

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.224.01,
созданного на базе Федерального государственного учреждения
Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»
Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН), по диссертации
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 14 марта 2023 № 7

О присуждении Коротину Александру Андреевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Параметрические методы вычисления оптимальных транспортных отображений, расстояний и барицентров» по специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» принята к защите 20 декабря 2022 г., протокол № 24, диссертационным советом 24.1.224.01 на базе Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук» (ФИЦ ИУ РАН), 119333, Москва, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2, приказ Министерства образования и науки Российской Федерации № 747/нк от 22 июня 2016 г.

Соискатель Коротин Александр Андреевич, 1994 года рождения, в 2018 году окончил очную магистратуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» по направлению подготовки 01.04.02 «Прикладная математика и информатика». В 2018 г. Коротин Александр Андреевич поступил в очную аспирантуру Автономной некоммерческой образовательной организации высшего профессионального образования «Сколковский институт науки и технологий» по направлению 09.06.01 «Информатика и вычислительная техника». В 2022 году окончил

аспирантуру с присвоением квалификации «Исследователь. Преподаватель-исследователь» и сдал кандидатский экзамен по специальности 1.2.2 - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2022г. Автономной некоммерческой образовательной организацией высшего образования «Сколковский институт науки и технологий».

В период подготовки диссертации соискатель Коротин Александр Андреевич работал в Автономной некоммерческой образовательной организации высшего образования «Сколковский институт науки и технологий» в должности стажера-исследователя (основное место работы), а также участвовал в качестве исполнителя в научных грантах, выполняемых на базе Автономной некоммерческой образовательной организацией высшего образования «Сколковский институт науки и технологий».

Диссертация выполнена в Центре прикладного искусственного интеллекта Автономной некоммерческой образовательной организации высшего образования «Сколковский институт науки и технологий».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, доцент Бурнаев Евгений Владимирович, профессор, руководитель Центра прикладного искусственного интеллекта Автономной некоммерческой образовательной организации высшего образования «Сколковский институт науки и технологий».

Официальные оппоненты:

1. Орлов Юрий Николаевич, доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник Отдела №6 Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша Российской академии наук».

Отзыв оппонента **положительный**, имеются следующие замечания по диссертации:

- 1) В главе 2.6.7 для решения задачи непарного переноса стиля автор приводит качественный результат работы метода. Было бы интересно посмотреть на

количественные метрики и сравнения с альтернативными методами для решения данной задачи.

- 2) В главе 4.4.1 количественно оценивается насколько хорошо метод вычисляет стационарное распределение. При этом не поясняется, как быстро сходится градиентный поток к этому распределению с теоретической точки зрения.
- 3) В синтетических экспериментах (например, разделы 2.6.2 или 3.6.1) приведены полученные транспортированные распределения, но не показано, как выглядит само вычисленное транспортное отображение.
- 4) Для предложенного метода вычисления градиентного потока детально проанализирована вычислительная сложность (Табл. 11), но для методов глав 2 и 3 автор ограничивается лишь кратким описанием их сложности (стр. 30). Для полноты картины стоило сделать для них аналогичные таблицы.
- 5) В главе 4 автор моделирует градиентные потоки функционала свободной энергии Фоккера-Планка. По всей видимости, методология автора легко обобщается и на некоторые другие функционалы, о чем автор пишет на стр. 88, однако, не приводит конкретных примеров.
- 6) В диссертации исследуются OT отображения, барицентры и W2 градиентные потоки, однако в названии отражены только первые два пункта.
- 7) В диссертации автор работает с вероятностными мерами, но зачастую использует как термин “мера”, так и “распределение”. Для единообразности изложения в разных главах стоит использовать только один из терминов.
- 8) В главе 5 для обозначения численных методов оптимального транспорта используется термин “решатель OT”, что, видимо, является переводом фразы “OT solver”, используемой в англоязычной литературе. Считаю, что термин не удачный, лучше было обойтись без него.

2. Ватолин Дмитрий Сергеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, руководитель лаборатории «Компьютерной графики и мультимедиа» факультета вычислительной математики и кибернетики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова».

Отзыв оппонента **положительный**, имеются следующие замечания по диссертации:

- 1) Понятие Beta-гладкости функции впервые используется в теоремах главы 2 работы, а формально вводится только в главе 3 в теореме 3.6.3.
- 2) В работе автор оперирует с градиентами выпуклых функций, неявно предполагая, что они существуют. Для прозрачности автору следовало сослаться на классические результаты выпуклого анализа, объясняющие почти всюду дифференцируемость выпуклых функций.
- 3) При определении градиентных потоков (главы 1, 4) в работе не упоминаются вопросы их существования или единственности. Хотя эти вопросы обсуждаются в приведенных в работе литературных источниках, автору стоило бы обсудить их непосредственно в работе
- 4) В предложенных алгоритмах (главы 2, 3, 4) требуются специфические архитектуры нейронных сетей (выпуклые по входу). Такие архитектуры за счет встроенных ограничений могут быть субоптимальными при решении задач моделирования. Это обсуждается в работе в главе 5, но было бы осмысленно упомянуть об этом ранее, например, в главе 2, где представлены первые эксперименты с такими архитектурами.
- 5) В разделе 2.6.7 (перенос стилей между наборами изображений) при использовании предложенного метода ОТ фактически используется попиксельная L2 функция как метрика близости входного и выходного изображения. Такая метрика может неточно показывать семантическую близость изображений. Здесь интересно было бы осуществлять ОТ в

скрытом пространстве автокодировщика (аналогично разделу 2.6.6), т.к. L2 между латентными кодами представляется более осмысленной метрикой близости изображений.

