



К юбилею профессора Зенькевича Эдуарда Иосифовича

Т. А. Агеева

Ивановский государственный химико-технологический университет,
153000 Иваново, Россия

22 марта 2025 года исполняется 80 лет доктору физико-математических наук, профессору Белорусского национального технического университета Эдуарду Иосифовичу Зенькевичу.

Профессор Э.И. Зенькевич является известным ученым, заслуженно признаваемым мировым научным сообществом за его приоритетные результаты, успешно развиваемые в двух направлениях современной науки: 1) в области современной нанобиотехнологии - нанофотоника мультимолекулярных комплексов на основе тетрапиррольных макроциклов, (включая хлорофилл и другие фотосинтетические пигменты) и 2) в области нанотехнологий - фотофизика и фотохимия нанокомпозитов на основе полупроводниковых нанокристаллов CdSe и CdSe/ZnS, поверхностно активированных органическими хромофорами различных классов.

Являясь учеником академика Г.П. Гуриновича, Эдуард Иосифович всю свою жизнь посвятил изучению явлений, связанных с процессами, в которых участвуют тетрапиррольные макрогетероциклические соединения природного и синтетического происхождения. Областью его научных интересов являются 1. Структурные корреляции и механизмы релаксации возбужденных электронных состояний в самоорганизованных мультимолекулярных органических наноструктурах (димеры, триады и пентады порфиринов, упорядоченные агрегаты фотосинтетических пигментов, порфириновые нанотрубки). 2. Принципы формирования, интерфейсные явления, экситон-фононные взаимодействия и релаксационные процессы в гетерогенных наноансамблях на основе полупроводниковых квантовых точек (CdSe/ZnS, AIS/ZnS) и молекул функциональных органических соединений различной природы (спектроскопия растворов и одиночных центров).

Под его руководством сложилась и успешно функционирует научная школа «Органические и неорганические наноансамбли: структура, свойства и релаксационные процессы». Под руководством Э.И. Зенькевича разработаны основные принципы направленной самосборки мультимолекулярных комплексов тетрапиррольных макрогетероциклических соединений с прогнозированной структурой и установлены закономерности процессов светосбора и эффективности переноса электрона в таких системах. Полученные спектро-структурные кор-

реляции и механизмы релаксации возбужденных электронных состояний в самоорганизованных мультимолекулярных органических наноструктурах показали перспективность их использования в наноэлектронике и биомедицине.

Уровень выполненных Эдуардом Иосифовичем и его научной группой исследований оцениваются как достижения мирового уровня. Большинство полученных результатов начинаются со слов «впервые в мире».

Методами стационарной, поляризационной и кинетической спектроскопии при 293-77 К с привлечением теоретических расчетов впервые в мире количественно обосновано, что вплоть до $C=2 \cdot 10^{-1}$ М (концентрация хлорофилла *in vivo*), основные закономерности переноса энергии электронного возбуждения по синглетным уровням мономерных молекул хлорофилла и его аналогов описываются теорией индуктивного резонанса Ферстера-Галанина. Впервые установлено, что концентрационное тушение флуоресценции растворов фотосинтетических пигментов при $C > 10^{-2}$ М (расстояния между молекулами $R < 3.4$ нм) обусловлено двумя процессами: переносом энергии возбуждения мономер $\rightarrow$ агрегат, но и с возрастанием вероятности безызлучательной интеркомбинационной конверсии $S_1 \rightsquigarrow T_1$, за счет усиления межмолекулярных взаимодействий между мономерами при расстояниях $R < 3.4$ нм.

Методами наносекундной лазерной спектрофлуориметрии в концентрированных растворах ($C \geq 10^{-2}$ М) фотосинтетических пигментов (хлорофилл «а» и феофитин «а») впервые в мире обнаружен и обоснован направленный "down-hill" синглет-синглетный перенос энергии по мономерам в условиях неоднородного уширения уровней энергии с локализацией на длинноволновых сольватах, обладающих высокими вероятностями безызлучательных $S_1 \rightsquigarrow S_0$ и $T_1 \rightsquigarrow S_0$ переходов. Впервые в мире такой перенос энергии обнаружен в химических димерах порфиринов методами селективной лазерной спектроскопии при 4.2 К.

