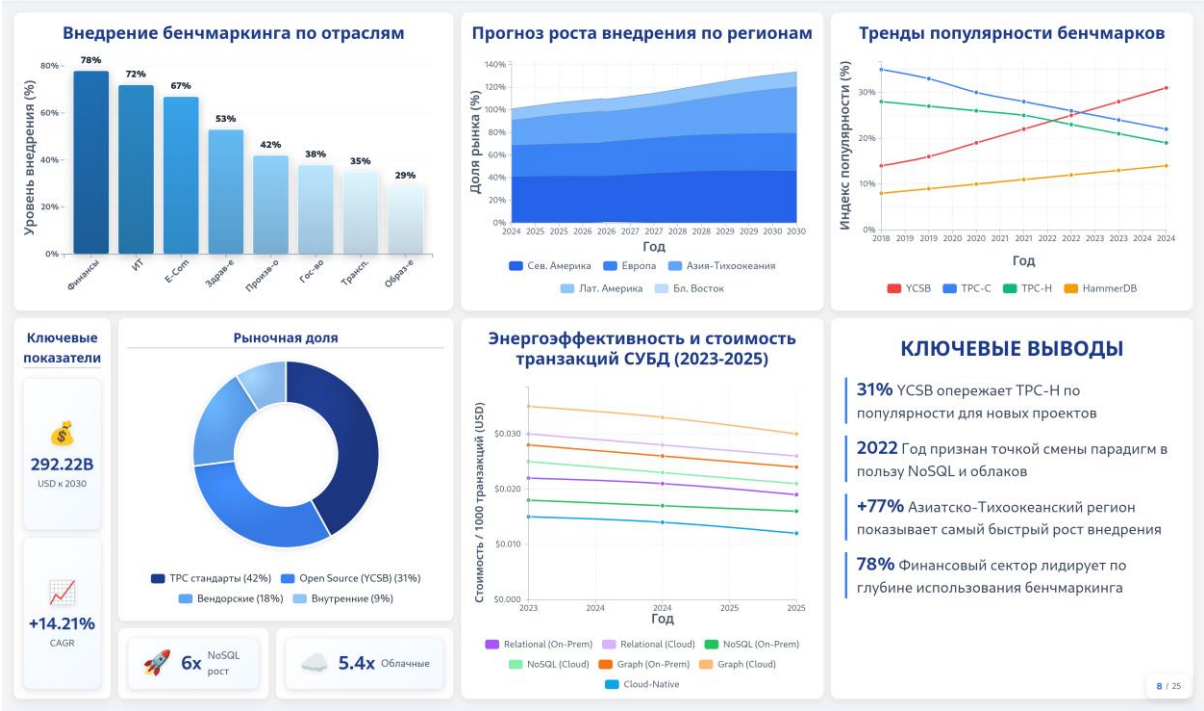


6 / 25

ПОДТВЕРЖДЕНИЕ АКТУАЛЬНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ



УГЛУБЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ТРЕНДОВ И ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ



ВЫБРАННЫЙ ДАТАСЕТ

- **Источник:** Метаданные научных публикаций в JSON-формате
- **Объём:** ~12 ГБ
- **Количество записей:** 4,894,081
- **Структура:** Сложные вложенные JSON-документы с метаданными публикаций

ПРЕИМУЩЕСТВА ВЫБРАННОГО ДАТАСЕТА

- **Реалистичность:** отражает типичную структуру данных современных приложений
- **Сложность структуры:** содержит вложенные объекты, массивы, различные типы данных
- **Масштаб:** достаточный объем для выявления характеристик производительности
- **Универсальность:** подходит для тестирования различных моделей данных

Пример записи датасета

JSON структура метаданных научной публикации

```
dataset.json
{
  "id": 1091,
  "authors": [
    {
      "name": "Makoto Satoh",
      "org": "Shinshu University",
      "id": 2312688602
    },
    {
      "name": "Ryo Muramatsu",
      "org": "Shinshu University",
      "id": 2482909946
    }
  ],
  "title": "Preliminary Design of a Network Protocol Learning Tool Based on the Comprehension of High School Students",
  "year": 2013,
  "n_citation": 1,
  "page_start": "89",
  "page_end": "93",
  "doc_type": "Conference",
  "publisher": "Springer, Berlin, Heidelberg",
  "doi": "10.1007/978-3-642-39476-8_19",
  "indexed_abstract": {
    "IndexLength": 58,
    "InvertedIndex": {
      "tool": [42],
      "study": [4],
      "students": [14, 46],
      "learning": [9, 41],
      "network": [33, 56]
    }
  }
}
```