- 6) В разделах 2.6.4 и 3.6.3 (перенос цвета между двумя/тремя изображениями) ОТ осуществляется на цветовых RGB палитрах 3D изображений. Хотелось бы увидеть, как метод будет работать в случае, когда рассматриваются не изображения, а глубокие карты признаков, например, полученные предобученной VGG-16 нейронной сетью.

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» – в своем **положительном** отзыве, подписанном Гасниковым Александром Владимировичем, доктором физико-математических наук, доцентом, заведующим кафедрой математических основ управления, указала, что «Существенных замечаний по работе нет. Дополнительно в заключении работы интересно было бы увидеть более подробное обсуждение, как методы, разработанные в данной работе для Вассерштейн-2 метрики, могут быть адаптированы для применения к вычислению оптимального транспорта с более общими функциями транспортной стоимости.

Диссертация Коротина А.А. «Параметрические методы вычисления оптимальных транспортных отображений, расстояний и барицентров» выполнена на высоком научном уровне, представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, посвящённую актуальной и активно развивающейся тематике, соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней».

Диссертант Коротин А.А. заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв ведущей организации обсужден и одобрен на расширенном заседании кафедры математических основ управления Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» 20 января 2023г., протокол №4.

Соискатель имеет 5 опубликованных научных работ по теме диссертации, в том числе 5 работ в трудах ведущих международных конференций по машинному обучению и искусственному интеллекту уровня A* по рейтингу CORE, 2 из них в изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus. Недостоверных сведений об опубликованных соискателем работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, не обнаружено. Диссертация не нарушает п. 14 Положения о присуждении ученых степеней. Автор указал личный вклад в опубликованные с соавторами работы.

Список публикаций:

1. Korotin, A., Li, L., Genevay, A., Solomon, J. M., Filippov, A., & Burnaev, E. Do neural optimal transport solvers work? a continuous wasserstein-2 benchmark // Advances in Neural Information Processing Systems. — 2021. — Vol. 34. — P. 14593—14605.
2. Mokrov, P., Korotin, A., Li, L., Genevay, A., Solomon, J. M., & Burnaev, E. Large-scale wasserstein gradient flows // Advances in Neural Information Processing Systems. — 2021. — Vol. 34. — P. 15243—15256.
3. Korotin, A., Egiazarian, V., Asadulaev, A., Safin, A., & Burnaev, E. Wasserstein-2 Generative Networks // International Conference on Learning Representations. — 2021. [Электронный ресурс] URL: https://openreview.net/pdf?id=bEoxzW_Exsa (дата обращения 29.11.2022)
4. Korotin, A., Li, L., Solomon, J., & Burnaev, E. Continuous Wasserstein-2 Barycenter Estimation without Minimax Optimization // International Conference on Learning Representations. — 2021. [Электронный ресурс] URL: <https://openreview.net/pdf?id=3tFAs5E-Pe> (дата обращения 29.11.2022)

5. Rout, L., Korotin, A., & Burnaev, E. Generative Modeling with Optimal Transport Maps // International Conference on Learning Representations. — 2022. [Электронный ресурс] URL:
<https://openreview.net/pdf?id=5JdLZg346Lw> (дата обращения 29.11.2022)

На автореферат поступило три положительных отзыва, которые подписали:

1. Наумов Алексей Александрович, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий международной лабораторией стохастических алгоритмов и анализа многомерных данных факультета компьютерных наук Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики».

Замечания:

- 1) По автореферату имею одну методологическую рекомендацию: некоторые экспериментальные результаты описаны кратко, а акцент сделан на теоретических результатах и предложенных алгоритмах. Возможно, стоило включить чуть больше иллюстративных экспериментальных примеров работы предложенных алгоритмов. Существенных замечаний по содержанию и стилистике автореферата не имею.
2. Дмитрий Петрович Николаев, кандидат физико-математических наук, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией 11 «Зрительные системы» Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук» (ИППИ РАН). Замечания:
 - 1) Отсутствие в автореферате перечисления основных результатов всего диссертационного исследования (стр. 22).
 - 2) Незначительные опечатки как, например, “... позволяют решать ряд задач математического моедирования ...” (стр. 6), “... оптимизируется неманимаксный критерий...” (стр. 12, стр. 13).

