

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук
Тучина Валерия Викторовича
на диссертационную работу Шелыгиной Светланы Николаевны
«Спектрально-селективная инактивация бактерий инфракрасным излучением
фемтосекундного лазера», представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная
физика

Диссертационная работа Шелыгиной Светланы Николаевны посвящена исследованию физических механизмов инактивации патогенных микроорганизмов фемтосекундными лазерными импульсами среднего ИК-диапазона.

Актуальность темы диссертации обусловлена ростом антибиотикорезистентности патогенных микроорганизмов, снижением эффективности антибактериальной терапии и потребностью медицины и пищевой промышленности в новых методах обеззараживания, не вызывающих формирования устойчивых штаммов. На этом фоне особый интерес представляет селективная инактивация бактерий ИК-излучением фемтосекундного лазера, поскольку такой подход сочетает отсутствие мутагенного эффекта, бесконтактность и потенциально более высокую энергоэффективность по сравнению с широкополосными тепловыми источниками, поскольку позволяет воздействовать на молекулярные структуры бактериальной клетки в областях максимального поглощения. Возможность инактивации микроорганизмов одним фемтосекундным импульсом позволяет рассматривать данный метод как более перспективный по сравнению с ближайшим аналогом, основанным на использовании миллисекундных импульсов лазера на свободных электронах среднего инфракрасного диапазона. Исследование спектрально-селективного воздействия в среднем ИК-диапазоне важно как для разработки новых технологий стерилизации и дезинфекции, так и для углубления представлений о физических механизмах взаимодействия лазерного излучения с биологическими объектами.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитированной литературы, включающего 201 источник. Общий объем работы составляет 131 страницу, включая 32 рисунка и 4 таблицы.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследований, новизна, сформулированы цель и задачи работы, представлены выносимые на защиту положения. Приведена информация об апробации и сведения о научных публикациях по теме работы.

Глава 1 представляет собой литературный обзор физических методов борьбы с патогенными микроорганизмами. Рассматриваются ионизирующее, ультрафиолетовое и коротковолновое видимое излучение, импульсное излучение высокой интенсивности, инфракрасное лазерное излучение, антимикробная фотодинамическая терапия, низкотемпературная плазма, высоко- и сверхвысокочастотный электромагнитный нагрев. Особое внимание уделяется биологическим мишеням и лазерным источникам среднего ИК-диапазона.

В **главе 2** описываются экспериментальные установки и методики исследования. Подробно характеризуются лазерные системы, используемые образцы бактерий, методы спектроскопии, а также протоколы подготовки и облучения культур.

Глава 3 содержит результаты экспериментального исследования спектрально-селективной инактивации патогенных микроорганизмов на примере наиболее распространенных грамотрицательных и грамположительных бактерий *P. aeruginosa* и *S. aureus*, использованных в планктонной форме, фемтосекундным лазерным излучением среднего ИК-диапазона. Рассмотрены особенности инактивации бактерий на длинах волн 3,4–6 мкм, а также инактивация через полиэтиленовую пленку. Показано, что эффективность процесса связана с резонансным поглощением материала бактериальных клеток и определяется спектральной селективностью воздействия.

Глава 4 посвящена исследованию механизмов инактивации патогенных бактерий методом спектроскопии пропускания фемтосекундных лазерных ИК-импульсов. В ней проанализирована спектральная динамика при возбуждении на длинах волн 3,4 и 6 мкм, сопровождающая структурные изменения материала. Подробно рассмотрены процессы, связанные с изменением полос поглощения белковых амидных групп и нарушением водородных связей и позволяющие обосновать механизм инактивации на длине волны возбуждения 6 мкм.

В **заключении** подводятся итоги исследования, формулируются основные результаты. Отмечаются практические перспективы использования

полученных результатов в разработке новых методов дезактивации бактериальной флоры и направления дальнейших исследований.