9 / 25

СТРУКТУРА И ОСОБЕННОСТИ ДАННЫХ

- **Основные поля:** title, year, authors, abstract, references
- **Вложенные объекты:** venue (место публикации), fos (области знаний)
- **Массивы:** authors, references, indexed_abstract
- **Метаданные:** идентификаторы, индексы, временные метки

ОСОБЕННОСТИ ИМПОРТА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ СУБД

- **MongoDB:** прямая совместимость с JSON, сохранение структуры
- **PostgreSQL:** необходимость трансформации в реляционную структуру или использование JSONB
- **Cassandra:** требование денормализации и выравнивания вложенных структур

ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ

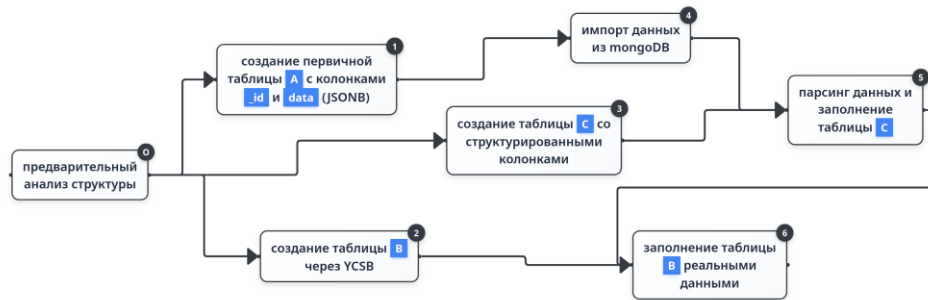
- Проверка эффективности обработки реальных полуструктурированных данных
- Оценка производительности при различных паттернах доступа
- Выявление ограничений каждой архитектурной модели

10 / 25

СХЕМА ЗАГРУЗКИ DATASET В MONGODB

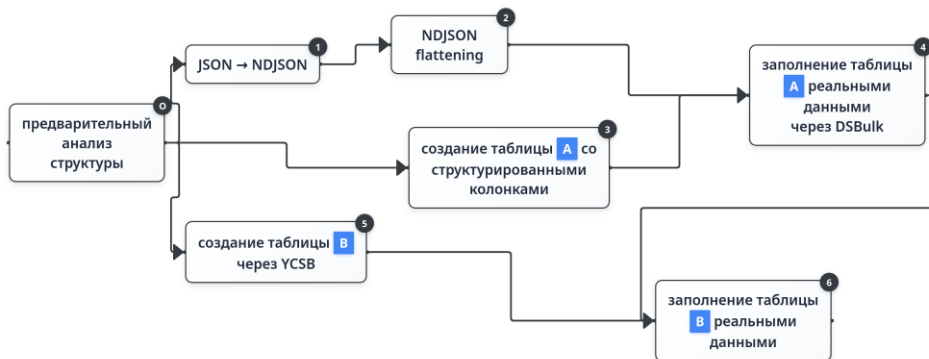


СХЕМА ЗАГРУЗКИ DATASET В POSTGRESQL



11 / 25

СХЕМА ЗАГРУЗКИ DATASET В APACHE CASSANDRA



КЛЮЧЕВЫЕ РАЗЛИЧИЯ

- MongoDB: естественная совместимость
- PostgreSQL: баланс между структурированностью и гибкостью
- Cassandra: требование полной денормализации

12 / 25

ТЕСТОВОЕ ОКРУЖЕНИЕ

АППАРАТНАЯ И ПРОГРАММНАЯ КОНФИГУРАЦИЯ

- Intel Core i9-12900H (16 виртуальных ядер, 2.9 ГГц)
- 24 Гб DDR5 RAM, 4800MHz
- NVMe SSD Western Digital S850NX (1512 Гб)

ВИРТУАЛИЗАЦИЯ

- VMware Workstation Pro 17

ПРОГРАММНОЕ ОКРУЖЕНИЕ

Kubuntu 24.04 LTS	MongoDB 8.0.6
PostgreSQL 17.4	Cassandra 4.1.8

ИНСТРУМЕНТЫ

YCSB 0.17.0	Python 3.9.21
JDK 11.0.26	

ПРИНЦИПЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОБЪЕКТИВНОСТИ:

- Идентичное окружение для всех тестов
- "Холодный" старт перед каждым тестом
- Контролируемые условия и изоляция процессов

