

УТВЕРЖДАЮ
Ректор Сколковского института науки и технологий,
доктор технических наук, академик РАН, профессор
А.П. Кулешов



август 2022 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автономной некоммерческой образовательной организации высшего образования
«Сколковский институт науки и технологий»

Диссертация «Восстановление изображений с помощью обучаемых оптимизационно-нейросетевых алгоритмов» прошла апробацию на заседании программного комитета программы аспирантуры «Вычислительные системы и анализ данных в науке и технике» Сколковского института науки и технологий (Сколтех).

В период подготовки диссертации с 2018 г. по настоящее время соискатель **ПРОНИНА Валерия Сергеевна** обучалась в очной аспирантуре Автономной некоммерческой образовательной организации высшего образования «Сколковский институт науки и технологий» по специальности 05.13.18 (1.2.2) «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» по направлению 09.06.01 «Информатика и вычислительная техника». Работала в центре технологий искусственного интеллекта Сколтеха в должности стажера-исследователя.

В 2017 г. Пронина В.С. с отличием окончила магистратуру Московского Государственного Технического Университета имени Н.Э. Баумана по направлению подготовки 12.04.04 – Биотехнические системы и технологии.

Справка с результатами сдачи кандидатских экзаменов выдана в 2022 г. в Автономной некоммерческой образовательной организации высшего образования «Сколковский институт науки и технологий».

Научный руководитель – Ph.D. Дмитрий Владимирович Дылов. Основное место работы – Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Сколковский институт науки и технологий», доцент центра технологий искусственного интеллекта Сколтеха.

По итогам обсуждения диссертации «Восстановление изображений с помощью обучаемых оптимизационно-нейросетевых алгоритмов» *принято следующее заключение.*

Актуальность работы. Классический аппарат математического моделирования не позволяет решать некорректно поставленные обратные задачи восстановления изображений в случае отсутствия априорной (регуляризирующей) информации о данных. Существующие схемы регуляризации реализуют ограниченные в своей точности решения в силу того, что используют приближённые модели для аппроксимации априорных параметров. Восстановление изображений – проблема, играющая ключевую роль во многих приложениях. Поэтому для качественного анализа изображений и минимизации возможной ошибки, например, при постановке диагноза, необходимо, чтобы изображения как можно точнее соответствовали искомому объекту. Классические оптимизационные методы, однако, не обеспечивают необходимое качество полученного решения задачи восстановления изображений.

В то же время, с развитием технологий машинного обучения, в частности, глубокого обучения, решения многих проблем восстановления изображений были получены с использованием свёрточных нейронных сетей. Такие решения представляют собой результат обучения параметров моделей, непосредственно переводящих полученное искажённое

изображение в ожидаемый результат реконструкции. Основным недостатком такого подхода является отсутствие у обучаемой модели информации о физическом процессе формирования изображения. Из этого следует, что **актуальным** является создание метода, объединяющего в себе *классическое решение обратной задачи и тренируемых моделей*. Первое призвано учитывать особенности физического процесса формирования изображений, в то время как вторые позволяют получить наиболее полную оценку регуляризационных параметров на основе имеющихся данных.

Целью диссертационной работы является разработка методов и алгоритмов математического моделирования для решения обратных задач восстановления изображений. Разработанные схемы должны объединять в себе достоинства классических алгоритмов решения обратных задач и новых алгоритмов глубокого обучения. Также необходимо создание комплекса программ, реализующего разработанные алгоритмы.

Для достижения вышеупомянутой цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Разработка серии алгоритмов восстановления изображений, полученных с помощью микроскопа с известной функцией рассеяния точки. Разработанные алгоритмы должны включать регуляризацию решения, аппроксимированную с помощью тренируемых моделей.

2. Обучение набора нейронных сетей, осуществляющих решение задачи п.1, и публикация их в открытом доступе.

3. Разработка алгоритмов восстановления изображений, полученных с помощью микроскопа, при отсутствии информации о функции размытия точки. Вычисление функции размытия точки должно быть осуществлено с помощью современных алгоритмов глубокого обучения.

4. Разработка алгоритма восстановления многоканальных (гиперспектральных) изображений, полученных методом однопиксельной визуализации. Регуляризационный член в решении должен быть аппроксимирован с помощью нейронной сети.

5. Исследование методов разделения сигнала, полученного с помощью спектральной компьютерной томографии, на отдельные для каждого составляющего материала изображения. Разработка решения задачи декомпозиции материалов с помощью нейронных сетей.

