

Заключение диссертационного совета МГУ.012.1  
по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук  
Решение диссертационного совета от «12» мая 2026 г. № 14

О присуждении Борзунову Андрею Анатольевичу, гражданину РФ, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Восстановление трехмерной информации в сканирующей электронной микроскопии при детектировании обратно-рассеянных электронов» по специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ принята к защите диссертационным советом МГУ.012.1 09.04.2026 г. протокол № 12.

Соискатель Борзунов Андрей Анатольевич 1993 года рождения, проходил обучение в очной аспирантуре физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова на кафедре математики отделения прикладной математики в период с 01.10.2017г. по 30.09.2021 г.; был прикреплен к кафедре математики отделения прикладной математики физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова для подготовки диссертации с 01.11.2025 г. по 31.01.2026 г.

Соискатель работает старшим разработчиков в группе моделирования материалов, кластера индустриальных процессов, АО «Северсталь-инфоком».

Диссертация выполнена на кафедре математики, отделения прикладной математики, физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, доцент Лукьяненко Дмитрий Витальевич, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра математики отделения прикладной математики, профессор.

Официальные оппоненты:

- Шишленин Максим Александрович, доктор физико-математических наук, профессор РАН, Институт математики им. С.Л. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория прикладных обратных задач, главный научный сотрудник.
- Гайнуллин Иван Камилевич, доктор физико-математических наук, доцент, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, отделение радиофизики и электроники, кафедра физической электроники, доцент.

- Зайцев Сергей Иванович, доктор физико-математических наук, Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук, лаборатория теоретической физики, главный научный сотрудник.

дали положительные отзывы на диссертацию.

Выбор официальных оппонентов обосновывался их высокой научной компетентностью в ключевых для диссертационного исследования областях: теории обратных и некорректно поставленных задач, вычислительной математике и математическом моделировании, а также в физической электронике и физике взаимодействия электронных пучков с веществом. Все оппоненты специализируются на тематиках, непосредственно соответствующих представленной работе, объединяющей разработку математических моделей, численных методов и прикладного программного комплекса для сканирующей электронной микроскопии. За последние пять лет оппонентами опубликован ряд работ в ведущих рецензируемых научных изданиях по численным методам решения обратных задач математической физики, регуляризации некорректных задач, а также по моделированию процессов формирования сигнала и взаимодействия электронов с поверхностью твёрдых тел. Совокупность научных квалификаций оппонентов покрывает все основные аспекты диссертационного исследования от постановки обратных задач восстановления топографии и томографии микро образцов до их численной реализации и физической интерпретации результатов.

Соискатель имеет 4 (четыре) опубликованные работы, в том числе по теме диссертации 4 (четыре) работы, из них 4 (четыре) статьи, опубликованные, в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук.

- Borzunov A.A., Karaulov V.Y., Koshev N.A., Lukyanenko D.V., Rau E.I, Yagola A.G., Zaitsev S.V. 3D Surface Topography Imaging in SEM with Improved Backscattered Electron Detector: Arrangement and reconstruction algorithm // Ultramicroscopy. — 2019. — vol. 207, p. 112830. EDN: RLKDUG. Импакт-фактор 2,0 (JIF); 0,78 / 0,66 п.л.

Соискатель предложил метод математического моделирования связи экспериментальных данных сканирующего электронного микроскопа и трехмерной топографии рельефа, на основе которого сформулировал обратную задачу по восстановлению топографии рельефа микрообразцов. Соискатель разработал численные методы для решения данной обратной задачи, осуществил программную реализацию разработанных численных

методов и проблемно-ориентированного комплекса программ, с помощью которых была восстановлена топография экспериментальных микрообразцов.

- Borzunov A.A., Lukyanenko D.V., Rau E.I., Yagola A.G. Reconstruction Algorithm of 3D Surface in Scanning Electron Microscopy with Backscattered Electron Detector // Journal of Inverse and Ill-posed Problems. — 2021. — vol. 29, no. 5. — pp. 753—758. EDN: GMKKYS. Импакт-фактор 1,1 (JIF); 0,32 / 0,28 п.л. Соискатель формализовал математический алгоритм решения обратной задачи по восстановлению топографии рельефа микрообразцов, обрабатывал экспериментальные данные и проводил численные эксперименты по восстановлению топографии рельефа.

- Борзунов А.А., Забродский В.В., Зайцев С.В., Караулов В.Ю., Лукьяненко Д.В., Рау Э.И., Шерстнев Е.В., Ягола А.Г. Трёхмерная сканирующая электронная микроскопия топографии поверхности с учетом влияния функции отклика детекторной системы // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. — 2021. — № 4. — С. 23-28. EDN: GNBVMG. Импакт-фактор 0,125 (РИНЦ). 0,71 из 0,82 п.л.