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ

- Трёхкратное повторение каждого теста
- Статистическая обработка результатов
- Контроль внешних факторов и системных ресурсов
- Документирование условий проведения тестов

СТАНДАРТИЗАЦИЯ ПРОЦЕДУР

- Одинаковая последовательность тестирования
- Фиксированные интервалы между тестами
- Автоматизация сбора метрик и результатов

13 / 25

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЗАГРУЗКИ

Основные технические вызовы:

- Различия в форматах данных между СУБД
- Совместимость драйверов и API
- Оптимизация процесса загрузки для больших объемов
- Обеспечение целостности данных при трансформации

Результаты технической реализации:

- Успешная загрузка 4,894,081 записей во все три СУБД
- Сохранение целостности данных при всех трансформациях
- Подготовка единообразных тестовых таблиц

MongoDB

- Прямое использование mongoimport для JSON
- Настройка параметров импорта для оптимизации скорости
- Создание индексов после загрузки для минимизации времени


PostgreSQL

- Пакетная загрузка с использованием psycopg2-binary
- Оптимизация SQL-запросов для трансформации JSON в реляционную структуру
- Использование COPY для быстрой загрузки больших объемов

Cassandra

- Предобработка данных (JSON → NDJSON, выравнивание, валидация данных)
- Конфигурация DSBulk (создание конфигурационных файлов, настройка маппинга полей м/источником и целевой схемой, оптимизация параметров загрузки)

14 / 25



PostgreSQL

```

postgresql.conf


# Увеличение параллелизма для высокого параллелизма
max_connections = 500 # вместо 100

# аутентификация для тестирования
local all trust
host all 127.0.0.1/32 trust


```

Результаты оптимизации


Комплексная настройка конфигураций всех трех СУБД для обеспечения максимальной производительности при высоких нагрузках




Производительность
Минимизация узких мест при высоком параллелизме



Стабильность
Стабильная производительность на всех уровнях нагрузки



Эффективность
Оптимальное использование аппаратных ресурсов



MongoDB


```

mongodb.conf

cacheSizeGB: 16 # увеличение кэша
maxIncomingConnections: 1000

wiredTigerConcurrentReadTransactions: 1000
wiredTigerConcurrentWriteTransactions: 1000

```



Cassandra

```

cassandra.yaml

# Увеличение параллелизма для высокого параллелизма
concurrent_reads: 256 # вместо 32
concurrent_writes: 256 # вместо 32
concurrent_materialized_view_writes: 256 # вместо 32

```

К О Н Ф И Г У Р А Ц И Я Y C S B

Параметры тестирования производительности СУБД

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Record Count: 4,894,081

Operation Count: 4,894,081

Threads: [4, 8, 16, 32, 64, 128, 256]

Распределение: zipfian, uniform

Повторения: 3x

ДРАЙВЕРЫ СУБД

MongoDB

Стандартный YCSB драйвер для документоориентированной СУБД

Cassandra

CQL-драйвер для колоночной распределенной СУБД

PostgreSQL

JDBC-драйвер для реляционной СУБД

РАБОЧИЕ НАГРУЗКИ 6 типов

A Workload A

Baseline

сбалансированная нагрузка

50% read / 50% update

B Workload B

Read-Heavy

преимущественно чтение

95% read / 5% update

C Workload C

Read-Only

только чтение

100% read

D Workload D

Read-Latest

чтение последних записей

95% read latest / 5% insert

E Workload E

Scan-Heavy

сканирование диапазонов

95% scan / 5% insert

F Workload F

Read-Modify-Write

чтение с модификацией

50% read / 50% RMW

ПРОЦЕДУРА ТЕСТИРОВАНИЯ

- Трехкратное повторение каждой комбинации параметров
- Полный перезапуск СУБД между тестами
- Продолжительность тестирования: ≥120 минут
- Идентичные параметры для всех исследуемых СУБД
- Единая методология измерения производительности
- Стандартизированная форма отчетности

КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ

- Zipfian распределение для имитации реальных "горячих" точек доступа
- Минимизация влияния кэширования на результаты измерений
- Обеспечение полной сопоставимости результатов между СУБД
- Комплексное покрытие спектра рабочих нагрузок

ПРОВЕДЕНИЕ ТЕСТОВ

Методология и контроль качества

Протокол проведения

последовательность выполнения:

