

Заключение диссертационного совета МГУ.011.9.
по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

Решение диссертационного совета от «18» сентября 2025г. №8

О присуждении Ермолинскому Петру Борисовичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Особенности микрореологии и сил взаимодействия компонентов системы крови в норме и при сердечно-сосудистых заболеваниях» по специальности 1.3.21. Медицинская физика (физико-математические науки) принята к защите диссертационным советом МГУ.011.9., 22.05.2025, протокол № 6.

Соискатель Ермолинский Петр Борисович, 1997 года рождения, в период подготовки диссертации обучался в аспирантуре Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» с 01.10.2021г. по настоящее время, по направлению физика и астрономия.

Ермолинский Петр Борисович работает младшим научным сотрудником в МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра общей физики и волновых процессов.

Диссертация выполнена на кафедре Общей физики и волновых процессов, отделения радиофизики и электроники физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, доцент ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», физический факультет, кафедра общей физики и волновых процессов, Приезжев Александр Васильевич.

Официальные оппоненты:

- Ройтман Евгений Витальевич, доктор биологических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научный центр неврологии» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, отдел лабораторной диагностики, ведущий научный сотрудник.
 - Яминский Игорь Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики полимеров и кристаллов, профессор.
 - Кириллин Михаил Юрьевич, кандидат физико-математических наук, Институт прикладной физики имени А.В. Гапонова-Грехова РАН, отдел радиофизических методов в медицине, старший научный сотрудник.
- дали положительные отзывы на диссертацию.

Выбор официальных оппонентов обосновывался их компетентностью в области медицинской физики и гемореологии, а также в исследованиях микроциркуляции и сердечно-сосудистой патологии. Оппоненты имеют большое число публикаций в соответствующей сфере исследования, опубликованных в высокорейтинговых журналах. Оппоненты не имеют совместных проектов и публикаций с соискателем.

Соискатель имеет 20 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 20 работ, из них 20 статей, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.3.21. Медицинская физика.

1. Умеренков Д.А., Ермолинский П.Б., Луговцов А.Е., Дячук Л.И., Приезжев А.В. Оптические измерения микрореологических параметров крови и анализ их связи с её вязкостью при

сердечно-сосудистых заболеваниях // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. — 2024. — Т. 24, № 4. — С. 361-373. Импакт-фактор 0,444 (РИНЦ) / 0,8 печ.л. / вклад автора 0,1. EDN: [BXMCHU](#)

2. Ermolinskiy P.B., Lugovtsov A.E., Maksimov M.K., Umerenkov D.A., Moldon P.A., Sveshnikova A.N., Pshonkin A.V., Smetanina N.S., Priezzhev A.V. Interrelation of blood microrheological parameters measured by optical methods and whole blood viscosity in patients suffering from blood disorders: a pilot study // Journal of Biomedical Photonics & Engineering. — 2024. — Vol. 10, no. 2. — P. 020306. Импакт-фактор 0,210 (SJR) / 0,6 печ.л. / вклад автора 0,4. EDN: [PNCCNX](#)

3. Ермолинский П.Б., Луговцов А.Е., Семенов А.Н., Приезжев А.В. Эритроцит в поле пучка лазерного пинцета // Квантовая электроника. — 2022. — Т. 52, № 1. — С. 22-27. Импакт-фактор 1,060 (РИНЦ) / 0,4 печ.л. / вклад автора 0,4. EDN: [ODMZQE](#)
Переводная версия: Ermolinskiy P.B., Lugovtsov A.E., Semenov A.N., Priezzhev A.V. Red blood cell in the field of a beam of optical tweezers // Quantum Electronics. — 2022. — Vol. 52, no. 1. — P. 22-27. Импакт-фактор 1,245 (РИНЦ) / 0,4 печ.л. / вклад автора 0,4.

4. Масляницына А.И., Каданова И.М., Незнанов А.И., Ермолинский П.Б., Гурфинкель Ю.И., Пигуренко А.А., Дячук Л.И., Луговцов А.Е., Приезжев А.В. Микрореологические свойства крови и капиллярный кровоток при артериальной гипертензии и сахарном диабете второго типа: исследование оптическими методами in vitro и in vivo // Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний. — 2020. — Т. 9, № 2. — С. 53—63. Импакт-фактор 0,724 (РИНЦ) / 0,6 печ.л. / вклад автора 0,2. EDN: [MFUJIM](#)

5. Maslianitsyna A.I., Ermolinsky P.B., Lugovtsov A.E., Priezzhev A.V. Study by optical techniques of the dependence of aggregation parameters of human red blood cells on their deformability // Journal of Biomedical Photonics & Engineering. — 2020. — Vol. 6, no. 2. — P. 020305. Импакт-фактор 0,210 (SJR) / 0,4 печ.л. / вклад автора 0,2. EDN: [PTYPWM](#)