3) В редких случаях встречающееся использование нестрогих терминов, как, например, «... на основе глубоких *нейросетей* ... (стр. 3)» или «Вычисление оптимального транспорта с квадратичной *ценой*» (стр. 10).

3. Базенков Николай Ильич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук. Замечания:

1) Из замечаний можно отметить, что несмотря на очевидную прикладную значимость предложенных алгоритмов, в автореферате нет примеров их апробации на сложных реальных данных. Это замечание не умаляет высокое качество работы и важность полученных результатов.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их компетентностью в области современных методов оптимизации и методов математического моделирования, в том числе численных методов оптимального транспорта и построения генеративных моделей на основе глубоких нейронных сетей, что подтверждается их исследованиями и публикациями в высокорейтинговых научных изданиях.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- **Разработан** новый численный метод на основе новой двойственной формулировки ОТ для поиска Васерштейн-2 оптимальных отображений между непрерывными распределениями с помощью нейросетей; **получены** теоретические оценки того, как связаны ошибки аппроксимации решений предложенной двойственной и исходной задач.
- **Разработан** новый численный метод на основе новой двойственной формулировки ОТ для поиска Васерштейн-2 барицентров семейства непрерывных распределений с помощью нейронных сетей; **получены** теоретические оценки того, как связаны ошибки аппроксимации решений предложенной двойственной и исходной задач.

- **Разработан** новый численный метод для моделирования Васерштейн-2 градиентных потоков функционалов на пространстве распределений на основе дискретизации времени и нейронных сетей.
- **Впервые разработана** методология для количественного сравнения непрерывных методов ОТ; **предложена** и математически обоснована новая методология создания эталонных пар непрерывных распределений с аналитически известным Васерштейн-2 ОТ отображением.

Алгоритмы, методы и оценки, полученные в первых трех пунктах, позволили расширить класс задач математического моделирования, решаемых с использованием численных методов оптимального транспорта на основе нейронных сетей. Разработанная в пункте 4 методология позволила устранить имеющийся пробел в тестировании непрерывных методов решения задачи ОТ и исследования математических моделей, на которых они основаны.

Теоретическая значимость проведенных исследований заключается в том, что предложенные новые подходы на основе нейронных сетей и численных методов ОТ позволяют эффективно решать ряд задач математического моделирования, избавляясь от недостатков существующих подходов таких как использование численно нестабильной минимаксной оптимизации или наличие систематических ошибок в решении. Принципиальной особенностью предложенных подходов является то, что разработанные в работе решения не требуют минимаксной оптимизации и не смещают оптимальное решение задачи, что приводит к более вычислительно эффективному и точному нахождению решения по сравнению с существующими численными методами ОТ на основе нейронных сетей. В частности, эти улучшения значительно упрощают теоретический анализ полученных решений, и, как следствие, позволяют выводить оценки ошибки оптимизации по ограниченному классу функций, например, представленному нейросетями.

Практическая значимость проведенных исследований заключается в том, что предложенные подходы математического моделирования на основе

нейронных сетей и численных методов ОТ имеют потенциал для решения практически важных научно-исследовательских и индустриальных задач. Например, разработанный автором метод, протестированный в задачах переноса домена на модельных данных, имеет ряд потенциальных приложений в задачах компьютерного зрения, таких как обучение моделей для улучшения разрешения изображений, устранения шума и пр. Разработанные в диссертации новые методы уже используются в исследованиях других специалистов.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- достоверность теоретические результаты работы обоснована наличием математически строгих и корректных доказательств;
- результаты работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях и прошли апробацию на ведущих международных высокорейтинговых профильных научных конференциях;
- воспроизводимость экспериментальных результатов обеспечивается наличием программного кода и полным описанием деталей экспериментов в диссертации;
- теоретические результаты согласуются с результатами экспериментов.

Личный вклад соискателя состоит в:

- разработке новых численных методов и алгоритмов;
- формулировке и доказательстве теоретических обоснований;
- проведении численных экспериментов и обработке их результатов;
- подготовке научных публикаций по полученным результатам.

Соискатель Коротин А.А. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию, удовлетворившую авторов вопросов.

На заседании «14» марта 2023 года диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением

Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013г., и принял решение присудить Коротину А.А. ученую степень кандидата физико-математических наук за решение научной задачи построения новых методов генеративного моделирования на основе численных методов оптимального транспорта, имеющей значение для широкого класса задач машинного обучения и их приложений.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 36 человек, из них 9 докторов наук по специальности защищаемой диссертации, участвовавших в заседании, из 45 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение ученой степени 36, против присуждения ученой степени 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель
диссертационного совета 24.1.224.01
д.т.н., профессор, академик РАН

Ю.С. Попков

Ученый секретарь диссертационного
совета 24.1.224.01
к.ф.-м.н., доцент

И.В. Смирнов



«14» мая 2023 г.