

Научная статья
УДК 546.06
doi:10.37614/2949-1215.2024.15.1.062

БИОТЕСТИРОВАНИЕ ЛЮМИНОФОРОВ НА ОСНОВЕ ОРТОНИОБАТОВ-ТАНТАЛАТОВ Gd, Er И Yb НА ТЕСТ-МОДЕЛИ *DROSOPHILA MELANOGASTER*

**М. В. Смирнова^{1✉}, А. А. Койгерова², М. Н. Палатников³, О. Б. Щербина⁴,
А. А. Смирнов⁵, С. М. Маслобоева⁶**

^{1,2}Лаборатория медицинских и биологических технологий Центра наноматериаловедения
Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия

^{3–6}Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева
Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия

¹m.smirnova@ksc.ru ✉, <http://orcid.org/0009-0002-1029-6530>

²a.koygerova@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8843-0122>

³m.palatnikov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9686-0563>

⁴o.shcherbina@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9591-0274>

⁵adstud@mail.ru, <http://orcid.org/0009-0002-1029-6530>

⁶s.masloboeva@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9954-8479>

Аннотация

Приведены результаты биотестирования люминофоров на основе Gd, Er и Yb на *Drosophila melanogaster*. Показано, что GdNb_{0.9}Ta_{0.1}O₄ в концентрациях 10 и 20 мг/мл, ErNbO₄ в концентрациях 1 и 20 мг/мл и YbNbO₄ в концентрации 1 мг/мл по сравнению с контролем (5 %-й этанол) оказывают достоверное снижение высоты вылезания личинок для окукливания. Соотношение полов, если сопоставить с контролем, менялось в GdNb_{0.9}Ta_{0.1}O₄ (1 и 10 мг/мл) и YbNbO₄ (1 мг/мл). Полученные данные свидетельствуют о токсическом эффекте указанных проб.

Ключевые слова:

Drosophila melanogaster, токсичность, биотестирование, люминесцентные ортониобаты-танталаты

Благодарности:

авторы благодарят сотрудников ФГБУ «ЦСП» ФМБА России (Москва) за предоставление линии мух.

Финансирование:

государственное задание по теме НИР № FMEZ-2024-0017 и № FMEZ-2023-0012.

Для цитирования:

Биотестирование люминофоров на основе ортониобатов-танталатов Gd, Er и Yb на тест-модели *Drosophila Melanogaster* / М. В. Смирнова [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2024. Т. 15, № 1. С. 373–379. doi:10.37614/2949-1215.2024.15.1.062.

Original article

BIOTESTING OF LUMINOPHORES BASED ON ORTHONIOBATE-TANTALATE Gd, Er AND Yb ON *DROSOPHILA MELANOGASTER*

**M. V. Smirnova^{1✉}, A. A. Koygerova¹, M. N. Palatnikov³, O. B. Shcherbina⁴,
A. A. Smirnov⁵, S. M. Masloboeva⁶**

^{1,2}Laboratory for Medical and Biological Technologies, Nanomaterials Research Centre of the Kola Science Centre of RAS, Apatity, Russia

^{3–6}Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials
of the Kola Science Centre of RAS, Apatity, Russia

¹m.smirnova@ksc.ru ✉, <http://orcid.org/0009-0002-1029-6530>

²a.koygerova@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8843-0122>

³m.palatnikov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9686-0563>

⁴o.shcherbina@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9591-0274>

⁵adstud@mail.ru, <http://orcid.org/0009-0002-1029-6530>

⁶s.masloboeva@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9954-8479>

Abstract

The results of biotesting of luminophores based on Gd, Er and Yb on the *Drosophila melanogaster* are presented. It was shown that $\text{GdNb}_{0.9}\text{Ta}_{0.1}\text{O}_4$ in concentrations of 10 and 20 mg/mL, ErNbO_4 in concentrations of 1 and 20 mg/ml and YbNbO_4 in concentration of 1 mg/ml in comparison with the control (5% ethyl alcohol) have a significant decrease in the height of larvae climbing out for pupation. The sex ratio changed in $\text{GdNb}_{0.9}\text{Ta}_{0.1}\text{O}_4$ 1 and 10 mg/ml and YbNbO_4 1 mg/ml compared to control. The results obtained indicate the toxic effect of the mentioned samples.