- Последовательное выполнение всех workload'ов (A-F)
- Для каждого workload'a: тестирование с 7 различными уровнями параллелизма
- 21 конфигурация на СУБД × 3 повторения = **63 теста на СУБД**
- Общее количество тестов: **189 для трех СУБД**

КОНТРОЛЬ УСЛОВИЙ:

"Холодный" старт
Каждого теста

Мониторинг
Системных ресурсов

Фиксация условий
Состояние системы

Проверка
корректности
Выполнения операций

63
ТЕСТОВ НА СУБД
21 конфигурация × 3 повторения

Статистическая достоверность

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ:

- Трехкратное повторение каждого теста
- Расчет средних значений и стандартных отклонений
- Исключение выбросов при анализе данных
- Доверительные интервалы для ключевых метрик

КОНТРОЛЬНЫЕ ПРОВЕРКИ:

- Валидация результатов между повторными запусками
- Проверка согласованности метрик YCSB

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПРОВЕРКИ:

- Анализ системных логов на предмет ошибок
- Верификация целостности данных после тестов

ДОКУМЕНТИРОВАНИЕ:

ДЕТАЛЬНЫЕ ЛОГИ
Каждого запуска

КОНФИГУРАЦИИ
Воспроизводимость

ВРЕМЕННЫЕ МЕТКИ
Условия проведения

ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ
Результаты

СОБИРАЕМЫЕ МЕТРИКИ:

- Пропускная способность (ops/sec)
- Задержки (среднее, мин, макс, P95, P99)
- Системные метрики (CPU, память)
- Дисковый (I/O и сеть)

- Workload A-F
- 7 уровней threads
- 3 повторения
- Анализ результатов

189
ОБЩЕЕ КОЛИЧЕСТВО ТЕСТОВ
3 СУБД × 6 workload's × 7 threads × 3 повторения

17 / 25

АВТОМАТИЗАЦИЯ СБОРА РЕЗУЛЬТАТОВ

Python-скрипт для обработки данных

parse_ycsb.py
Автоматизированный парсинг результатов YCSB тестирования

ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ СКРИПТА:

- Автоматическое извлечение метрик из отчетов YCSB
- Парсинг различных форматов выходных данных
- Агрегация результатов по СУБД, workload'ам и потокам
- Расчет статистических показателей (среднее, медиана, стандартное отклонение)

СТРУКТУРА ВЫХОДНЫХ ДАННЫХ:

CSV-файлы
Агрегированные результаты для каждой СУБД

Сводные таблицы
Данные для сравнительного анализа

JSON-файлы
Интеграция с системами визуализации

ИЗВЛЕКАЕМЫЕ МЕТРИКИ:

ОБЩИЕ МЕТРИКИ

- Время выполнения (RunTime)
- Пропускная способность (Throughput, ops/sec)

МЕТРИКИ СБОРКИ МУСОРА

- G1 Young Generation (количество, время, %)
- G1 Old Generation (количество, время, %)