6. Ermolinskiy P.B., Maslyanitsina A.I., Lugovtsov A.E., Priezzhev A.V. Temperature dependencies of the aggregation properties of RBC in dextran solutions in vitro // Journal of Biomedical Photonics & Engineering. — 2020. — Vol. 6, no. 2. — P. 020501. Импакт-фактор 0,210 (SJR) / 0,3 печ.л. / вклад автора 0,3. EDN: [LDRANN](#)

7. Ermolinskiy P.B., Lugovtsov A.E., Maslyanitsina A.I., Semenov A.N., Diachuk L., Priezzhev A.V. Interaction of erythrocytes in the process of pair aggregation in blood samples from patients with arterial hypertension and healthy donors: measurements with laser tweezers // Journal of Biomedical Photonics & Engineering. — 2018. — Vol. 4, no. 3. — P. 030303. Импакт-фактор 0,210 (SJR) / 0,5 печ.л. / вклад автора 0,3. EDN: [OOVOFM](#)

8. Semenov A.N., Lugovtsov A.E., Ermolinskiy P.B., Priezzhev A.V. Laser aggregometry assessment of blood microrheology in a slit fluidic channel covered with endothelial cells // Journal of Biophotonics. — 2024. — Vol. 17, no. 12. — e202400379. Импакт-фактор 2,0 (JIF) / 0,8 печ.л. / вклад автора 0,25. <https://doi.org/10.1002/jbio.202400379>

9. Maksimov M.K., Ermolinskiy P.B., Scheglovitova O.N., Sklyankina N.N., Muravyov A.V., Lugovtsov A.E., Priezzhev A.V. RBC aggregation, deformation, and adhesion to endothelium: role of nitric oxide derived from L-arginine and 18 sodium nitroprusside // Journal of Innovative Optical Health Sciences. — 2024. — Vol. 17, no. 05. — P. 2440001. Импакт-фактор 2,3 (JIF) / 0,8 печ.л. / вклад автора 0,3. <https://doi.org/10.1142/S1793545824400017>

10. Ermolinskiy P., Gurfinkel Y., Sovetnikov E., Lugovtsov A., Priezzhev A. Correlation between the capillary blood flow characteristics and endothelium function in healthy volunteers and patients suffering from coronary heart disease and atrial fibrillation: a pilot study // Life. — 2023. — Vol. 13, no. 10. — P. 2043. Импакт-фактор 3,2 (JIF) / 1,1 печ.л. / вклад автора 0,1. EDN: [QJVATM](#)

11. Ermolinskiy P., Maksimov M., Lugovtsov A., Muravyov A., Tikhomirova I., Priezzhev A. Effect of sodium nitroprusside on the microrheological properties of red blood cells in different media //

Journal of Innovative Optical Health Sciences. — 2024. — Vol. 17, no. 05. — P. 2342001. Импакт-фактор 2,3 (JIF) / 0,6 печ.л. / вклад автора 0,3. <https://doi.org/10.1142/S1793545823420014>

12. Ermolinskiy P.B., Maksimov M.K., Muravyov A.V., Lugovtsov A.E., Scheglovitova O.N., Priezzhev A.V. Forces of interaction of red blood cells and endothelial cells at different concentrations of fibrinogen: measurements with laser tweezers in vitro // *Clinical Hemorheology and Microcirculation*. — 2023. — Vol. 86, no. 3. — P. 303-312. Импакт-фактор 2,1 (JIF) / 0,6 печ.л. / вклад автора 0,3. <https://doi.org/10.3233/CH-231941>

13. Semenov A.N., Ermolinskiy P.B., Yakimov B.P., Lugovtsov A.E., Shirshin E.A., Muravyov A.V., Shin S., Wagner C., Priezzhev A.V. Changes in red blood cells biomechanical properties induced by albumin and fibrinogen membrane adsorption: a study using flow cytometry and optical tweezers // *Series on Biomechanics*. — 2022. — Vol. 36, no. 1. — P. 32-38. Импакт-фактор 0,202 (SJР) / 0,4 печ.л. / вклад автора 0,2. EDN: [YMAVXD](https://doi.org/10.3233/CH-231941)

14. Semenov A. N., Lugovtsov A. E., Ermolinskiy P., Lee K., Priezzhev A. V. Problems of red blood cell aggregation and deformation assessed by laser tweezers, diffuse light scattering and laser diffractometry // *Photonics*. — 2022. — Vol. 9, no. 4. — P. 238. Импакт-фактор 2,1 (JIF) / 1,1 печ.л. / вклад автора 0,1. <https://doi.org/10.3390/photonics9040238>

