

## ОТЗЫВ

официального оппонента Пимонова Александра Григорьевича  
на диссертацию Казаковцева Владимира Львовича  
«Алгоритмы ускоренного поиска в векторных базах данных», представленную  
на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности  
2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

Для анализа представлены диссертация общим объемом 142 страницы  
и автореферат на 24 страницах текста. Основной текст диссертации включает  
введение, четыре главы и заключение.

### Актуальность темы исследования

Диссертация Казаковцева В.Л. направлена на повышение  
производительности алгоритмов приближенного поиска ближайших соседей  
за счет гибкого онлайн-регулирования глубины обработки данных,  
совершенствования алгоритмов кластерного анализа, используемых для  
построения индекса векторной базы данных, а также за счет использования  
новой меры расстояния при решении задачи кластерного анализа  
мультимодальных данных. Системы, построенные на основе приближенного  
поиска ближайших соседей – векторные системы управления базами данных  
– активно развиваются в связи с повсеместным использованием векторных  
представлений и ростом объемов обрабатываемых данных. Такие системы, как  
правило, являются расширениями традиционных реляционных систем  
управления базами данных (СУБД), которые изначально не были рассчитаны  
на обработку больших объемов данных. Несмотря на значительный прогресс  
в области приближенного поиска ближайших соседей, сохраняется дефицит  
эффективных методов поиска, пригодных для непосредственного  
использования в составе существующих векторных СУБД без необходимости  
существенного изменения их архитектуры. Решению этой проблемы и  
посвящена данная диссертационная работа.

### Общая характеристика работы

Диссертация выполнена в ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный  
университет», изложена на 142 страницах (включая два приложения).  
Основной текст состоит из введения, четырех глав и заключения. Во **введении**  
обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи, научная новизна,  
практическая значимость, описаны методы исследования и основные  
положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** соискателем приведен обзор современных методов  
и алгоритмов приближенного поиска ближайших соседей. Рассмотрен метод  
на основе инвертированного файла (IVF), способы его построения,  
рассмотрены другие подходы к организации приближенного поиска

ближайших соседей. В этой главе диссертантом изложены современные подходы к обработке мультимодальных данных.

Во **второй главе** автором предложен алгоритм поиска, динамически определяющий сложность входящего запроса на основе анализа количества кластеров, содержащих релевантные векторы на начальном этапе поиска. В зависимости от оценки результатов начальных этапов поиска алгоритм автоматически регулирует глубину поиска (число просматриваемых векторов).

В **третьей главе** приведены результаты исследования задачи улучшения качества кластеризации данных для построения более эффективного IVF-индекса в составе векторной СУБД. Ключевым вкладом стала разработка специализированной жадной агломеративной процедуры для кластеризации векторных представлений (эмбедингов).

В **четвёртой главе** соискателем предложен новый подход к кластеризации мультимодальных данных (например, пар «текст-изображение»). Вместо использования приведения данных к единому векторному пространству автор предлагает модель кластеризации на основе специальной меры расстояния – взвешенной комбинации расстояний между объектами в каждом отдельном модальном пространстве. Такой подход позволяет применять классические алгоритмы кластеризации (в том числе  $k$ -средних) непосредственно к исходным разнородным данным.

В **заключении** диссертантом приведены основные выводы и итоги работы, подтверждающие, что решение поставленных задач обеспечило достижение цели диссертации.

В **приложениях** представлены акты о внедрении результатов диссертационного исследования.

#### **Научная новизна проведенных исследований и полученных результатов**

Решение поставленных в диссертации задач соискателем достигнуто за счет отличающихся научной новизной следующих результатов исследования:

1. Предложен новый алгоритм классификации запросов по уровню сложности для приближенного поиска ближайших соседей с использованием IVF-индекса, позволяющий определять требуемую для достижения целевого показателя полноты область поиска, на основе числа результативных кластеров после начального этапа поиска.

2. Предложен новый адаптивный алгоритм поиска ближайших соседей в векторной базе данных на основе IVF-индекса, отличающийся от известных использованием классификатора сложности запросов на основе результатов предварительного поиска, использование которого позволяет повысить среднюю эффективность поиска.

3. Предложены новые эволюционные алгоритмы решения задачи  $k$ -средних, отличающиеся от известных оператором мутации, основанным на ускоренной жадной агломеративной процедуре, и позволяющие повысить точность решения задачи кластеризации.

4. Предложена новая модель кластеризации мультимодальных данных, которая, в отличие от известных моделей, позволяет напрямую, без приведения к единому векторному виду, применять алгоритмы кластеризации к мультимодальным данным.

#### **Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

В диссертационной работе корректно использованы открытые общедоступные наборы данных, применяемые в данной области. Автором проведен анализ современных алгоритмов приближенного поиска ближайших соседей и методов кластеризации применительно к задаче ускоренного поиска. Достоверность результатов подтверждается корректным использованием современных методов исследования и их проверкой в серии экспериментов.

