

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-3-406-416

УДК 546.07

Генератор синглетного кислорода в газовой фазе атмосферного воздуха для практического многофункционального применения

Лариса Львовна Хомутинникова¹✉, Егор Павлович Быков², Семён Алексеевич Плясцов³,
Сергей Константинович Евстропьев⁴, Игорь Касьянович Мешковский⁵,
Сергей Григорьевич Журавский⁶, Владимир Николаевич Баушев⁷

^{1,2,3,4,5,6,7} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

⁶ Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова, Санкт-Петербург, 197341, Российская Федерация

¹ larahlesnyh@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-0918-6350>

² egor1999b@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5829-2590>

³ s.plyastsov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5764-0960>

⁴ evstropiev@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0160-8443>

⁵ <https://orcid.org/0000-0003-3470-1000>

⁶ s.jour@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5960-068X>

⁷ vb@npp17.ru, <https://orcid.org/0009-0004-3116-3563>

Аннотация

Введение. Синглетный кислород относится к метастабильным активным формам кислорода. Синглетный кислород участвует в ряде биохимических реакций и физиологических процессов. Это предполагает возможность его применения для решения прикладных задач медицины и в сферах безопасности жизнедеятельности человека. Благодаря своим окислительным свойствам эффективно уничтожает патогенные организмы, включая бактерии, грибки и вирусы, а также используется в фотодинамической терапии для лечения различных заболеваний, включая онкологические и дерматологические патологии. Для его генерации традиционно применяются фотосенсибилизаторы, которые имеют ряд значительных недостатков, таких как токсичность, низкая селективность по отношению к пораженным клеткам и необходимость использования мощного оптического излучения. Одним из решений этих проблем является применение фотокаталитических материалов, которые генерируют синглетный кислород как в жидкой, так и в газовой средах. В газовой фазе время жизни молекул синглетного кислорода значительно выше, чем в жидкостях. Исследование методов генерации синглетного кислорода в газовой фазе сегодня является актуальной научной задачей. В научной литературе отсутствуют публикации, описывающие качественные и количественные характеристики генерируемых воздушных смесей, обогащенных активными формами кислорода. Разработка генераторов синглетного кислорода в газовой фазе атмосферного воздуха представляет собой актуальную задачу, имеющую много функциональных приложений в областях медицины и технологии безопасности. **Метод.** В настоящей работе представлен и исследован экспериментальный образец прибора для генерации синглетного кислорода в газовой фазе атмосферного воздуха. При его проектировании использованы научные исследования авторов по созданию оригинального фотокаталитического нанокристаллического покрытия на основе $\text{ZnO-SnO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$, способного в условиях воздействия оптическим излучением, близким к видимому спектру (длина волны 405 нм), к генерации синглетного кислорода. **Основные результаты.** Разработана оригинальная модель прибора. Особенностью устройства является применение фотокатализатора многократного использования. Применяемые материалы исследованы методами рентгенофазового анализа и атомно-силовой микроскопии. Активность генерации синглетного кислорода оценена методом электронного парамагнитного резонанса. Достигнутая скорость фотогенерации синглетного кислорода составила 100 (мкмоль/л)/мин. Расчетная концентрация синглетного кислорода в воздухе на выходе устройства при нормальных условиях в зоне работающего генератора, по величине скорости фотодегградации красителя родамина 6Ж в пористом стекле, составила величину 10 (мкмоль/л)/мин. Представленный прототип прибора отличается низким классом энергопотребления, экологической безопасностью, доступностью материалов, использованием излучения, близкого к видимому спектру, а

© Хомутинникова Л.Л., Быков Е.П., Плясцов С.А., Евстропьев С.К., Мешковский И.К., Журавский С.Г., Баушев В.Н., 2025

также возможностью генерации синглетного кислорода без токсичных окисляющих примесей. **Обсуждение.** Разработанный прототип генератора предполагает возможность создания ряда его модификаций для создания линейки multifunctional приборов: индивидуального, группового применения с лечебной целью, для решения конструкторских задач обеспечения безопасной среды жизнедеятельности и других. Селективная генерация синглетного кислорода позволяет применять приборы для решения медицинских задач как при непосредственном контакте с тканями человека, так и при создании воздушной среды для дыхания и жизнедеятельности человека.