Keywords:

Drosophila melanogaster, toxicity, biotesting, luminescent orthoiobate-tantalates

Acknowledgements:

the authors thank the Federal State Budgetary Institution 'Centre for Strategic Planning and Management of Medical and Biological Health Risks' of the Federal Medical and Biological Agency of Russia (Moscow) for providing a line of flies.

Funding:

state assignment on the topic of research No. ES-2024-0017 and No. FEZ-2023-0012.

For citation:

Biotesting of luminophores based on orthoniobate-tantalate Gd, Er and Yb on *Drosophila Melanogaster* / M. V. Smirnova [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2024. Vol. 15, No. 1. P. 373–379. doi:10.37614/2949-1215.2024.15.1.062.

Введение

Люминофоры на основе соединений типа ABO_4 (A — редкоземельный элемент, B — элементы V группы) широко применяются в оптоэлектронике, физике высоких энергий для регистрации высокоэнергетического ионизирующего излучения, в качестве сцинтилляционных материалов, в медицинской диагностике [1]. Причём ортониобаты-танталаты трёхвалентных редкоземельных элементов (РЗЭ), таких как Er, Yb, могут преобразовывать возбуждение ближнего инфракрасного диапазона в видимое излучение, то есть являются люминофорами с повышающей конверсией [2]. Такое преобразование ближнего инфракрасного диапазона в видимое излучение исключает фоновую флуоресценцию и рассеяние света на биологических материалах, что делает ап-конверсионные люминесцентные материалы идеальными для применения в биовизуализации с привлекательными преимуществами, такими как отсутствие автофлуоресценции биотканей и большая глубина проникновения [3]. В то же время эти соединения могут быть эффективны, например, для инактивации микроорганизмов, что является актуальным в свете растущего проявления устойчивости микроорганизмов к традиционным противомикробным препаратам [4]. Механизм действия с использованием антимикробной фотодинамической инактивации (ФДИ), которая основана на комбинированном использовании света, кислорода и промежуточного агента (фотосенсибилизатора), происходит с образованием цитотоксических активных форм кислорода. Активные формы кислорода взаимодействуют с жизненно важными биомолекулами клетки, что приводит к необратимой микробиальной инактивации [5, 6]. Использование в медицинской практике в качестве фотосенсибилизатора соединений типа ABO_4 требует предварительного биотестирования.

В настоящее время существует огромное количество тестовых живых систем для решения широкого круга задач биотестирования. В нашем исследовании была выбрана *Drosophila melanogaster* (Drosophilidae). *D. melanogaster* — двукрылое насекомое с полным превращением (представитель отряда насекомых, включающего двукрылых или так называемых настоящих мух) [7, 8]. Классически *D. melanogaster* использовалась в качестве модели генотоксичности, но в настоящее время включена в качестве потенциальной и альтернативной модели для изучения системной токсикологии [9]. Дрозофила является относительно простой тестовой системой, её культуру легко поддерживать, это насекомое имеет короткий жизненный цикл и отличается большой плодовитостью.

Стадии развития *D. melanogaster* по продолжительности описываются примерно от яйца (24 ч), далее личинки увеличиваются в размерах с каждой линькой (три стадии, каждая из которых занимает 24–30 ч). Отличительные характеристики становятся заметны на второй и третьей стадиях, когда личинки уже имеют выраженные тёмноокрашенные челюстные крючки в области головы и сегментированное тело. Далее происходит окукливание в пупарий (48–60 ч). Выход из пупариев (рис. 1) происходит через 100–120 ч [10, 11].