ОПЕРАЦИИ YCSB

- READ, UPDATE, INSERT, SCAN
- READ-MODIFY-WRITE, CLEANUP

ЗАДЕРЖКИ ОПЕРАЦИЙ

- Среднее значение (AverageLatency)
- Минимум и максимум
- Перцентили: P95, P99

ВСЕГО МЕТРИК
60+
параметров

ФОРМАТ ВЫВОДА
CSV
структура

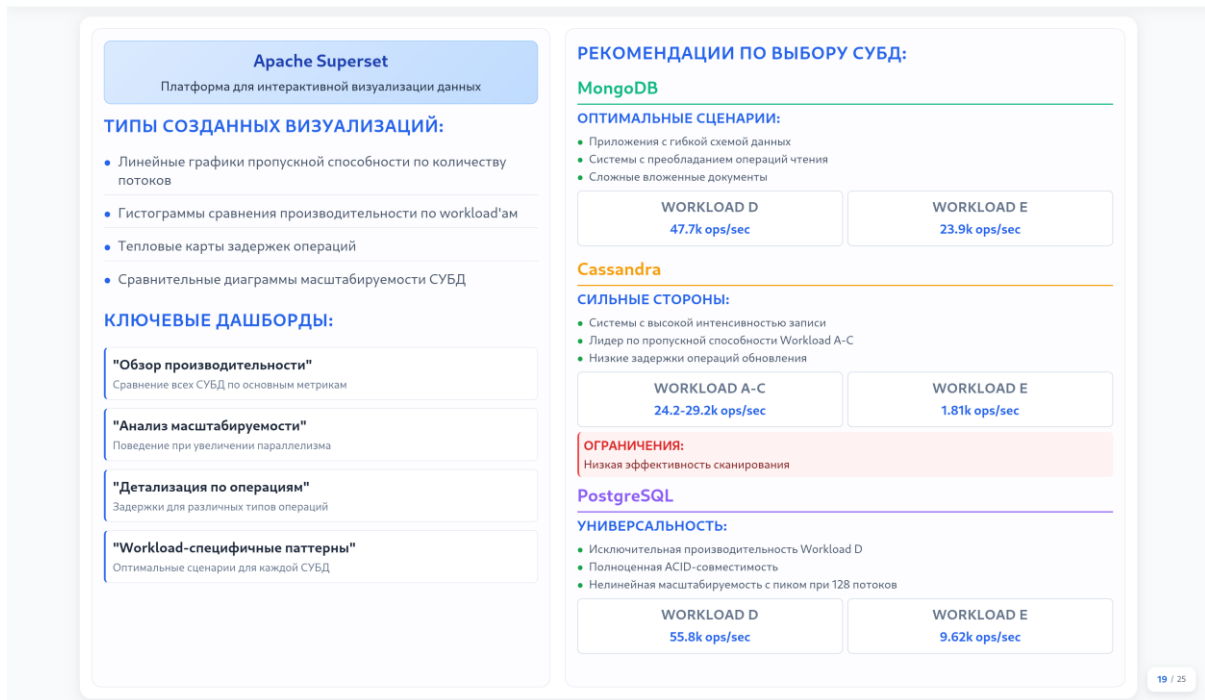
АВТОМАТИЗАЦИЯ
100%
процесса

ТОЧНОСТЬ
Микросекунды
(µs)

18 / 25

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Apache Superset дашборды

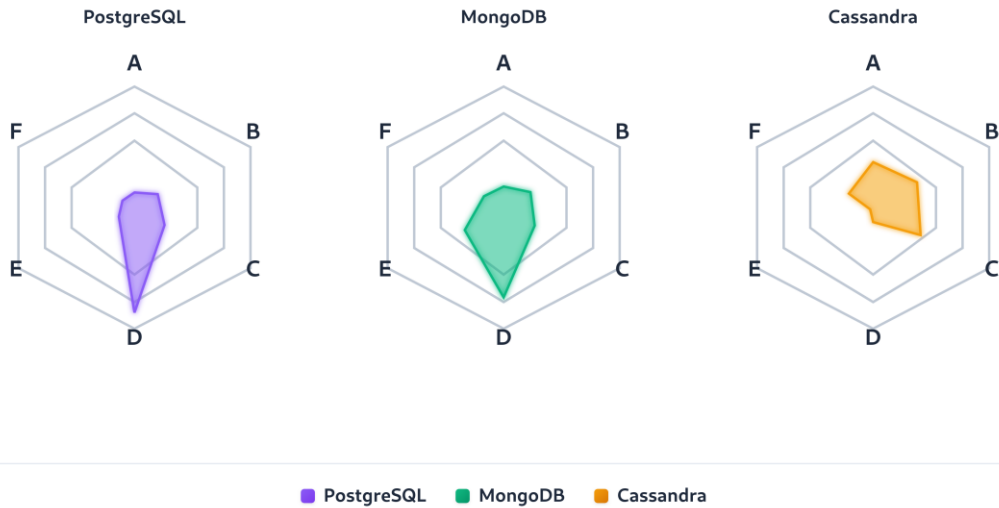


ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сравнительный анализ производительности