Ключевые слова

генератор синглетного кислорода, оксид цинка, фотокатализ, фотокаталитические наноструктуры

Ссылка для цитирования: Хомутинникова Л.Л., Быков Е.П., Плясцов С.А., Евстропьев С.К., Мешковский И.К., Журавский С.Г., Баушев В.Н. Генератор синглетного кислорода в газовой фазе атмосферного воздуха для практического multifunctional применения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 3. С. 406–416. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-3-406-416

Atmospheric air-phase singlet oxygen generator for practical multifunctional applications

Larisa L. Khomutinnikova^{1✉}, Egor P. Bykov², Semyon A. Plyastsov³, Sergey K. Evstropiev⁴, Igor K. Meshkovskii⁵, Sergei G. Zhuravskii⁶, Vladimir N. Baushev⁷

^{1,2,3,4,5,6,7} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

⁶ Almazov National Medical Research Centre, Saint Petersburg, 197341, Russian Federation

¹ larahlesnyh@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-0918-6350>

² egor1999b@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5829-2590>

³ s.plyastsov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5764-0960>

⁴ evstropiev@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0160-8443>

⁵ <https://orcid.org/0000-0003-3470-1000>

⁶ s.jour@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5960-068X>

⁷ vb@npp17.ru, <https://orcid.org/0009-0004-3116-3563>

Abstract

Singlet oxygen is a metastable reactive oxygen species involved in numerous biochemical reactions and physiological processes. This suggests its potential applicability in addressing practical challenges in medicine and human safety. Due to its oxidative properties, singlet oxygen effectively eliminates pathogenic organisms, including bacteria, fungi, and viruses, and is utilized in photodynamic therapy for the treatment of various diseases, including oncological and dermatological pathologies. Traditionally, photosensitizers are employed for its generation; however, they exhibit significant drawbacks, such as toxicity, low selectivity toward affected cells, and the requirement for high-intensity optical radiation. One promising solution involves the use of photocatalytic materials capable of generating singlet oxygen in both liquid and gaseous phases. The lifetime of singlet oxygen molecules in the gas phase is substantially longer than in liquids. Investigating methods for generating singlet oxygen in the gas phase represents a pressing scientific challenge. Currently, there is a lack of publications in scientific literature describing the qualitative and quantitative characteristics of air mixtures enriched with reactive oxygen species. The development of singlet oxygen generators in the gas phase of atmospheric air is an urgent task with multiple functional applications in medicine and safety technologies. This study presents and examines an experimental prototype of a device designed for generating singlet oxygen in the gas phase of atmospheric air. The design incorporates the authors' research on the development of an original photocatalytic nanocrystalline coating based on ZnO-SnO₂-Fe₂O₃, capable of producing singlet oxygen under irradiation with optical radiation near the visible spectrum (405 nm). A novel device model has been developed, featuring a reusable photocatalyst. The materials were characterized using X-ray diffraction analysis and atomic force microscopy. Singlet oxygen generation activity was assessed via electron paramagnetic resonance spectroscopy. The achieved photogeneration rate of singlet oxygen was 100 (μmol/L)/min. The calculated concentration of singlet oxygen in the air at the device outlet under normal conditions, determined based on the photodegradation rate of rhodamine 6G dye in porous glass, reached 10 (μmol/L)/min. The presented prototype exhibits low energy consumption, environmental safety, cost-effective materials, utilization of near-visible spectrum radiation, and the ability to generate singlet oxygen without toxic oxidizing byproducts. The developed prototype allows for the creation of multiple modifications, enabling a range of multifunctional devices for individual or group therapeutic use as well as for engineering solutions aimed at ensuring a safe living environment. Selective singlet oxygen generation permits the application of these devices in medical settings, both for direct tissue contact and for establishing breathable air environments conducive to human life.