Таким образом, целью работы было биотестирование люминофоров на основе соединений типа ABO_4 на *D. melanogaster*.

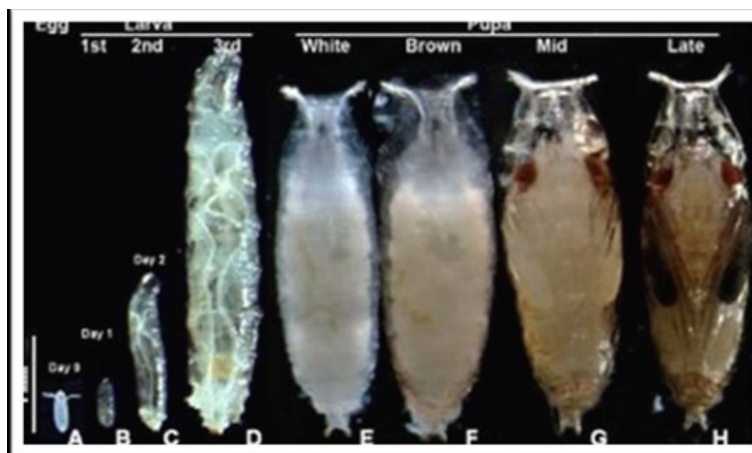


Рис. 1. Стадии развития дрозофилы:
яйцо (А); личинки 1-й (В), 2-й (С) и 3-й (D) стадий; Е–F — окукливание в пупарий [10, 11]

Материалы и методы

В качестве тестируемых материалов были выбраны мелкозернистые порошки составов $GdNb_{0.9}Ta_{0.1}O_4$, $ErNbO_4$ и $YbNbO_4$. Порошки были синтезированы золь-гель методом, о чём подробно изложено ранее [12, 13].

Для синтеза использовали высокочистые фторидные ниобий- и танталсодержащие растворы, которые получали при растворении оксидов Nb_2O_5 и Ta_2O_5 в HF (ООО «Компонент-реактив», Россия, квалификация ос. ч. 27-5), а также в нужной концентрации растворы Gd_2O_3 , Er_2O_3 , Yb_2O_3 (оксиды 99,9 % ООО «ХимКрафт», Россия) в HNO_3 (ос. ч.) (АО «Вектон», Россия, квалификация ос. ч. 18-4). Из исходных растворов гидроксиды ниобия, тантала или их смеси осаждали 25 %-м раствором NH_4OH . Образовавшийся осадок три раза репульпацией промывали деионизированной водой для удаления F^- -ионов при соотношении твёрдой и жидкой фаз 1 к 3 и сушили при температуре $100\text{ }^{\circ}C$. Затем к осадку добавляли азотнокислые растворы эрбия, иттербия или гадолиния, обеспечивающие заданную концентрацию этих элементов в синтезируемых соединениях. В образовавшуюся при перемешивании пульпу вводили 25 %-й раствор NH_4OH («Сигма Тек», Россия, ос. ч. 23-5) до $pH \sim 8-9$. После фильтрации и трёхкратной промывки осадка от ионов аммония деионизированной водой ($T:V_{ж} = 1:4$) проводили его сушку приблизительно при температуре $140\text{ }^{\circ}C$, затем прокалику в печи сопротивления при $700\text{ }^{\circ}C$ в течение 4 ч и размол в шаровой халцедоновой мельнице МК 1. Далее порошки прокаливали в течение 5 ч при $1200\text{ }^{\circ}C$.