Основные результаты диссертационной работы, определяющие ее новизну и научную значимость:

1. Экспериментально показана возможность спектрально-селективной инактивации патогенных бактерий фемтосекундными лазерными импульсами среднего ИК-диапазона на длинах волн 3,4 и 6 мкм, определены пороговые интенсивности инактивации, которые для бактерий *P. aeruginosa* и *S. aureus* составили примерно 100-400 ГВт/см².
2. Выявлена спектральная селективность процесса инактивации. Показано, что пороговые интенсивности воздействия коррелируют с оптической плотностью бактерий на исследуемых длинах волн.
3. Исследованы молекулярные механизмы инактивации методом динамической спектроскопии пропускания фемтосекундных лазерных импульсов среднего ИК-диапазона при возбуждении на длине волны 6 мкм, соответствующей полосам поглощения амидных групп белков и нуклеиновых кислот.
4. Исследована спектральная динамика при пропускании фемтосекундных лазерных импульсов с длиной волны 3,4 мкм, соответствующей полосам поглощения С–Н связей.
5. Показана возможность реализации инактивации через полиэтиленовую пленку, прозрачную в соответствующем спектральном диапазоне, что расширяет перспективы практического применения метода для обработки изолированных или упакованных объектов.

По тексту диссертационной работы имеются следующие замечания:

1. Литературный обзор в главе 1 выглядит несколько перегруженным описательным материалом. При широте охвата физических методов инактивации полезно было бы в более сжатом и наглядном виде сопоставить их по ключевым параметрам: глубина воздействия, селективность, мутагенность, энергозатраты, применимость к биологическим объектам и упаковке. Это усилило бы обоснование выбора именно среднего ИК-диапазона и фемтосекундного лазерного воздействия.

2. Вызывает вопрос воздействие в области около 3 мкм, поскольку данный диапазон соответствует одной из наиболее интенсивных полос поглощения воды, широко используемой, в частности, в задачах лазерной абляции биологических тканей. С учетом значительного содержания как свободной, так и связанной воды в клетках не вполне ясно, почему при таком воздействии не реализуется выраженное взрывное или абляционное разрушение клеток.
3. Представляется целесообразным обсудить перспективы использования эффекта динамического просветления биологических объектов при поглощении фемтосекундных импульсов среднего ИК-диапазона. Такой анализ позволил бы лучше обозначить возможные направления практического применения выявленных закономерностей, в том числе в задачах управляемого лазерного воздействия на биологические объекты.
4. Требуется пояснение утверждение о формировании субклеточных особенностей размером порядка 100 нм при воздействии лазерного излучения с длиной волны 6 мкм, поскольку это неочевидно с учетом дифракционного предела.

Приведённые замечания не снижают научную значимость результатов, представленных в диссертации, и общей положительной оценки работы.

Тема диссертационного исследования актуальна для современной науки. Научные положения и выводы, представленные в работе, имеют надёжное обоснование. Результаты исследования имеют практическую ценность и научную новизну. Достоверность результатов обеспечивается их воспроизводимостью при повторных исследованиях. Они успешно прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях. Результаты исследования были опубликованы в авторитетных научных изданиях, что также подтверждает их значимость и достоверность. Автореферат корректно отражает основные результаты диссертации.

Диссертация Шельгиной Светланы Николаевны «Спектрально-селективная инактивация бактерий инфракрасным излучением фемтосекундного лазера» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Шельгина Светлана

Николаевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика.

Официальный оппонент:

Член-корреспондент РАН, профессор, доктор физико-математических наук, Тучин Валерий Викторович, заведующий кафедрой оптики и биофотоники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского».

Российская Федерация, 410012, Саратовская обл., Саратов, Астраханская ул., 83

Телефон: +7 (904) 241-97-10

e-mail: tuchinvv@mail.ru

/ Тучин Валерий Викторович /

«13» апреля 2026 г.

Список основных работ официального оппонента Тучина Валерия Викторовича по тематике диссертации Шелыгиной Светланы Николаевны «Спектрально-селективная инактивация бактерий инфракрасным излучением фемтосекундного лазера» в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. O. P. Cherkasova, D. S. Serdyukov, E. F. Nemova, A. S. Ratushnyak, A. S. Kucheryavenko, I. N. Dolganova, G. Xu, M. Skorobogatiy, I. V. Reshetov, P. S. Timashev, I. E. Spektor, K. I. Zaytsev, V. V. **Tuchin**, Cellular effects of terahertz waves, *J. Biomed. Opt.* **26** (9), 090902 (2021).
2. V. V. **Tuchin**, E.A. Genina, E.S. Tuchina, A.V. Svetlakova, Y.I. Svenskaya, Optical clearing of tissues: issues of antimicrobial phototherapy and drug delivery, *Advanced Drug Delivery Reviews* 180 (1), 114037 (2022).