15. Kapkov A.A., Semenov A.N., Ermolinskiy P.B., Lugovtsov A.E., Priezzhev A.V. Forces of RBC interaction with single endothelial cells in stationary conditions: measurements with laser tweezers // *Journal of Innovative Optical Health Sciences*. — 2021. — Vol. 14., no. 5. — P. 2142005. Импакт-фактор 2,3 (JIF) / 0,7 печ.л. / вклад автора 0,1. <https://doi.org/10.1142/S1793545821420050>

16. Maslianitsyna A., Ermolinskiy P., Lugovtsov A., Pigurenko A., Sasonko M., Gurfinkel Y., Priezzhev A. Multimodal diagnostics of microrheologic alterations in blood of coronary heart disease and diabetic patients // *Diagnostics*. — 2021. — Vol. 11., no. 1. — P. 76. Импакт-фактор 0,773 (SJР) / 0,6 печ.л. / вклад автора 0,2. EDN: [YSGKAH](https://doi.org/10.3390/photonics9040238)

17. Semenov A.N., Lugovtsov A.E., Shirshin E.A., Yakimov B.P., Ermolinskiy P.B., Bikmulina P.Y., Kudryavtsev D.S., Timashev P.S., Muravyov A.V., Wagner C., Shin S., Priezzhev A.V. Assessment of fibrinogen macromolecules interaction with red blood cells membrane by means of laser aggregometry, flow cytometry, and optical tweezers combined with microfluidics // *Biomolecules*. — 2020. — Vol. 10, no. 10. — P. 1448. Импакт-фактор 1,333 (SJР) / 1,2 печ.л. / вклад автора 0,1. <https://doi.org/10.3390/biom10101448>

18. Ermolinskiy P., Lugovtsov A., Yaya F., Lee K., Kaestner L., Wagner C., Priezzhev A. Effect of red blood cell aging in vivo on their aggregation properties in vitro: measurements with laser tweezers // *Applied Sciences*. — 2020. — Vol. 10, no. 21. — P. 7581. Импакт-фактор 0,521 (SJР) / 0,6 печ.л. / вклад автора 0,5. EDN: [CHLWDY](https://doi.org/10.3390/biom10101448)

19. Lugovtsov A.E., Gurfinkel Y.I., Ermolinskiy P.B., Maslyanitsina A.I., Dyachuk L.I., Priezzhev A.V. Optical assessment of alterations of microrheologic and microcirculation parameters in cardiovascular diseases // *Biomedical Optics Express*. — 2019. — Vol. 10, no. 8. — P. 3974-3986. Импакт-фактор 0,896 (SJР) / 0,8 печ.л. / вклад автора 0,1. EDN: [TLUCNK](https://doi.org/10.3390/biom10101448)

20. Ermolinskiy P., Lugovtsov A., Maslyanitsina A., Semenov A., Dyachuk L., Priezzhev A. In vitro assessment of microrheological properties of erythrocytes in norm and pathology with optical methods // *Series on Biomechanics*. — 2018. — Vol. 32, no. 3. — P. 20-25. Импакт-фактор 0,202 (SJР) / 0,4 печ.л. / вклад автора 0,3. EDN: [GGKGSG](https://doi.org/10.3390/biom10101448)

На диссертацию и автореферат поступило 6 дополнительных отзывов, все положительные.

Диссертационный совет отмечает, что представленная диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности

1.3.21. Медицинская физика (физико-математические науки) является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований был решён ряд фундаментальных вопросов микрореологии и сил взаимодействия компонентов системы крови в норме и при сердечно-сосудистых заболеваниях. В диссертационной работе исследованы особенности микрореологических свойств крови *in vitro* и *in vivo* в норме и при сердечно-сосудистых заболеваниях (ССЗ) с применением оптических методов. В ходе экспериментальной работы с помощью комплекса лазерно-оптических методов (лазерный пинцет, агрегометрия, эктацитометрия, капиллярскопия и др.) было установлено, что силы адгезии между эритроцитами и эндотелием, измеренные *in vitro* лазерным пинцетом, существенно ниже сил межэритроцитарной агрегации и дезагрегации в физиологических условиях; силы адгезии эритроцитов к эндотелию достигают насыщения при концентрациях фибриногена больше 4 мг/мл в физиологических условиях; оксид азота (NO), синтезируемый эндотелием при его предварительной инкубации с L-аргинином, снижает агрегацию эритроцитов за счет активации NO-синтазы; у пациентов с рядом ССЗ выявлена статистически значимая корреляция между гидродинамической прочностью агрегатов и индексом агрегации, отражающая зависимость микрореологических нарушений от наличия сопутствующих заболеваний. Теоретическая значимость работы заключается в установлении ключевых закономерностей изменения микрореологических свойств крови при нормальных и патологических состояниях. Полученные результаты расширяют представления о механизмах нарушений микроциркуляции и о факторах, влияющих на микрореологию крови. Практическая значимость работы определяется разработкой и апробацией новых методических подходов к оценке микрореологических характеристик крови, а также уточнением отдельных механизмов микроциркуляции. Это создаёт основу для совершенствования диагностических и терапевтических стратегий при сердечно-сосудистых заболеваниях. Результаты работы включают:

1. Установлено, что сопутствующие артериальной гипертензии заболевания усиливают агрегацию эритроцитов *in vitro* и *in vivo*. Для разных групп пациентов выявлены специфические корреляции между параметрами агрегации эритроцитов, в частности, между прочностью агрегатов (CSS) и индексом агрегации (AI). Статистически значимая положительная корреляция ($r = 0,5$) обнаружена при артериальной гипертензии и фибрилляции предсердий ($r = 0,3$), а также при сочетании ишемической болезни сердца с сахарным диабетом ($r = 0,5$). У других групп пациентов такой корреляции не наблюдается.
2. Методом лазерного пинцета впервые было показано, что эритроциты здоровых доноров взаимодействуют с сосудистым эндотелием в физиологических условиях *in vitro* в аутологичной плазме крови с силами порядка 1 пН, тогда как эритроциты взаимодействуют друг с другом с силами порядка 5 пН.
3. Силы взаимодействия между эритроцитами и сосудистым эндотелием зависят от концентрации фибриногена в плазме крови: они линейно увеличиваются с ростом концентрации фибриногена от 0 до 4 мг/мл, достигая значения насыщения порядка $2,8 \pm 0,1$ пН.
4. Методом лазерного пинцета показано, что оксид азота (NO) влияет на агрегацию и деформируемость эритроцитов: при инкубации L-аргинина (100 мкМ) с эндотелием в аутологичной плазме агрегация эритроцитов на монослое эндотелия снижается на $19 \pm 2\%$. Эффект обусловлен действием эндотелиальной NO-синтазы.
5. Показано, что влияние донора NO — нитропруссид натрия (НПН) — на агрегацию и деформируемость эритроцитов *in vitro* зависит от антикоагулянта. При концентрации НПН 200 мкМ гидродинамическая прочность агрегатов увеличивается на $8 \pm 1\%$ в крови с

гепарином лития и не изменяется при использовании ЭДТА. Эффект обусловлен присутствием Ca^{2+} в гепаринизированной крови и его отсутствием при стабилизации крови ЭДТА.

6. Разработана установка портативного лазерного эритроцитарного агрегометра, позволяющая измерять параметры гистерезиса агрегации и спонтанной агрегации эритроцитов. Впервые продемонстрировано применение вибрационного механизма для оценки гистерезиса агрегации, составляющего около 22, 5% у здорового донора.

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. Лазерный пинцет обеспечивает количественное измерение *in vitro* сил взаимодействия между одиночными эритроцитами здоровых доноров и клетками сосудистого эндотелия (HUVEC) в диапазоне 0, 5 – 5 пН, что ниже диапазона сил межэритроцитарной агрегации (1, 5 – 7 пН) и дезагрегации (2 – 13 пН).
2. Экспериментально установлено, что сила адгезии эритроцитов здоровых доноров к эндотелиоцитам (HUVEC), измеренная *in vitro* методом лазерного пинцета, достигает насыщения ($2,8 \pm 0,1$ пН) при концентрациях фибриногена выше 4 мг/мл.
3. Силы агрегации одиночных эритроцитов здоровых доноров, измеренные *in vitro* с помощью лазерного пинцета, на монослое эндотелиальных клеток (HUVEC) в плазме крови снижаются на $19 \pm 2\%$ при предварительной инкубации эндотелия с L-аргинином в концентрации 100 мкМ, что обусловлено влиянием эндотелиальной NO-синтазы.
4. Гидродинамическая прочность агрегатов и индекс агрегации эритроцитов, измеренные *in vitro* методом лазерной агрегометрии, положительно статистически значимо коррелируют (по Пирсону) у пациентов с артериальной гипертензией и фибрилляцией предсердий ($r = 0,5$), а также при сопутствующих заболеваниях: ишемической болезни сердца и/без сахарного диабета 2-го типа ($r = 0,3$ и $r = 0,5$).

На заседании 18 сентября 2025 года диссертационный совет принял решение присудить Ермолинскому Петру Борисовичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 7 докторов наук докторов наук по специальности 1.3.21. «Медицинская физика», участвовавших в заседании, из 23 человек, входящих в состав совета (дополнительно введены на разовую защиту 0 человек), проголосовали: за 16, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Заместитель председателя
диссертационного совета МГУ.011.9,
д.ф.-м.н., акад. РАН

Шкуринов А. П.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.011.9,
к.ф.-м.н.

Осминкина Л. А.

18 сентября 2025 г.