Содержание ниобия и тантала во фторидных Nb- и Ta-содержащих растворах определяли гравиметрическим методом, фторид-ионов — потенциометрическим на иономере ЭВ-74 с F-селективным электродом ЭВЛ-1МЗ потенциометрическим методом на иономере EV-74 (Завод измерительных приборов, Беларусь) с F-селективным электродом EVL-1MZ (Завод измерительных приборов, Беларусь). Фтор в синтезированных порошках анализировали методом пиролизного гидролиза. Y, Eu, Gd, Er в фильтратах и промывных растворах определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии (АЭС-ИСП) на спектрометре ICPE 9000 (Shimadzu, Япония) и методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФС) на приборе Спектроскан МАКС-GV Spectroscan MAKS-GV («Спектрон», Россия). Установлено, что концентрации Er, Yb, Nb, Ta близки к расчётным значениям в пределах допустимой погрешности используемого метода анализа (5 %), а концентрация фтора в порошках находится ниже предела чувствительности используемого метода анализа (менее $1 \times 10^{-3}\text{ } \%$).

Фазовый состав и уточнение структур $\text{GdNb}_{0.9}\text{Ta}_{0.1}\text{O}_4$, ErNbO_4 и YbNbO_4 выполняли с помощью многофункционального рентгеновского дифрактометра Rigaku с программным обеспечением SmartLab Studio II (RIGAKU, Япония). Скорость движения счётчика $2 \text{ град.} \cdot \text{мин}^{-1}$ ($\text{CuK}\alpha$ -излучение, диапазон сканирования — $6\text{--}90^\circ$). Для идентификации фаз использовали базы данных ICDD (PDF 4, relies 2022).

Величину удельной площади поверхности порошков определяли методом низкотемпературной адсорбции азота (БЭТ; FlowSorbII 2300; TriStar 3020 V1. 03) (Micrometrics, USA). Результаты измерений и фазовый состав тестируемых порошков приведены в табл. 1.

Таблица 1

Фазовый состав и размер частиц исследуемых порошков

Образец (обозначение)	Фазовый состав, ICDD (PDF 4, relies 2022)	Удельная площадь поверхности, $\text{м}^2/\text{г}$	Размер частиц, $\mu\text{м}$
ErNbO_4 (ПМ-9)	Монофазный моноклинный фергусонит- β ErNbO_4 (ICDD Card 01-074-6536, пространственная группа SPGR: I2/a (15))	1,34	0,66
$\text{GdNb}_{0.9}\text{Ta}_{0.1}\text{O}_4$ (ЗМ-13*)	Твёрдый раствор кристаллизуется основе ортониобата гадолиния с частичным замещением ниобия танталом в моноклинной фазе фергусонита- β GdNbO_4 (ICDD PDF Card 04-008-3665) (пространственная группа C2/c (15), Z = 4)	2,38	0,37
YbNbO_4 (ПМ-11)	Монофазный моноклинный фергусонит- β YbNbO_4 (ICDD Card 01-072-4524, пространственная группа SPGR: I2/a (15))	1,51	0,58

Спектры фотолюминесценции тестируемых ErNbO_4 и YbNbO_4 были изучены с помощью спектрофлуориметра AvaSpec-3648 (Avantes, Нидерланды) при возбуждении длиной волны 980 нм одномодовым лазерным модулем KLM-H980 (ФТИ «Оptronик», Санкт-Петербург) инфракрасного диапазона с мощностью непрерывного излучения 120/200 мВт. При возбуждении лазерным излучением ближнего ИК-диапазона ($\lambda_{\text{возб}} = 980 \text{ нм}$) ErNbO_4 и YbNbO_4 люминесцируют в области видимого света. ErNbO_4 показывает две полосы люминесценции при 555 (зелёная область спектра) и 672 нм (красный цвет спектра), а YbNbO_4 демонстрирует максимумы люминесценции при 585 и 661 нм (красно-оранжевая область). Таким образом, ErNbO_4 и YbNbO_4 являются люминофорами с повышающей конверсией с повышающим преобразованием возбуждающего излучения, то есть обладают ап-конверсией.