Методами кинетической лазерной спектроскопии и флеш-фотолиза в высококонцентрированных растворах ($C \geq 10^{-2}$ М) органических хромофоров обнаружен дистанционный безызлучательный перенос энергии электронного возбуждения на триплетно-возбужденные молекулы акцептора по двум каналам: S-T-T перенос:

$*D(*S_1) + *A(*T_1) \rightarrow D(S_0) + *A(*T_1) + \text{тепло}$ и T-T-T перенос: $*D(*T_1) + *A(*T_1) \rightarrow D(S_0) + *A(*T_1) + \text{тепло}$. Впервые в мире количественно обоснован его индуктивно-резонансный механизм и закономерности. Обосновано, что при мощном световом возбуждении процессы такого рода являются причиной дополнительного тушения флуоресценции природных фотосинтетических светособирающих комплексов ("singlet-triplet fusion"), искусственных наноразмерных мультимолекулярных структур, а также снижения порога генерации лазерных органических сред. Цикл работ в этом направлении был включен в число лучших результатов фундаментальных исследований Академии наук СССР за 1979 г., а также удостоен Первой премии Института физики НАН Беларуси.

На основании экспериментальных данных (стационарная и время-разрешенная кинетическая спектроскопия при 77-293 К, линейный дихроизм, селективная лазерная спектроскопия при 4.2-77, ЯМР) и результатов квантово-химических расчетов (TDDFT) впервые в мире обнаружено, что для широкого класса тетрапиррольных соединений с асимметричным боковым замещением (синтетические и природные объекты, химические димеры порфиринов) характерно равновесное существование двух NH-таутомеров, обладающих принципиально различными в шкале энергий спектрами поглощения и флуоресценции с выраженной инверсией интенсивностей Q(0,0)-переходов. Экспериментально обосновано, что при селективном фотовозбуждении одного из таутомеров NH-таутомерия обусловлена парным перемещением двух центральных протонов, происходящим в основном S_0 -состоянии, возникающим в процессе электронной релаксации $T_1 \rightarrow S_0$ с возбуждением NH-колебаний с избытком колебательной энергии, превышающим величину активационного барьера темнового процесса NH-таутомерии. Полученные закономерности легли в основу приглашенного доклада на Гордоновской исследовательской конференции (USA, Boston, 1995).

Реализована самосборка мультимолекулярных комплексов нового поколения, содержащих порфириновые макроциклы (димеры, триады, пентады, октады) и акцепторы электрона (NO_2 , Q, AQ, PIM), а также полимерных упорядоченных агрегатов хлорофилла и его аналогов. Установлены морфология и конформационная динамика комплексов и обоснованы механизмы релаксационных процессов в них. В таких мультипорфириновых комплексах экспериментально обнаружены два типа редко встречающихся процессов фотоиндуцированного разделения зарядов: 1) безбарьерный перенос электрона при 77 К и 2) перенос электрона по механизму суперобмена. Полученные органические наноструктуры с эффективным переносом энергии и заряда адекватно моделируют первичные фотоиндуцированные процессы фотосинтеза, являются прототипами наноразмерных молекулярных фотопереклюателей, элементов солнечных батарей и фотонных проводников, перспективных в молекулярной электронике и нанотехнологиях. Цикл работ «Мультифункциональные структурно-организованные системы на основе тетрапиррольных соединений и их физико-химические и биологические применения» отмечен Первой Премией Национальной Академии Наук Беларуси (Минск, Беларусь, 1995). Полученные результаты вошли в качестве учеб-

ного материала в новый курс лекций по биоорганической супрамолекулярной химии на факультете органической химии университета Нижмегена (Голландия).

Впервые в мире обнаружено, что мезо-фенильное замещение в октаалкилпорфиринах и в химических димерах на их основе приводит к резкому сокращению времени жизни триплетных состояний при 295 К в жидких растворах. На основании экспериментальных данных (стационарная и время-разрешенная кинетическая спектроскопия, ЯМР, селективная лазерная спектроскопия при 4.2-77К, круговой дихроизм в магнитном поле) и результатов квантово-химических расчетов (TDDFT) впервые обосновано, что эти эффекты обусловлены стерическими взаимодействиями боковых объемных заместителей, приводящими к динамической непланарности тетрапиррольного макроцикла и усилению вероятности безызлучательных каналов дезактивации триплетных возбужденных состояний. Цикл работ в этом направлении удостоен Первой премии Института молекулярной и атомной физики НАН Беларуси. Приглашенный доклад на Гордоновской исследовательской конференции (USA, Newport, 2000).