Keywords

singlet oxygen generator, zinc oxide, photocatalysis, photocatalytic nanostructures

For citation: Khomutinnikova L.L., Bykov E.P., Plyastsov S.A., Evstropiev S.K., Meshkovskii I.K., Zhuravskii S.G., Baushev V.N. Atmospheric air-phase singlet oxygen generator for practical multifunctional applications. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 3, pp. 406–416 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-3-406-416

Введение

Выделяют два практических направления применения синглетного кислорода ($^1\text{O}_2$) в медицинской практике: фотодинамическая терапия (ФДТ) [1] и воздействие газовыми смесями [2–4]. В реферируемых изданиях за последние три десятка лет теме ФДТ посвящено более 2000 публикаций. Несмотря на свои достоинства, метод имеет ряд ограничений, связанных с малым временем жизни активных форм кислорода (АФК), недостаточной селективностью по отношению к клеткам с признаками патологии, необходимостью инъекционного введения фотокатализатора и инвазивного применения оптического излучателя в полости организма [5]. При этом из-за короткого времени жизни молекул АФК [6] терапевтическая интенсивность фотохимических процессов способна развиваться только *in situ* — на поверхности непосредственного контакта светового излучателя с тканью, насыщенной фотосенсибилизатором. Но наиболее важным недостатком ФДТ является токсичность фотосенсибилизаторов, поскольку в их основе лежат органические красители [5]. Решить эти задачи возможно с помощью принципиально иных подходов к генерации $^1\text{O}_2$, предлагающих вместо инвазивной фотогенерации физиологичный способ инкорпорации АФК путем ингаляционного введения.

Примечательно, что в газовой фазе время жизни молекул $^1\text{O}_2$ на несколько порядков превосходит их время жизни в жидкостях [6]. В связи с этим показано, что газообразный $^1\text{O}_2$ способен проявлять свою реагентную способность уже не *in situ*, а на расстоянии нескольких сантиметров от места (поверхности) фотогенерации АФК [7, 8]. Это свидетельствует о значительном потенциале данного направления в медицине. Однако данный способ гораздо менее известен. По теме воздействия газовыми смесями с $^1\text{O}_2$ в рамках настоящей работы было найдено не более 10 публикаций, большая часть которых собрана в [2].

Известно [8], что существенное влияние на эффективность фотогенерации материалами АФК оказывает их химический состав, структура и морфология. По этой причине выбор материала-фотогенератора АФК является важным этапом создания фотокаталитического прибора. При выборе материала-фотогенератора необходимо учитывать спектральные и энергетические параметры источника возбуждающего излучения.

Существует ряд зарубежных приборов-генераторов для ингаляционного способа введения АФК (Airnergy, Vital Air), применяемых в неврологии, кардиологии, реабилитации, спортивной медицине [4, 9]. Для них представлены результаты клинического применения [2]. Однако в представленных работах не рассматриваются аспекты генерации АФК, а также отсутствуют данные доклинических исследований, которые могли бы способствовать более полному пониманию механизма действия и определению клинически значимых показаний.

Целью работы является создание опытного образца прибора, генерирующего из кислорода воздуха $^1\text{O}_2$ с терапевтически-эффективной концентрацией для массового применения в медицине, а также оценка его эффективности.

Выбор фотокаталитического материала

Хорошо известно, что в ФДТ широко используются различные органические красители, обладающие высокой способностью к фотогенерации АФК и вводимые в организм пациента [10]. Низкие стабильность и химическая стойкость органических красителей во многих случаях не ограничивают возможность их эффективного практического применения. Однако для использования в приборах, предназначенных для длительного и многократного использования, не предусматривающего прямого контакта пациента с фотокатализатором, целесообразно применение стабильных и высокоэффективных оксидных фотокаталитических материалов. Целесообразность разработки новых наноструктур для повышения эффективности генерации $^1\text{O}_2$ рассмотрены в [11].

Многочисленными исследованиями было показано, что многие оксидные полупроводники (оксид титана (TiO_2), оксид цинка (ZnO), оксид олова (SnO_2) и другие) обладают высокими фотокаталитическими свойствами и способностью к фотогенерации химически активного кислорода. Введение в широко используемые однокомпонентные фотокаталитические оксиды (TiO_2 , ZnO) модифицирующих добавок других оксидов (SnO_2 , оксид железа (Fe_2O_3) и другие) позволяет сформировать полупроводниковые гетероструктуры [11–13]. Это обеспечивает подавление процессов рекомбинации в полупроводниках фотогенерированных электронно-дырочных пар и существенное усиление их фотокаталитической и антибактериальной активности.