Спектры фотолюминесценции $\text{GdNb}_{0.9}\text{Ta}_{0.1}\text{O}_4$ регистрировали на спектрофлуориметре Shimadzu RF-5301 PC (Shimadzu, Япония). Установлено, что при возбуждении УФ-излучением ($\lambda_{\text{возб}} = 260 \text{ нм}$) порошки $\text{GdNb}_{0.9}\text{Ta}_{0.1}\text{O}_4$ люминесцируют в синей области спектра с максимальной интенсивностью люминесценции ($\sim 450 \text{ нм}$).

В эксперименте использовали мух дикой линии D-32 (красные глаза), выращенных на стандартной питательной среде в условиях 12-часового освещения при температуре $24\text{--}25^\circ\text{C}$. D-32 характеризуется низкой спонтанной мутагенностью и простым содержанием. Просмотр личинок, пупариев и имаго осуществляли с помощью стереобинокулярного микроскопа «Микромед МС-2-ZOOM вар. 2CR» (Micromed, Китай, 2022) на увеличении 20. Съёмка проводилась с помощью цифровой CMOS-камеры Tourcam 2.0 (TOUPTEC, Ханчжоу, Китай, 2019) оснащённой программным обеспечением TourView для сенсора $1/2.7''$ с разрешением 1920×1080 пикселей.

Концентрационный диапазон (1, 10 и 20 мг/мл) определяли исходя из имеющихся литературных данных и навесок исследуемых образцов, опыт проводили в трёхкратной повторности. Пробы растворяли в 5 %-м этаноле для предварительной дезинфекции и привлечения мух; 5 %-й этанол мухи хорошо переносят в процессе своей жизнедеятельности [14].

В свежую тёплую жидкую среду, разлитую по пробиркам, стеклянной палочкой подмешивали образцы, представляющие собой взвесь в заявленных концентрациях, в пропорции 1:3 и укупоривали ватными пробками. Все манипуляции проводили стерильными инструментами. Пробирки оставляли в вертикальном положении при температуре 20–22 °С для остывания и затвердевания среды, испарения конденсата на 24 ч.

На каждую пробу брали по пять самцов и пять самок возрастом от 1–3 сут по достижении половозрелости. Мух подвергали голодовке в течение 6 ч (для увеличения привлекательности питательной среды), затем 1–2 мин примаривали в морозильной камере для обездвиживания и распределяли по пробиркам. По мере пробуждения мух пробирки ставили вертикально, чтобы мухи могли свободно перемещаться в пробирке и садиться на среду.

Мух удаляли через 72 ч после отметки появления яиц в пробирках и наблюдали за потомством. Оценивали показатели: соотношение полов и высоту подъёма куколок над средой в каждой опытной концентрации и контроле [15]. Эксперимент длился до точки начала массового вылета мух (10–11 сут). Также подсчитывали мёртвых мух и личинки.

Статистический анализ

Статистический анализ проводили в программе R. Различия в выборках высоты окукливания личинок над средой определяли при $P \leq 0,05$ с использованием тестов ANOVA и Тьюки. Для сравнения соотношения полов использовали критерий Хи-квадрат.

Результаты

В ходе эксперимента подсчитывали количество мёртвых имаго, пупариев и личинок (табл. 2) и проводили фотофиксацию (рис. 2).

Таблица 2

Количество мёртвых пупариев (кукольная гибель) и имаго после добавления в питательную среду проб

Проба	Куколки, шт.	Мухи, шт.	Проба	Куколки, шт.	Мухи, шт.
ErNbO ₄ , 1 мг/мл	3	—	GdNb _{0,9} Ta _{0,1} O ₄ , 20 мг/мл	12	2
ErNbO ₄ , 10 мг/мл	4	3	YbNbO ₄ , 1 мг/мл	6	2
ErNbO ₄ , 20 мг/мл	—	—	YbNbO ₄ , 10 мг/мл	5	—
GdNb _{0,9} Ta _{0,1} O ₄ , 1 мг/мл	—	—	YbNbO ₄ , 20 мг/мл	6	2
GdNb _{0,9} Ta _{0,1} O ₄ , 10 мг/л	11	6	Контроль (спирт 5 %)	—	3