СТОЛБЧАТАЯ ДИАГРАММА

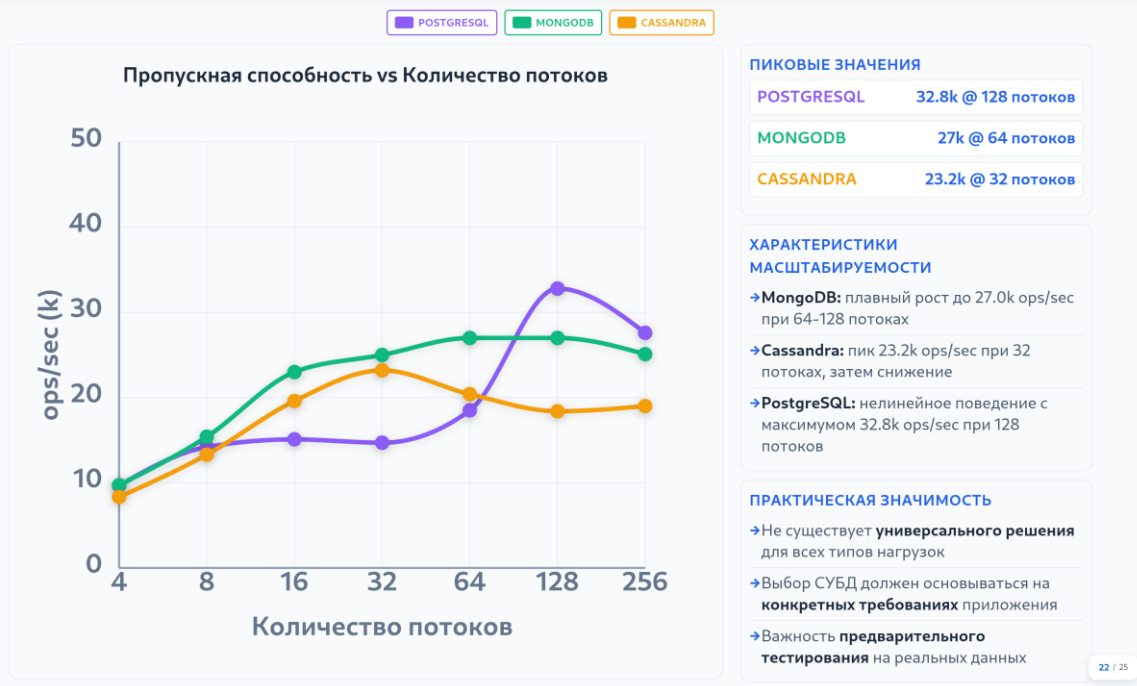
РАДАРНЫЕ ДИАГРАММЫ



21 / 25

МАСШТАБИРУЕМОСТЬ И ЗАДЕРЖКИ

Поведение при увеличении параллелизма



22 / 25

ПУБЛИКАЦИИ

Научные статьи и доклады

СТАТЬИ РИНЦ

4

1 Сравнительное исследование производительности графовой и документарной СУБД

Е.А. Кучин, Д.Ю. Уткин, Е.А. Елисева, Г.И. Ревунков

ИИАСУ '23

2023 СТАТЬЯ №4

2 Сравнительный анализ производительности субд postgresql, mongodb и cassandra с использованием бенчмарка ycsb

Е.А. Кучин, М.В. Виноградова

Парадигма

2025 СТАТЬЯ №5

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

2 2023-2025 РИНЦ
СТАТЬИ ПЕРИОД ИНДЕКСАЦИЯ

23 / 25

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ВКЛАД ИССЛЕДОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

НАУЧНЫЙ ВКЛАД



- ✓ Комплексное сравнение трех различных архитектурных подходов к СУБД
- ✓ Использование **реального большого датасета** (~12 ГБ) вместо синтетических данных
- ✓ **Стандартизированная методология** тестирования с обеспечением воспроизводимости
- ✓ Детальный анализ поведения при **различных уровнях параллелизма**

189

ПРОВЕДЕНО ТЕСТОВ

3

СУБД

6

WORKLOADS

7

УРОВНЕЙ ПОТОКОВ

12+

ГБ ДАННЫХ

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ



- ✓ **Обоснованные рекомендации** по выбору СУБД для конкретных сценариев
- ✓ Выявление **оптимальных конфигураций** для каждой системы
- ✓ Понимание **ограничений и особенностей** масштабирования
- ✓ Практические **метрики производительности** для принятия решений

30x

МАКСИМАЛЬНАЯ РАЗНИЦА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Cassandra

CRUD ЛИДЕР

PostgreSQL

WORKLOAD D

MongoDB

СКАНИРОВАНИЕ

100%

ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ

НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ



- ★ Тестирование в **распределенных конфигурациях**
- ★ Исследование влияния **различных типов данных**
- ★ Анализ поведения при **отказах и восстановлении**
- ★ Оценка **энергоэффективности** различных СУБД



ПОТЕНЦИАЛ РАЗВИТИЯ

Кластеры

РАСПРЕДЕЛЕННОСТЬ

Fault Tolerance

ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТЬ

Green IT

ЭКОЛОГИЧНОСТЬ

Big Data

МАСШТАБ ДАННЫХ

Исследование обеспечивает научно обоснованный подход к выбору СУБД для современных высоконагруженных систем

24 / 25

Спасибо!

ИУ5-44М, Кучин Е.А.



15 / 25