Методами селективной лазерной спектроскопии и выжигания спектральных провалов при 4.2 К в жестких матрицах впервые обнаружено, что в этан-биспорфинах и химических димерах циклопентанпорфиринов перенос энергии между связанными макроциклами реализуется в условиях существенной спектральной неоднородности, требует учета электрон-фононных взаимодействий в рамках модели индуктивного резонанса и проявляется в направленной NH-таутомерии в условиях селективного лазерного возбуждения. В химических димерах Zn-октаэтилхлоринов при изменении длины волны селективного лазерного возбуждения впервые обнаружены спектральные эффекты, обусловленные конкуренцией экситонных факторов (когерентной делокализацией возбуждения по двум макроциклам) и электрон-фононных взаимодействий (специфическое проявление внутримолекулярных колебательных мод).

На основе самосборки «снизу-вверх» получены гетерогенные наноансамбли на основе полупроводниковых квантовых точек CdSe/ZnS и органических хромофоров (порфирины, периллен-бисимида). Методами конфокальной микроскопии проведена спектральная визуализация одиночных наноансамблей и впервые в мире исследованы корреляционные соотношения между эффективностью свечения и кинетикой затухания фотолюминесценции индивидуальных квантовых объектов. На основании экспериментальных спектрально-кинетических данных и результатов квантово-механических расчетов впервые в мире количественно обосновано, что в наноансамблях «КТ-хромофор» тушение фотолюминесценции КТ обусловлено двумя процессами – индуктивно-резонансным переносом энергии и туннелированием электрона в условиях квантового ограничения. Полученные результаты являются основой для разработки элементной базы наноразмерных оптоэлектронных элементов и сенсibilизаторов для фотодинамической терапии онкологических заболеваний. Опубликованные результаты в этом направлении вошли в Top-10 лучших научных публикаций Германии в 2015 и 2018 г. Приглашенный доклад на Гордоновской исследовательской конференции (Italy, Cioocco, 2007). Включен в изда-

ния «Кто есть кто в мире» за 2017–2020 годы, премия Альберта Нельсона Маркиза за выдающиеся достижения в жизни (2017–2020 годы). Престижная медаль Международной ассоциации передовых материалов (IAAM) за 2020 год за выдающийся вклад в области передовых материалов.

Впервые детально обоснованы интерфейсные свойства наноансамблей с участием КТ (Ag-In-S)/ZnS солюбилизированной молекулами глутатиона и молекул водорастворимых порфиринов. Показано, что безызлучательная релаксация экситонного возбуждения в наноансамблях КТ-порфирин (1:1) обусловлена конкуренцией двух процессов: 1) диполь-дипольного переноса энергии квантовая точка → порфирин и 2) туннелирования электрона на поверхность КТ в условиях квантового ограничения. Полученные результаты могут быть использованы в нанофотонике (фотовольтаика, сенсорики) и нанобиомедицине (разработка селективных маркеров и фотосенсибилизаторов синглетного кислорода нового поколения для фотодинамической терапии онкологических заболеваний). Исследования в этом направлении были удостоены Гранта Президента Республики Беларусь в науке (2020 г.) и Гранта Технического университета г. Хемнитца, Германия (Grant for Full Professors in the frame of Visiting Scholar Program of Chemnitz University of Technology for established research partnerships, 2020), а также IAAM Scientist Medal of the International Association of Advanced Materials for the distinctive contribution towards interfacing the materials for multi-inter-trans disciplinary fields of science, engineering, and technology (2023).