Перевод: Borzunov, A.A., Zabrodsky V.V., Zaitsev S.V., Karaulov V.Y., Lukyanenko D.V., Rau E.I., Sherstnev E.V., Yagola A.G. Three-Dimensional Scanning Electron Microscopy of Surface Topography with Consideration of the Effect of the Respose Function of the Detector System // Moscow University Physics Bulletin. — 2021. — vol. 76, no. 4. — pp. 209–214. EDN: LYSSGL. Импакт-фактор 0,4 (JIF); 0,71 / 0,62 п.л.

Соискатель реализовал комплекс программ для ЭВМ, с помощью которого получил все численные результаты реконструкции рельефа микрообразцов.

- Борзунов А.А., Рау Э.И., Зайцев С.В., Кошев Н.А., Лукьяненко Д.В., Ягола А.Г. Томография трёхслойных наноструктур в сканирующей электронной микроскопии в режиме детектирования обратнорассеянных электронов // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. — 2024. — № 5. — С. 2450101. EDN: NXMNHR, Импакт-фактор 0,125 (РИНЦ). 1,04 из 1,13 п.л.

Перевод: Borzunov A.A., Rau E.I., Zaitsev S.V, Koshev N.A., Lukyanenko D.V., Yagola A.G. Tomography of Three-Layer Structures in Scanning Electron Microscopy in the Backscattered Electron Detection Mode // Moscow University Physics Bulletin. — 2024. — vol. 79, no. 5. — pp. 542-550. EDN: HVWEJO, Импакт-фактор 0,4 (JIF). 0,98 / 0,91 п.л.

Соискатель предложил метод математического моделирования связи экспериментальных данных сканирующего электронного микроскопа и внутренней структуры приповерхностных слоев, на основе которого сформулировал обратную задачу по восстановлению внутренней приповерхностной структуры (томографии) многослойных микрообразцов. Соискатель разработал численные методы для решения данной обратной задачи, осуществил

программную реализацию разработанных численных методов и проблемно-ориентированного комплекса программ для ЭВМ, с помощью которого была проведена томография и восстановлена внутренняя трехмерная структура экспериментального микро образца.

На диссертацию и автореферат дополнительных отзывов не поступило.

Диссертационный совет отмечает, что представленная диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решены актуальные обратные задачи восстановления трёхмерной топографии рельефа и томографии приповерхностных слоёв микро образцов по данным сканирующей электронной микроскопии в режиме детектирования обратно-рассеянных электронов. Разработанные математические модели, численные алгоритмы и реализующий их прикладной программный комплекс имеют существенное значение для развития методов трёхмерной диагностики микрообъектов и могут быть внедрены на широком классе существующих сканирующих электронных микроскопов, в том числе с вручную устанавливаемыми детекторами.

Диссертация представляет собой самостоятельное законченное исследование, обладающее внутренним единством. Положения, выносимые на защиту, содержат новые научные результаты и свидетельствуют о личном вкладе автора в науку:

1. Математическое моделирование процесса формирования сигнала в сканирующем электронном микроскопе при детектировании обратно-рассеянных электронов, основанное на известных моделях взаимодействия электронного зонда с веществом, позволяет описать зависимость сигнала от геометрии поверхности или от структуры многослойных образцов. Анализ модели при несимметричной установке детекторов или при вариации ускоряющего напряжения позволяет сформулировать обратные задачи по восстановлению трёхмерной топографии рельефа или толщин приповерхностных пленок.

2. Численные методы решения указанных обратных задач, разработанные в диссертационной работе, отличаются повышенной устойчивостью к погрешностям экспериментальных измерений и позволяют восстанавливать топографию поверхности с разрешающей способностью по перепаду высот, сопоставимой с латеральным разрешением сканирующего электронного микроскопа, или выделять физически корректные решения при томографии приповерхностных слоев массивных образцов (при наличии априорной информации об общей толщине пленок).

3. Комплекс проблемно-ориентированных программ, реализующий предложенные численные методы, обеспечивает проведение вычислительного эксперимента по обработке данных сканирующей электронной микроскопии в режиме детектирования обратно-рассеянных электронов. Программный комплекс позволяет проводить процесс калибровки микроскопа, восстанавливать трехмерную топографию рельефа поверхности микрообразцов или толщины приповерхностных слоев массивных образцов (томография).

На заседании 12.05.2026 г. диссертационный совет принял решение присудить Борзунову А.А. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 9 докторов наук, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящего в состав совета, проголосовали: за 15, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель диссертационного совета

Академик РАН

Тыртышников Е.Е.

Ученый секретарь диссертационного совета

д.ф. \_м.н., член-корр. РАН

Ильин А.В.

Декан факультета ВМК МГУ

Академик РАН

Соколов И.А.

12.05.2026 г.