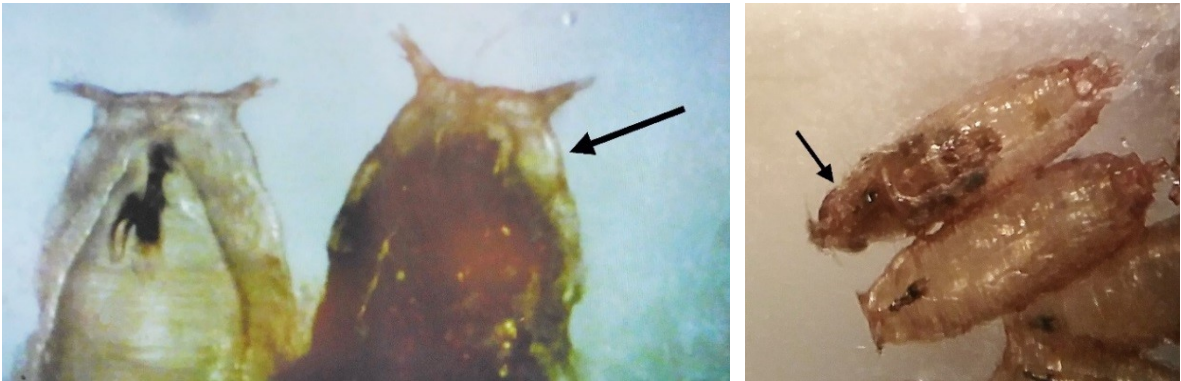


Рис. 2. Живой (пустой) и мёртвый (показан стрелкой) пупарии *D. melanogaster* (слева); умершее имаго мухи *D. melanogaster* (показано стрелкой) при выходе из пупария (справа). Увеличение ×20

Также наблюдалось снижение высоты выползания личинок над средой в пробах $\text{GdNb}_{0.9}\text{Ta}_{0.1}\text{O}_4$ 10 и 20 мг/мл, ErNbO_4 в концентрациях 1 и 20 мг/мл и YbNbO_4 1 мг/мл по сравнению контролем.

По соотношению полов отмечались различия с контролем в порошках $\text{GdNb}_{0.9}\text{Ta}_{0.1}\text{O}_4$ 1 и 10 мг/мл, а также в YbNbO_4 1 мг/мл.

Таким образом, биотестирование люминофоров на основе ортониобатов-танталатов Gd, Er и Yb на тест-модели *D. melanogaster* показало, что пробы оказывают действие на локомоторные функции личинок в пробах $\text{GdNb}_{0.9}\text{Ta}_{0.1}\text{O}_4$ 10 и 20 мг/мл, ErNbO_4 в концентрациях 1 и 20 мг/мл и YbNbO_4 1 мг/мл по сравнению контролем. Соотношение полов менялось в пробах $\text{GdNb}_{0.9}\text{Ta}_{0.1}\text{O}_4$ 1 и 10 мг/мл, а также в YbNbO_4 1 мг/мл. Запланировано расширение применяемых методик с *D. melanogaster* по изучению влияния люминофоров на основе ортониобатов-танталатов Gd, Er и Yb.