3. A. Bucharskaya, N. Khlebtsov, B. Khlebtsov, G. Maslyakova, N. Navolokin, V. Genin, E. Genina, **V. Tuchin**, “Photothermal and photodynamic therapy of tumors with plasmonic nanoparticles: Challenges and prospects,” *Materials* 15, 1606 (2022).
4. Y. V. Kistenev, A. Das, N. Mazumder, O. P. Cherkasova, A. I. Knyazkova, A. P. Shkurinov, **V. V. Tuchin**, I. K. Lednev, Label-free laser spectroscopy for respiratory virus detection: A review, *J. Biophotonics*, e202200100 (2022).
5. A. B. Bucharskaya, I. Yu. Yanina, S. V. Atsigaida, V. D. Genin, E. N. Lazareva, N. A. Navolokin, P. A. Dyachenko, D. K. Tuchina, E. S. Tuchina, E. A. Genina, Yu. V. Kistenev, **V. V. Tuchin**, Optical clearing and testing of lung tissue using inhalation aerosols: prospects for monitoring the action of viral infections, *Biophysical Reviews* 14, 1005–1022 (2022).
6. A. Y. Sdobnov, J. Lademann, **V. V. Tuchin**, M. Darvin, Nonlinear Optics of Skin: Enhancement of Autofluorescence and Second Harmonic Generation Signals by Immersion Optical Clearing, *Journal of Biomedical Photonics & Engineering* 2023, 9(3), 030201.
7. H. Lin, D. Li, J. Zhu, S. Liu, J. Li, T. Yu, **V. V. Tuchin**, O. Semyachkina-Glushkovskaya, D. Zhu, Transcranial photobiomodulation for brain diseases: review of animal and human studies including mechanisms and emerging trends, *Neurophoton.* 11(1), 010601 (2024).
8. A. S. Shanshool, S. Ziaee, M. A. Ansari, **V. V. Tuchin**, Advances in the transport of laser radiation to the brain with optical clearing: From simulation to reality (Invited Review), *Progress in Quantum Electronics* 94, 100506 (2024).
9. T. Yu, X. Zhong, D. Li, J. Zhu, **V. V. Tuchin**, D. Zhu, Delivery and kinetics of immersion optical clearing agents in tissues: Optical imaging from *ex vivo* to *in vivo*, *Advanced Drug Delivery Reviews* 215, 115470 (2024).
10. A. P. Rytik, **V. V. Tuchin**, The effect of terahertz radiation on cells and cellular structures, *Front. Optoelectron.* 18, 2, 1-31(2025).
11. F. Du, H. Wu, J. Xue, S. Yao, R. Li, J. Zhang, H. Wang, Q. Cheng, F. Zhao, Y. Huang, Z. Zhou, F. Liang, X. Gu, **V. V. Tuchin** and Q. Zhao, “Long-term investigation of 3D tissue detailed structure and multiparametric vascular network properties using OCT/OCTA for guiding atopic dermatitis theranostics,” *J. Translat. Med.* 23, 687 (2025)

12. А. С. Шансхул, Е. Н. Лазарева, Ю. И. Сурков, И. А. Серебрякова, Д. К. Тучина, Э. А. Генина, **В. В. Тучин**, Измерение показателя преломления биологических тканей головы с помощью ОКТ и многоволнового рефрактометра, *Оптика и спектроскопия*, 2025, том 133, выпуск 5, 575–584
13. Тучина Е. С., Корченова М. В., Закоян А. А., **Тучин В. В.** Влияние штаммовых различий на устойчивость *Staphylococcus aureus* к фотодинамическому воздействию с использованием мезо-замещенных катионных порфиринов // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика*. 2024. Т. 24, вып. 3. С. 216–227.
14. I. Y. Yanina, M. E. Darvin, J. Lademann, **V. V. Tuchin**, J. Schleusener, Biophysical alterations of the stratum corneum induced by optical clearing agents: implications for efficiency and safety optimization, *Skin Pharmacol Physiol* 2026; <https://doi.org/10.1159/000550614>
15. Y. I. Surkov, I. A. Serebryakova, A. P. Fashchevskiy, P. A. Timoshina, E. A. Genina and **V. V. Tuchin**, “PCA-LSCT: Software-Implemented Laser Speckle Contrast Tomography for Depth-Resolved Blood-Flow Mapping,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 32 (4), 7100409-1-9 (2026)