Химический состав, кристаллическая структура и морфология оксидных материалов оказывают сильное влияние на их фотокаталитическую активность и способность к фотогенерации АФК. Процессы фотогенерации АФК протекают на поверхности материалов и повышение их дисперсности сопровождается значительным возрастанием фотокаталитической активности. В связи с этим, целесообразность применения наноразмерных материалов, обладающих большой удельной поверхностью и высокой фотокаталитической активностью, была отмечена в работах [14, 15].

Материалы и методы

В основе предлагаемого экспериментального образца лежит научный задел авторов настоящей работы по разработке оригинального фотокаталитического покрытия, представляющего собой систему $\text{ZnO-SnO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ [8, 11]. Кристаллическая структура образцов была исследована рентгенофазовым методом на дифрактометре Rigaku Ultima IV (Rigaku Corporation, Япония). Средний размер кристаллитов в структуре фотокатализатора был рассчитан по формуле Шеррера. Морфология и химический состав материалов изучены методами сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионным анализом на микроскопе TESCAN VEGA3, снабженном приставкой Advanced Aztec Energy (Oxford Instruments, Англия), и атомно-силовой микроскопией (Solver PRO-M (NT-MDT, Россия), полуконтактный режим, зонд HA_NC Etalon (радиус кривизны острия

менее 10 нм)). Для анализа пропускания покрытий использовался спектрофотометр «Lambda 850» с областью длин волн 175–900 нм (сканирующий двухлучевой с двойным монохроматором), источники излучения: в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне — дейтериевая лампа, в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне — галогенная лампа накаливания.

Для оценки способности прибора генерировать из свободного кислорода атмосферного воздуха $^1\text{O}_2$ был применен метод фотолуминесценции. Измерение спектров флуоресценции в ближней инфракрасной области спектра осуществлялось на спектрометре SDH-IV (SOLAR Laser Systems, Республика Беларусь) при возбуждении люминесценции светодиодом HPR40E, излучающим синий свет (максимум длины волны излучения $\lambda_{\text{max}} = 405$ нм) с плотностью излучения 19,5–30,6 мВт/см².

Для количественной оценки генерации и определения эффективности фотокаталитических материалов $^1\text{O}_2$ в работе использовались спиновые ловушки в сочетании с электронным парамагнитным резонансом (ЭПР). Селективность генерации $^1\text{O}_2$ подтверждалась методом, основанным на обесцвечивании водного раствора N,N-dimethyl-p-nitrosoaniline (RNO) с добавлением имидазола (Imd), который подробно описан в [16]. Концентрации RNO (Sigma Aldrich, США) и Imd (Sigma Aldrich, США) в приготовленном растворе составляли $2,5 \cdot 10^{-6}$ моль и $50 \cdot 10^{-3}$ моль соответственно. Кинетика обесцвечивания RNO регистрировалась спектрофотометрическим методом путем измерения оптической плотности раствора на длине волны максимума поглощения 440 нм с течением времени в два этапа: темновой (без УФ-облучения) и под УФ-воздействием. Общая площадь поверхности фотокаталитического покрытия, используемого для обесцвечивания раствора объемом 3 мл, составила 6,5 см². В качестве УФ-источника применялся диод максимумом длины волны излучения $\lambda_{\text{max}} = 365$ нм, спектральные измерения были проведены на спектрофлуориметре «Флюорат-02-Панорама» (ООО «Люмекс», Санкт-Петербург, Россия).

Для количественной оценки фотокаталитической активности предлагаемого прибора использовался метод на основе фотодеградации красителя родамина 6Ж. В качестве матрицы-носителя применены пластины пористого стекла марки ДШ-1М со средним размером пор 7 нм. Последние вымачивали в спиртовом растворе органического красителя в течение 2 ч. Концентрация раствора составила 10^{-3} моль/л. Затем матрицу с красителем высушивали в течение 12 ч. Пористое стекло устанавливалось на выходе и на расстоянии 40 мм от генератора СК. Для оценки концентрации $^1\text{O}_2$ измерялась интенсивность флуоресценции родамина 6Ж на поверхности пористого стекла на длине волны 560 нм при помощи спектрофлуориметра «Флюорат-02-Панорама» (ООО «Люмекс»).