Основные положения и результаты диссертации докладывались на международных конференциях и семинарах: CCRIS'2020, AISS'2021, HMMOCS'2022, HMMOCS'2024, IWMMMA'2025, Математическое моделирование и дискретная оптимизация (2026 г.)

#### **Значимость результатов, полученных в диссертационной работе**

*Теоретическая ценность* работы состоит в развитии методологии автоматической группировки объектов, совершенствовании подходов к поиску информации в векторных базах данных, а также в развитии моделей и методов кластерного анализа для работы с мультимодальными данными, включая обработку больших объемов разнородной информации.

*Практическая значимость.* Предложенные автором модели и алгоритмы предназначены для решения задач группировки объектов и поиска данных в информационных системах, работающих с разнородными наборами данных. Разработанные эволюционный алгоритм построения индекса и адаптивный алгоритм приближенного поиска ближайших соседей (включая классификатор сложности запросов) позволяют эффективно обрабатывать векторные базы данных, содержащие сотни миллионов объектов, снижая долю ошибок при поиске. Кроме того, введенная мера расстояния для мультимодальных данных дает возможность вычислять расстояния между разнородными объектами, адаптировать классические алгоритмы кластеризации к таким данным.

### Замечания по диссертационной работе

2. В алгоритмах 2.1 (с. 66) и 2.2 (с. 68) параметр  $n_{minchecked}$  (минимальное число обрабатываемых кластеров) выбирается эвристически – «сканирования  $n_{minchecked}$  кластеров должно быть достаточно для достижения требуемого значения Recall примерно для четверти запросов» (стр. 69). Однако в экспериментах  $n_{minchecked}$  фиксируется как 40 (для SIFT10M, с. 70) без объяснения, как именно подбиралось это значение для разных наборов данных. Отсутствует анализ чувствительности результатов к выбору значения параметра  $n_{minchecked}$ .

1. Во второй главе для сравнения адаптивного алгоритма со стандартным IVF используется критерий Манна-Уитни-Уилкоксона (с. 74), однако в других экспериментах (главы 3 и 4) статистическая значимость преимущества новых алгоритмов либо не приведена, либо приведена выборочно. В таблицах 3.1-3.8 для некоторых наборов данных (например, ИЕРС) новый алгоритм не показывает преимущества, но отсутствует формальная проверка, является ли различие незначимым или же алгоритм работает хуже.

3. В разделе 3.5 предлагается упрощенная агломеративная процедура, которая удаляет кластеры наименьшей мощности без точного вычисления прироста целевой функции. В таблицах 3.9-3.11 она сравнивается только с многократным запуском  $k$ -средних. Однако не проведено сравнение с классической агломеративной эвристикой (алгоритм 3.2, с. 82) или с эволюционным алгоритмом  $(1 + \lambda)$  (с. 84) на тех же данных. Неясно, является ли ускорение следствием аппроксимации или же просто меньшего числа итераций.

4. В работе подробно описываются алгоритмы (классификатор сложности, адаптивный поиск, эволюционная кластеризация, мультимодальное расстояние), но ни для одного из них не приведена оценка вычислительной сложности в нотации «O большое». Например, для адаптивного поиска (алгоритм 2.2) сложность зависит от значения *probe*, которое меняется динамически, но нет верхней оценки. Для эволюционного алгоритма (3.4) не указана сложность одной итерации с учетом жадной агломеративной процедуры. Это затрудняет теоретическое сравнение с аналогами.

Сделанные замечания не снижают научной и практической ценности проведенного диссертационного исследования и не влияют на общую положительную оценку.

### Заключение о соответствии диссертации требованиям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

Диссертация Казаковцева В.Л. является завершенной научно-квалификационной работой, самостоятельно выполненной на актуальную

тему и на высоком научном уровне. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения достаточно обоснованы. Автореферат соответствует содержанию диссертации, а ее основные положения опубликованы в научных работах. Результаты исследования направлены на решение важной практической задачи – повышение точности и вычислительной эффективности алгоритмов приближенного поиска ближайших соседей.

Считаю, что представленная диссертация соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Казаковцев Владимир Львович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Официальный оппонент,  
заведующий кафедрой  
прикладных информационных  
технологий ФГБОУ ВО  
«Кузбасский государственный  
технический университет  
имени Т. Ф. Горбачёва»,  
доктор технических наук,  
профессор

19.05.26

Пимонов Александр  
Григорьевич

Докторская диссертация защищена по специальности 05.13.16 – Применение вычислительной техники, математического моделирования и математических методов в научных исследованиях (по отраслям наук).

Адрес: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28.

Телефон / факс: (3842) 39-69-60.

E-mail: pag\_vt@kuzstu.ru.

Веб-сайт: kuzstu.ru.