Основные результаты диссертации:

1. Разработан набор из 4-х последовательно усложнённых схем аппроксимации регуляризационного члена в решении задачи восстановления изображений, полученных с помощью микроскопа.

2. Показано, что объединение оптимизационного алгоритма восстановления изображений и нейросетевого подхода к аппроксимации регуляризационного члена позволяет получать более высокие метрики реконструкции, чем при использовании указанных подходов по отдельности.

3. Обучены и опубликованы оригинальные нейросетевые модели для восстановления изображений, искажённых гауссовским и пуассоновским шумами.

4. Разработан алгоритм, реализующий итеративную схему совместного поиска искомого изображения, полученного с помощью микроскопа, и функции рассеяния точки микроскопа. Вычисление параметров функции рассеяния точки осуществлено с помощью тренируемых агентов.

5. Разработан алгоритм восстановления гиперспектральных изображений, полученных методом однопиксельной визуализации, в котором нейронная сеть применена для регуляризации решения в пространственной и спектральной областях.

6. Показано, что регуляризация решения в пространственной и спектральной областях в задаче восстановления гиперспектральных изображений приводит к лучшим результатам реконструкции благодаря межканальной корреляции.

7. Исследованы методы разделения сигналов, полученных с помощью спектральной компьютерной томографии. Также предложено использование нейронной сети для разделения сигналов как в области изображений, так и в области проекций (синограмм).

Все *результаты диссертации получены лично соискателем* или при его непосредственном участии при научном руководстве Ph.D. Дмитрия Владимировича Дылова.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан новый метод аппроксимации регуляризационного члена в решении задачи восстановления изображений, полученных с помощью микроскопа, с использованием тренируемых моделей. В том числе разработан новый алгоритм аппроксимации индивидуального для каждого пикселя регуляризационного члена.

2. Предложены и опубликованы оригинальные нейросетевые модели для восстановления изображений на основе комбинации классических оптимизационных схем (фильтр Винера, алгоритм Ричардсона-Люси) и тренируемых моделей аппроксимации регуляризационного члена.

3. Разработан новый метод восстановления многоканальных изображений, полученных с помощью однопиксельной камеры, с использованием композиции нейронных сетей. В основе метода лежит комбинация классического решения обратной задачи и тренируемой модели регуляризации решения в пространственной и спектральной областях.

4. Разработан новый метод восстановления функции рассеяния точки микроскопа путём поиска оптимальных параметров математической модели функции с помощью алгоритма обучения с подкреплением.

Практическая ценность результатов диссертации заключается в том, что в работе рассмотрены задачи восстановления изображений, актуальные для различных областей науки и техники. В том числе полученные автором результаты имеют научно-практическую ценность для задач анализа медико-биологических изображений. Некоторые предложенные в работе методы и модели опубликованы в открытом доступе.

Обоснованность и достоверность результатов и выводов.

Выводы диссертации обоснованы аналитическими расчётами и подтверждены данными воспроизводимых экспериментов на основе разработанных алгоритмов. Теоретическую и методологическую основу проведённых исследований составили труды отечественных и зарубежных авторов в области восстановления изображений. Для анализа полученных результатов применены показатели качества, традиционно используемые для оценки решения задач восстановления изображений. Результаты, полученные в процессе подготовки диссертации, были представлены на международных научных конференциях и опубликованы в рецензируемых научных изданиях.

Материалы диссертации опубликованы автором достаточно полно в следующих работах:

1. **[Индексируется в Scopus]** Microscopy Image Restoration with Deep Wiener-Kolmogorov Filters / **Valeriya Pronina**, Filippos Kokkinos, Dmitry V. Dylov, Stamatios Lefkimmatis // Computer Vision – ECCV 2020. – 2020. – 185–201. – DOI: 10.1007/978-3-030-58565-5_12.
2. **[Индексируется в Web of Science, Scopus]** 3d Denoised Completion Network for Deep Single-Pixel Reconstruction of Hyperspectral Images / **Valeriya Pronina**, Antonio L. Mur, Juan F.P.J. Abascal, Françoise Peyrin, Dmitry V. Dylov, Nicolas Ducros // Optics Express. – 2021. – Т. 29, No 24. – 39559 – 39573. – DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.443134>.
3. **[Индексируется в Web of Science, Scopus]** Material Decomposition in Spectral CT Using Deep Learning: A Sim2rReal Transfer Approach / Juan F.P.J. Abascal, Nicolas Ducros, **Valeriya Pronina**, Simon Rit, Pierre-Antoine Rodesch, Thomas Broussaud, Suzanne Bussod, Philippe C. Douek, Andreas Hauptmann, Simon Arridge, Françoise Peyrin // IEEE Access. – 2021. – Т. 9. – 25632 – 25647. – DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3056150.
4. **[Индексируется в Web of Science, Scopus]** Material Decomposition Problem in Spectral CT: a Transfer Deep Learning Approach / Juan F.P.J. Abascal, Nicolas Ducros, **Valeriya Pronina**, Suzanne Bussod, Andreas Hauptmann, Simon Arridge, Philippe C. Douek,