Исследование структурных и оптических свойств покрытия

На рис. 1 представлена рентгенограмма разработанного фотокаталитического покрытия. На рентгенограм-

мах у образцов покрытий наблюдаются интенсивно выраженные пики, соответствующие отражению от плоскостей (100), (002) и (101) в структуре кристаллов ZnO, соответствующие углам Брэгга 31,8°, 34,5° и 36,4°, свидетельствующие о гексагональной структуре вюрцита ZnO. Пик (002) имеет самую высокую интенсивность в покрытиях ZnO, что указывает на преимущественную ориентацию ZnO в направлении (002), перпендикулярном к поверхности подложки. Наличие текстур в покрытиях на основе ZnO уже наблюдалось в работе [17]. Отсутствие каких-либо пиков, связанных с кристаллами SnO₂ и Fe₂O₃, может быть сопряжено с небольшой концентрацией этих компонентов в материале и с тем, что ионы Fe/Sn занимают позиции ионов Zn в решетке ZnO [18].

Расчеты, проведенные на основании данных рентгенофазового анализа, показали, что размеры нанокристаллов ZnO в разработанном покрытии не превышают 30 нм. Введение в состав материалов модифицирующих добавок SnO₂ и Fe₂O₃ способствует уменьшению размеров формирующихся нанокристаллов [13].

На снимках, полученных методом атомно-силовой микроскопии (рис. 2), наблюдается морфология поверхности покрытия, где высота кристаллов ZnO не превышает 35 нм. Это значение согласуется с данными рентгенофазового анализа и подтверждает однородность и мелкодисперсность полученного покрытия. Наличие выраженной кристалличности ZnO указывает на отсутствие значительных агрегаций в процессе синтеза, что положительно сказывается на фотокаталитических свойствах материала за счет создания дополнительных активных центров, что способствует повышению генерации $^1\text{O}_2$ и улучшению взаимодействия с органическими соединениями.

На рис. 3 представлены снимки композитного покрытия, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии. Покрытие состоит из плотно упакованных наночастиц ZnO, размеры и толщина которого не превышают 100 нм [8].

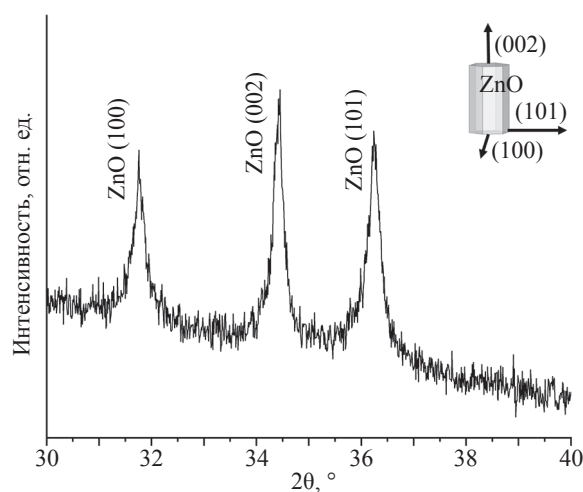


Рис. 1. Рентгеновская дифракционная картина покрытия на основе ZnO на стеклянной подложке