Разработан и доведен до промышленного производства новый тип эталона счетчика квантов с последующим внедрением при производстве промышленных спектрофлуориметров СФЛ-1М (ОПП НТО АН СССР, г. Минск, 1989 г.) и флуориметров серии «Квант» для количественного определения концентрации хлорофилла в морской воде (Полярный НИИ морского рыбного хозяйства и океанографии, г. Мурманск, 1989 г.). Авт. свидетельство № 1454527 от 15.02.1988, СССР, Получен знак «Изобретатель СССР» (1990).

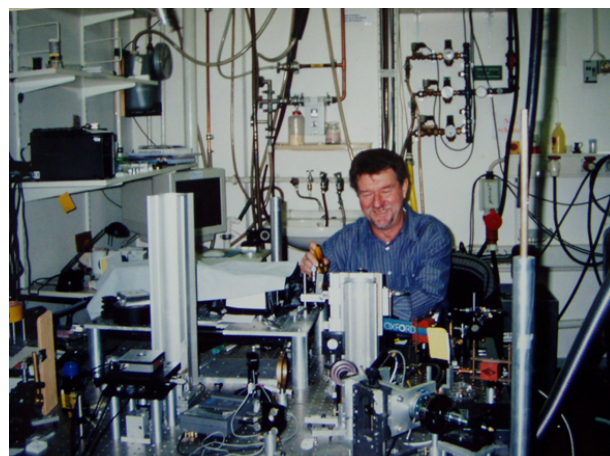
Помимо фундаментальной значимости полученные профессором Э.И. Зенькевичем и его научной группой результаты имеют практическую направленность: 1) Самособирающиеся органические мультипорфириновые наноструктуры с эффективным переносом энергии и заряда, являются прототипами наноразмерных молекулярных фотопереклюкателей и фотонных проводников и могут быть использованы в современной молекулярной электронике и нанотехнологиях; 2) Разработанные гибридные наноматериалы на основе полупроводниковых квантовых точек и функциональных органических хромофоров используются как основа для разработки элементной базы наноразмерных оптоэлектронных элементов для возможных применений в современных нанотехнологиях (фотовольтаические ячейки, химические и биохимические сенсоры, визуализация микро и нано-объектов, микро- и нанокатализ) и биомедицине (адресная доставка лекарств, фотодинамическая терапия рака).

Высокий уровень выполненных Э.И. Зенькевичем и его группой исследований подтверждается большим числом статей (в том числе и приглашенных), опубликованных в высокорейтинговых научных журналах, мо-

нографиях и главах в коллективных монографиях. Э.И. Зенькевич является автором более 1100 публикаций, которые включают: 2 монографии (на англ. языке), 29 обзорных глав в коллективных научных монографиях (из них 16 на английском языке, вышедшие за рубежом); 226 статей в периодических реферируемых научных журналах (из них 115 в зарубежных изданиях на англ. яз.); 190 статей в сборниках трудов конференций (из них 74 на англ. яз.); 5 авторских свидетельств и 1 патент Российской Федерации, 5 учебников и учебно-методических пособий. Имеет высокие факторы цитирования: $h = 25$ (Scopus), $h = 23$ (Web of Science), $h = 30$ (Google Scholar), $h = 26$ (РИНЦ), $h = 24$ (ISI).

Под руководством и при участии профессора Э.И. Зенькевича выполнены и успешно защищены 8 кандидатских диссертаций (Беларусь, Украина, Финляндия, Германия), по четырем кандидатским диссертациям и одной докторской диссертации являлся научным консультантом.

В Белорусском национальном техническом университете он читает курсы лекций, в том числе на английском языке «Introduction into Spectroscopy of Organic Compounds» для аспирантов Технического университета г. Хемнитца и «Introduction into Nanotechnology: Definitions, Principles, Properties, Applications». С 1993 по 2021 год являлся профессором Института физики Технического университета г. Хемнитца (Германия).



Эксперименты в Техническом университете г. Хемнитца, Германия

Профессор Э. И. Зенькевич ведет большую научно-организаторскую и экспертную работу. Он является членом Советов по защите кандидатских и докторских диссертаций при Институте физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси и ГНУ Института биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси, экспертом Государственного комитета по науке и технологиям Республики Беларусь, экспертом по проектам Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований НАН Беларуси, включен в список международных академических экспертов БГУ (2020 г.), экспертом национального исследовательского фонда Южной Африки. Участник двустороннего обмена экспертами высокого уровня между Китаем и Беларусью с целью создания платформы для академических и научных (г. Сиань, Китай, 2024 г.). В 2024 г. стал претендентом на получение Глобального фонда выдающихся ученых в Китае.