Список источников

1. Luminescence properties of the yttrium and gadolinium tantalum-niobates / O. Voloshyna [et al.] // Solid state phenomena. 2015. Vol. 230. P. 172–177.
2. Zhang F. General introduction to upconversion luminescence materials // Nanostructure Science and Technology. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015. P. 121–157.
3. Wang R., Zhang F. NIR luminescent nanomaterials for biomedical imaging // J. Mater. Chem. B. 2014. Vol. 2. P. 2422–2443.
4. Photoantimicrobials — Are we afraid of the light? / M. Wainwright [et al.] // Lancet Infect. Dis. 2017. Vol. 17, No. 2. P. e49–e55.
5. An insight on bacterial cellular targets of photodynamic inactivation / E. Alves [et al.] // Futur. Med. Chem. 2014. Vol. 6. P. 141–164.
6. Almeida A., Faustino M. A. F., Tome J. P. C. Photodynamic inactivation of bacteria: Finding the effective targets // Futur. Med. Chem. 2015. V. 7. P. 1221–1224.
7. Sepel L. M. N., Loreto E. L. S. Um século de *Drosophila* na genética // Genética na Escola. 2010. Vol. 5 (2). P. 42–47.
8. Demir E., Demir F. T. *Drosophila*: A promising model for evaluating the toxicity of environmental pollutants // Karaelmas Science and Engineering J. 2022. Vol. 12 (1). P. 101–118.
9. Effects of Hg (II) Exposure on MAPK phosphorylation and antioxidant system in *D. melanogaster* / M. T. Paula [et al.] // Environ. Toxicol. 2012. Vol. 29 (6). P. 621–630.
10. Affleck J. G., Walker V. K. *Drosophila* as a model for developmental toxicology: using and extending the drosophotoxycology model.: in developmental toxicology: methods and protocols // Methods in Molecular Biology. 2019. Vol. 1965. P. 139–153.
11. Lakhota S. C., Ranganath H. A. Experiments with *Drosophila* for Biology Courses / Indian Academy of Sciences. Bengaluru, 2021.
12. Luminescence properties of sol-gel derived ceramic $\text{GdNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$ and $\text{YNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$ solid solutions / M. N. Palatnikov [et al.] // Inorg. mater. 2020. Vol. 56 (4). P. 437–442.
13. Synthesis, microstructure, mechanical properties and luminescence of a ceramics $\text{Gd}(\text{Nb}_x\text{Ta}_{1-x})\text{O}_4$ / O. B. Shcherbina [et al.] // J. Advanced Dielectrics. 2020. Vol. 10 (01), No. 2. P. 2060014.
14. B. *Drosophila melanogaster* as a promising model organism in toxicological studies: a mini review / A. Abolaji [et al.] // Archives of Basic and Applied Medicine. 2013. Vol. 1. P. 33–38.
15. Азарова С. В., Языков Е. Г., Ильинских Н. Н. Оценка экологической опасности отходов горнодобывающих предприятий Республики Хакасия с применением метода биотестирования // Изв. Томского политехнического университета. 2004. Т. 307, № 4. С. 55–59.

References

1. Voloshyna O., Boiaryntseva I., Spassky D., Sidletskiy O. Luminescence properties of the yttrium and gadolinium tantalum-niobates. Solid state phenomena, 2015, Vol. 230, pp. 172–177.
2. Zhang F. General introduction to upconversion luminescence materials. Nanostructure Science and Technology. Berlin, Heidelberg, Springer, 2015, pp. 121–157.