Francoise Peyrin // Proceedings of the 2020 IEEE 17th International Symposium on Biomedical Imaging Workshops. – 2020. – DOI: 10.1109/ISBIWorkshops50223.2020.9153440.

5. [Индексируется в Web of Science, Scopus] Deep Learning Framework for Mobile Microscopy / Anastasiia Kornilova, Mikhail Salnikov, Olga Novitskaya, Maria Begicheva, Egor Seviugov, Kirill Shcherbakov, **Valeriya Pronina**, Dmitry V. Dylov // Proceedings of the 2021 IEEE 18th International Symposium on Biomedical Imaging. – 2021. – DOI: 10.1109/ISBI48211.2021.9434133.

Личный вклад соискателя в работах с соавторами заключается в следующем:

В работе [1] автором были разработаны методы обучения регуляризационных фильтров, их аппроксимации с помощью нейронной сети, а также метод моделирования регуляризационного члена целиком с помощью нейронной сети и алгоритм получения решения. Все экспериментальные результаты были получены автором самостоятельно. В работе [2] автором был разработан метод, обобщающий решение задачи восстановления изображений, полученных с помощью однопиксельной камеры, для случая многоканальных изображений. Также автором был разработан метод генерирования многоканальных изображений из RGB-изображений, подготовлен тренировочный набор данных, обучен набор нейронных сетей и собраны и проанализированы результаты экспериментов. В работах [3] и [4] автором были разработаны алгоритмы разделения изображений спектральной КТ на изображения составных материалов с использованием нейронной сети. Автор участвовала в сборе и подготовке тренировочных данных, а также в проведении экспериментов. В работе [5] автором было предложено использование метрики оценки безреференсного восстановления изображений с различным фокусом.

Основные результаты работы докладывались на следующих научных конференциях и семинарах:

1. Applied Inverse Problems Conference, доклад “Nonlinear material decomposition in spectral CT using deep learning” JFPJ Abascal, 8-12 июля 2019.
2. 16th European Conference on Computer Vision (ECCV), постер “Microscopy Image Restoration with Deep Wiener-Kolmogorov Filters”, Пронина Валерия, 23-28 августа 2020.
3. 2020 IEEE 17th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI), доклад “Material decomposition in spectral CT using deep learning”, JFPJ Abascal, 3-7 апреля 2020.
4. Научный семинар в Институте Вычислительной Математики им. Г.И. Марчука РАН, доклад “Восстановление изображений с помощью обучаемых алгоритмов реконструкции”, Пронина Валерия, 15 февраля 2022.
5. Научный семинар в Институте Автоматики и Электрометрии Сибирского отделения РАН, доклад “Восстановление изображений с помощью обучаемых алгоритмов реконструкции”, Пронина Валерия, 4 апреля 2022.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.2.2 – *Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ*, в частности, пунктам:

- п.1 – Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений;
- п.3 – Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий;
- п.4 – Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

Диссертация «Восстановление изображений с помощью обучаемых оптимизационно-нейросетевых алгоритмов» **ПРОНИНОЙ Валерии Сергеевны** рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности **1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ**.

Заключение принято на заседании программного комитета программы аспирантуры «Вычислительные системы и анализ данных в науке и технике» Автономной некоммерческой

образовательной организации высшего образования «Сколковский институт науки и технологий» «20» июня 2022 г., протокол № 2.

Присутствовало на заседании 5 членов программного комитета. Результаты голосования: «за» – 5 человек, «против» – 0 человек, «воздержалось» – 0 человек.

Председатель программного комитета
программы аспирантуры «Вычислительные
системы и анализ данных в науке и технике»
Сколковского Института Науки и Технологий
д.ф-м.н., проф.
Николай Васильевич Бриллиантов

A handwritten signature in blue ink is written over a horizontal line. The signature is stylized and appears to be the name of the signatory, likely Nikolai Vasilievich Briliantov.