Являясь высококвалифицированным специалистом в области молекулярной спектроскопии и люминесценции конденсированных сред, профессор Э.И. Зенькевич поддерживает плодотворные научные контакты с рядом ведущих научных центров России, Украины, Литвы, Эстонии и дальнего зарубежья. В течение десятилетий он успешно участвует как руководитель белорусской команды в реализации многих международных научных проектов и грантов таких как проект ИНТАС, гранты Фольксвагена, гранты немецкой службы академических обменов (DAAD), РФФИ- БРФФИ и др.

Эдуард Иосифович является членом редколлегии международных журналов: «Dyes and Pigments», «Surfaces and Interfaces», «Mathematical Methods in Techniques and Technologies», региональный эксперт-референт научных статей в рецензируемых периодических научных изданиях: Chemical Physics; Chem. Phys. Lett.; Chemical Science; Journal of Porphyrins and Phthalocyanines; Spectrochimica Acta и многих других. С момента основания журнала «Macroheterocycles» он является членом Международного редакционного совета журнала, активным автором и экспертом статей.

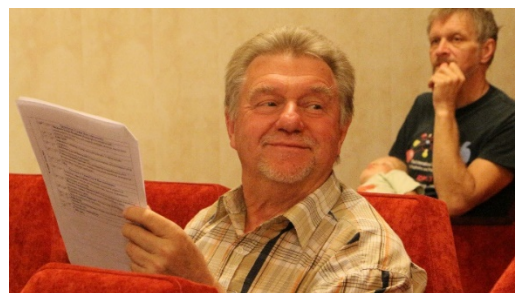
Более 20 лет Э.И. Зенькевич принимает активное участие в качестве члена оргкомитетов большого числа международных конференций, в том числе в числе организаторов и члена оргкомитета серии конференций «Синтез и применение порфиринов и их аналогов» и Школы-конференции молодых ученых стран СНГ по химии порфиринов и родственных соединений. Регулярно выступает на конференциях и семинарах с научными докладами перед студентами и преподавателями ИГХТУ. За достигнутые успехи Эдуард Иосифович отмечен памятной Почетной золотой медалью Американского Биографического Института (2000 г.), включен в список выдающихся ученых XXI века (1st Edition of

International Biographical Centre Cambridge CB2 3QP England, 2000 г.) и в список выдающихся людей «Marquis Who's Who» (издание 2010 г.- New Providence, NJ USA 07974), а также Albert Nelson Marquis Lifetime Achievement Award (издания 2017, 2018, 2019, 2020 г.).



Академик РАН О.И. Койфман вручает Э.И. Зенькевичу медаль Российского общества порфиринов и фталоцианинов за вклад в исследования порфиринов и их аналогов (Россия, 2017).

Профессор Э.И. Зенькевич - обладатель Почетной медали имени Б.Д. Берёзина Российского общества порфиринов и фталоцианинов (2017 г., Россия), престижной медали Международной ассоциации передовых материалов (IAAM) за выдающийся вклад в области продвинутых материалов (2020 г.), Медали Ученого Международной ассоциации передовых материалов (IAAM) за выдающийся вклад по использованию материалов для мульти-междисциплинарных областей науки, техники и технологий (2023 г.).



Основные публикации за последние годы:

1. Zenkevich E., von Borczyskowski C. *Self-Assembled Organic-Inorganic Nanostructures: Optics and Dynamics*. Pan Stanford Publishing Pte. Ltd., Singapore, **2016**, 405 p.
2. von Borczyskowski C., Zenkevich E. *Tuning Semiconducting and Metallic Quantum Dots: Spectroscopy and Dynamics*. Pan Stanford Publishing Pte. Ltd., Singapore, **2017**, 398 p.
3. von Borczyskowski C., Zenkevich E. Formation Principles and Exciton Relaxation in Semiconductor Quantum Dot - Dye Nanoassemblies. In: *Quantum Dot Molecules, Lecture Notes in Nanoscale Science and Technology 14. Springer Series in Materials Science* (J. Wu, Z.M. Wang, Eds.) Springer Science+Business Media, New York, 2014, pp. 77-148.
4. von Borczyskowski C., Zenkevich E. Surface Photochemistry of Quantum Dot-Porphyrin Nanoassemblies for Singlet Oxygen

Generation. In: *Photoinduced Processes at Surfaces and in Nanomaterials. ACS Symposium Series, Vol. 1196* (D. Kilin, Ed.) American Chemical Society, Washington, DC, **2015**, Ch. 12, pp. 235-272.