3. Wang R., Zhang F. NIR luminescent nanomaterials for biomedical imaging. *Journal of Materials Chemistry B*, 2014, Vol. 2, pp. 2422–2443.
4. Wainwright M., Maisch T., Nonell S., Plaetzer K., Almeida A., Tegos G. P., Hamblin M. R. Photoantimicrobials — Are we afraid of the light? *Lancet Infectious Diseases*, 2017, Vol. 17 (2), pp. e49–e55.
5. Alves E., Faustino M. A. F., Neves M. G., Cunha A., Tome J. P. C., Almeida A. An insight on bacterial cellular targets of photodynamic inactivation. *Future Medicinal Chemistry*, 2014, Vol. 6, pp. 141–164.
6. Almeida A., Faustino M. A. F., Tome J. P. C. Photodynamic inactivation of bacteria: Finding the effective targets. *Future Medicinal Chemistry*, 2015, Vol. 7, pp. 1221–1224.
7. Sepel L. M. N., Loreto E. L. S. Um século de *Drosophila* na genética. *Genética na Escola*, 2010, Vol. 5(2), pp. 42–47.
8. Demir E., Demir F. T. *Drosophila*: A promising model for evaluating the toxicity of environmental pollutants. *Karaelmas Science and Engineering Journal*, 2022, Vol. 12 (1), pp. 101–118.
9. Paula M. T., Zemolin A. P., Vargas A. P., Golombieski R. M., Loreto E. L. S., Saidelles A. P., Picoloto R. S., Flores E. M. M., Pereira A. B., Rocha J. B. T., Merritt T. J. S., Franco J. L., Posser T. Effects of Hg (II) Exposure on MAPK phosphorylation and antioxidant system in *D. melanogaster*. *Environmental Toxicology*, 2012, Vol. 29 (6), pp. 621–630.
10. Affleck J. G., Walker V. K. *Drosophila* as a model for developmental toxicology: using and extending the drosophotoxicology model. *Developmental toxicology: methods and protocols, methods in molecular biology*, 2019, Vol. 1965, pp. 139–153.
11. Lakhotia S. C., Ranganath H. A. Experiments with *Drosophila* for biology courses. *Indian Academy of Sciences, Bengaluru*, 2021.
12. Palatnikov M. N., Smirnov M. V., Masloboeva S. M., Shcherbina O. B., Sidorov N. V., Steblevskaya N. I., Belobeletskaya M. V. Luminescence properties of sol-gel derived ceramic $GdNb_xTa_{1-x}O_4$ and $YNb_xTa_{1-x}O_4$ solid solutions. *Inorganic Materials*, 2020, Vol. 56 (4), pp. 437–442.
13. Shcherbina O. B., Masloboeva S. M., Steblevskaya N. I., Belobeletskaya M. V., Efremov V. V., Smirnov M. V., Palatnikov M. N. Synthesis, microstructure, mechanical properties and luminescence of a ceramics $Gd(Nb_xTa_{1-x})O_4$. *Journal of Advanced Dielectrics*, 2020, Vol. 10 (01), No. 2, pp. 2060014.
14. Abolaji A., Kamdem J. P., Olatunde F., Teixeira da Rocha J. B. *Drosophila melanogaster* as a promising model organism in toxicological studies: a mini review. *Archives of Basic and Applied Medicine*, 2013, Vol. 1, pp. 33–38.
15. Azarova S. V., Yazikov E. G., Il'inskih N. N. Ocenka ekologicheskoy opasnosti othodov gornodobyvayushchih predpriyatij respubliki Hakasiya s primeneniem metoda biotestirovaniya. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2004, Vol. 307 (4), pp. 55–59. (In Russ.).

Сведения об авторах

Мария Васильевна Смирнова — научный сотрудник;
Алена Алексеевна Койгерова — научный сотрудник;
Михаил Николаевич Палатников — доктор технических наук, главный научный сотрудник;
Ольга Борисовна Щербина — кандидат технических наук, старший научный сотрудник;
Андрей Анатольевич Смирнов — ведущий инженер;
Софья Михайловна Маслобоева — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник.

Information about the authors

Maria V. Smirnova — Researcher;
Alena A. Koygerova — Researcher;
Michail N. Palatnikov — Dr. Sc (Engineering), Chief Researcher;
Olga B. Shcherbina — PhD (Engineering), Senior Researcher;
Andrey A. Smirnov — Leading Engineer;
Sofya M. Masloboeva — PhD (Engineering), Leading Researcher.

Статья поступила в редакцию 08.04.2024; одобрена после рецензирования 10.04.2024; принята к публикации 12.04.2024.
The article was submitted 08.04.2024; approved after reviewing 10.04.2024; accepted for publication 12.04.2024.