Fig. 1. X-ray diffraction pattern of ZnO-based coating on glass substrate

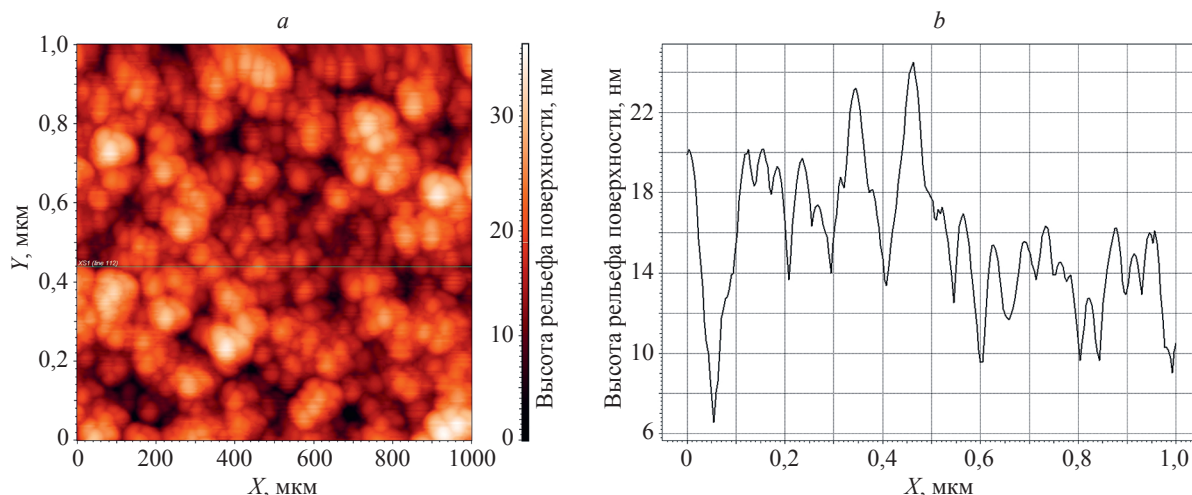


Рис. 2. Атомно-силовое изображение поверхности покрытия на основе ZnO на стеклянной подложке (a) и профилограмма по высоте (b)

Fig. 2. Atomic force microscopy image of the surface of ZnO-based coating on glass substrate (a) and height profile (b)

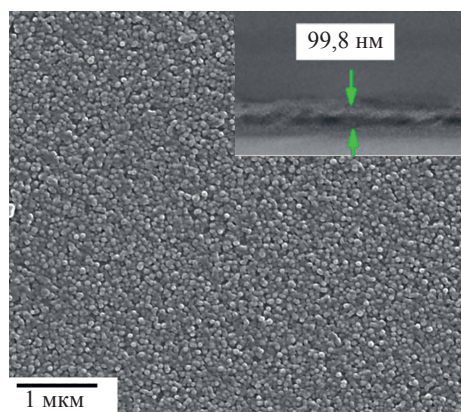


Рис. 3. Электронно-микроскопические снимки покрытия на основе ZnO на стеклянной подложке. На вставке показан торец покрытия на подложке

Fig. 3. Electron microscopic images of ZnO-based coating on glass substrate. The inset shows the cross-sectional view of the coating on the substrate

На рис. 4 продемонстрированы спектры пропускания покрытий. Полученные оксидные покрытия демонстрируют коэффициент пропускания для односто-

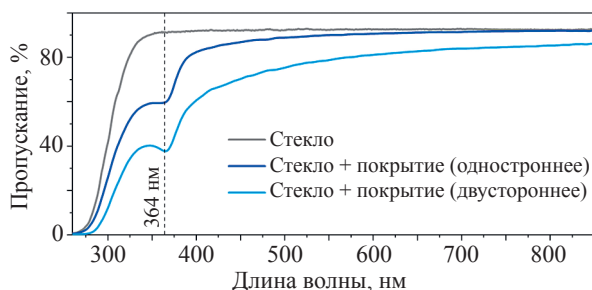


Рис. 4. Спектры поглощения образцов покрытия на основе ZnO на стеклянной подложке

Fig. 4. Absorption spectra of ZnO-based coating samples on glass substrate

ронного (82 %) и двустороннего (60 %) покрытий в видимых областях спектра. Видно, что на длинах волн менее 400 нм наблюдается экситонная полоса поглощения ZnO $\lambda_{\text{max}} = 364$ нм, соответствующая межзонным переходам в кристалле [19]. Дополнительный слой на стекле увеличивает поглощения в УФ-спектральном диапазоне.

Исследование процессов генерации $^1\text{O}_2$ в сочетании с ЭПР

Для количественной оценки генерации и определения эффективности фотокаталитических материалов $^1\text{O}_2$ в работе использовались спиновые ловушки в сочетании с ЭПР [20]. В качестве спиновой ловушки для обнаружения $^1\text{O}_2$ применено органическое соединение 2,2,6,6-тетраметилпиперидин (ТЕМР), избирательно и количественно реагирующий с $^1\text{O}_2$ по реакции с образованием радикала 2,2,6,6-тетраметилпиперидин-1-ил оксил (ТЕМРО), с характерным трехлинейчатым спектром ЭПР (рис. 5).