5. Zenkevich E., Stupak A., Göhler C., Krasselt C., von Borczyskowski C. Tuning Electronic States of a CdSe/ZnS Quantum Dot by Only One Functional Dye Molecule. *ACS NANO* **2015**, 9, 2886-2903. DOI: 10.1021/nn506941c (статья вошла в топ 10 лучших научных статей Германии за 2015 г.).

6. Stupak A., Blaudeck T., Zenkevich E., Krause S., von Borczyskowski C. The nature of non-FRET photoluminescence quenching in nanoassemblies from semiconductor quantum dots and dye molecules. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **2018**, 20, 18579-18600. DOI: 10.1039/C8CP02846J. (статья вошла в топ 10 лучших научных статей Германии за 2018 г.).

7. Gorski A., Kijak M., Zenkevich E., Knyukshto V., Starukhin A., Semeikin A., Lyubimova T., Waluk J.. Magnetic Circular Dichroism of meso-phenyl-substituted Pd-Octaethylporphyrins. *J. Phys. Chem. A* **2020**, *124*, 8144–8158. DOI: 10.1021/acs.jpca.0c06669.
8. Zenkevich E.I., Blaudeck T., von Borczyskowski C., Zahn D.R.T. Functional Porphyrins as Specific Probes of Surface Morphology, Optical Properties and Exciton Relaxation Processes for Semiconductor Quantum Dots. *Macroheterocycles* **2020**, *13*, 351–358. DOI: 10.6060/mhc200814k.
9. Zenkevich E., Blaudeck T., Scheinin V., Kulikova O., Selyshchev O., Dzhagan V., Koifman O., von Borczyskowski C., Zahn D.R.T. Self-Assembly of Semiconductor Quantum Dots with Porphyrin Chromophores: Energy Relaxation Processes and Biomedical Applications. *J. Mol. Struct.* **2021**, *1244*, 131239.
10. Zenkevich E.I., Sheinin V.B., Kulikova O.M., Koifman O.I. Interface chemistry and displacement of porphyrin macrocycles on semiconductor quantum dot surface. *J. Porphyrins Phthalocyanines* **2023**, *27*, 543–562. DOI: 10.1142/S1088424623500323.
11. Зенькевич Э.И., Гапоненко С.В., фон Борцисковски К. Наноансамбли на основе полупроводниковых квантовых точек и молекул порфиринов: структура, экситон-фононные взаимодействия и релаксационные процессы. *Журнал прикладной спектроскопии* **2023**, *90*(2), 191–201.
12. Zenkevich E., von Borczyskowski C. Peculiarities of Photoinduced Electron Transfer in Nanoassemblies Containing Porphyrin Macrocycles. *Macroheterocycles* **2024**, *17*, 133–149. DOI: 10.6060/mhc246082z
13. Zenkevich E.I., Parkhatz M.V., Dzhagarov B.M., von Borczyskowski C. Singlet oxygen generation by nanoassemblies containing porphyrin macrocycles: steric effects, energy transfer and competing processes. *J. Porphyrins Phthalocyanines* **2024**, *28*, 549–570.
14. Zenkevich E., von Borczyskowski C. Excitation energy transfer in nanoassemblies containing tetrapyrrolic macrocycles: some peculiarities and relaxation pathways. *J. Porphyrins Phthalocyanines* **2025** (accepted).

**Редакционная коллегия и Международный совет журнала «Макрогетероциклы»
сердечно поздравляют Эдуарда Иосифовича с Юбилеем и желают ему здоровья, благополучия,
новых плодотворных идей и творческих научных успехов!**