В качестве исследуемого образца использовалось двустороннее покрытие. На рис. 6 приведены ЭПР-спектры свободного радикала ТЕМРО, измеренные при облучении источником излучения с длиной волны 405 нм ($P = 18,4$ мВт/см²) различной продолжительности в присутствии стеклянной подложки с покрытием. Съемка спектров ЭПР проводилась при частоте

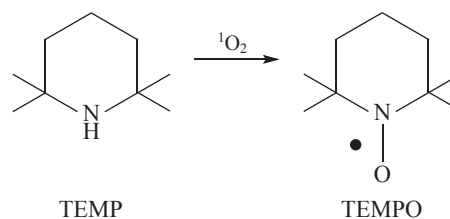


Рис. 5. Реакция образования ТЕМРО

Fig. 5. Reaction scheme for TEMPO formation

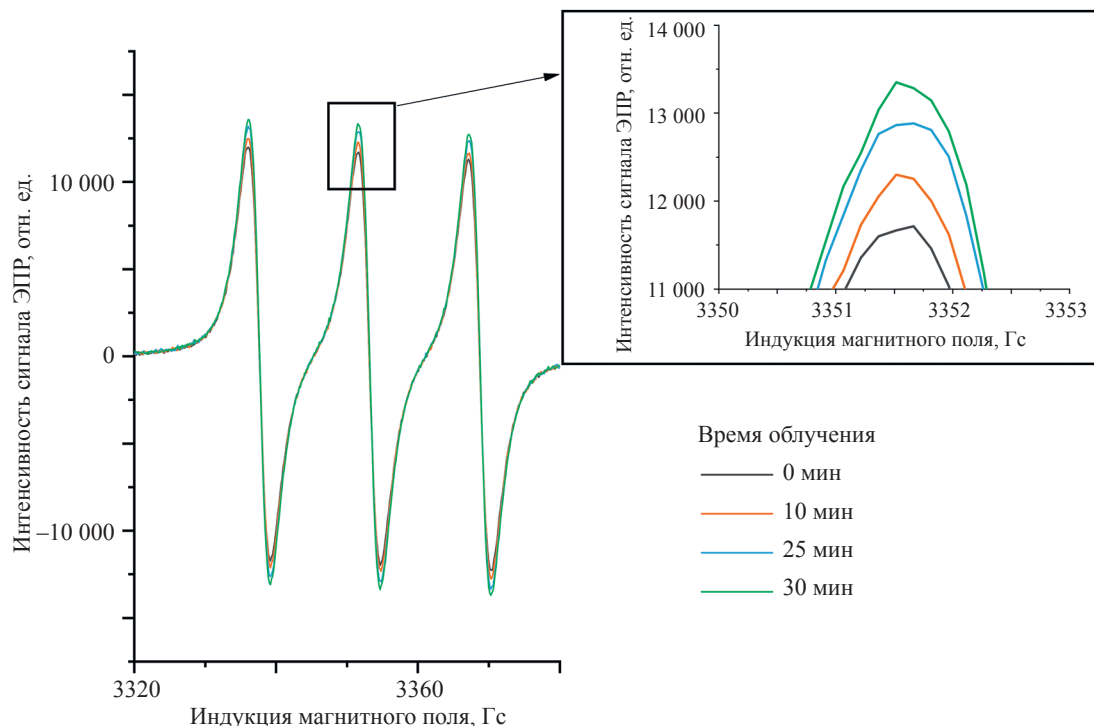


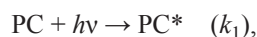
Рис. 6. Спектры с электронным парамагнитным резонансом (ЭПР) свободного радикала TEMPO в присутствии покрытия на основе ZnO в зависимости от продолжительности облучения источником излучения с длиной волны 405 нм ($P = 18,4 \text{ мВт/см}^2$)

Fig. 6. Electron Paramagnetic Resonance spectra of the free TEMPO radical in the presence of ZnO-based coating as a function of irradiation duration by a radiation source with a wavelength of 405 nm ($P = 18.4 \text{ mW/cm}^2$)

100 кГц. Наблюдается, что при УФ-облучении происходит увеличение концентрации нитроксильного радикала, что говорит об образовании $^1\text{O}_2$.

Для количественной оценки образовавшегося кислорода необходимо рассмотреть схему реакции фотокатализа с последующей реакцией TEMPO с $^1\text{O}_2$:

1. Фотовозбуждение фотокатализатора (PC)



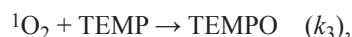
где PC^* — возбужденное состояние фотокатализатора; $h\nu$ — энергия фотона; k_1 — константа скорости фотовозбуждения PC.

2. Перенос энергии на триплетный кислород ($^3\text{O}_2$):



где k_2 — константа скорости переноса энергии.

3. Захват $^1\text{O}_2$ молекулой TEMPO:



где k_3 — константа скорости реакции TEMPO с $^1\text{O}_2$.

Поскольку в данном случае достигается квазистационарный режим по $[\text{PC}^*]$ и $[^1\text{O}_2]$, скорости по этим компонентам равны нулю и их можно записать следующим образом:

$$\frac{d[\text{PC}^*]}{dt} = k_1[\text{PC}] - k_2[\text{PC}^*][^3\text{O}_2] = 0,$$

$$\frac{d[\text{PC}^*]}{dt} = k_2[\text{PC}^*][^3\text{O}_2] - k_3[\text{TEMPO}][^1\text{O}_2] = 0,$$

где квадратные скобки $[\]$ — обозначение концентрации. Откуда для $[^1\text{O}_2]$ получаем:

$$[^1\text{O}_2] = \frac{k_1[\text{PC}]}{k_3[\text{TEMPO}]}.$$

Скорость суммарной реакции равна скорости образования TEMPO:

$$\frac{d[\text{TEMPO}]}{dt} = k_3[\text{TEMPO}][^1\text{O}_2].$$

После подстановки $[^1\text{O}_2]$:

$$\frac{d[\text{TEMPO}]}{dt} = k_1[\text{PC}].$$

Таким образом, для оценки образовавшегося $^1\text{O}_2$ необходима скорость образования TEMPO. Поскольку TEMPO взят в избытке, то скорость образования TEMPO зависит только от скорости образования $^1\text{O}_2$. Наблюдается, что при добавлении фотокаталитического образца происходит накопление нитроксильного радикала. Приведенные зависимости (рис. 7) линейны (коэффициент детерминации $R^2 > 0,9$), что позволяет сделать вывод о том, что кинетика фотогенерации $^1\text{O}_2$ покрытием описывается кинетическим уравнением псевдонулевого порядка. Расчеты показ-

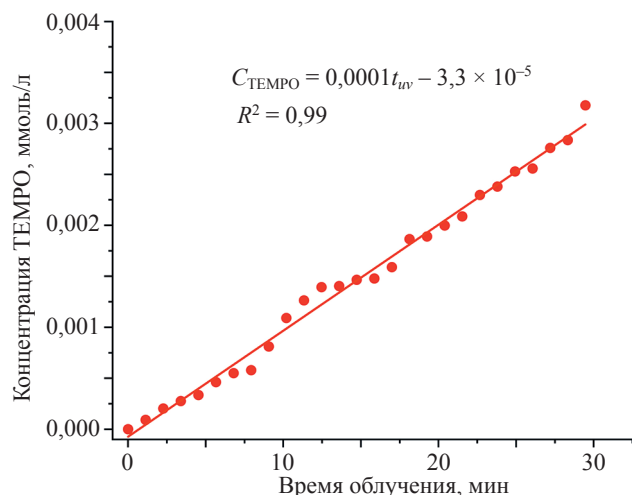


Рис. 7. Кинетика накопления нитроксильного радикала TEMPO в зависимости от времени освещения источника излучения в присутствии покрытия на основе ZnO в зависимости от продолжительности облучения источником излучения с длиной волны 405 нм ($P = 18,4 \text{ мВт/см}^2$).

C_{TEMPO} — концентрация радикала TEMPO; t_{uv} — время облучения

Fig. 7. Kinetics of TEMPO nitroxide radical accumulation as a function of irradiation time by a radiation source in the presence of ZnO-based coating vs. the duration of exposure to a radiation source with a wavelength of 405 nm ($P = 18.4 \text{ mW/cm}^2$).

C_{TEMPO} — concentration of the TEMPO radical; t_{uv} — irradiation time

ли, что константа скорости фотогенерации составляет $k = 100 \text{ (мкмоль/л)/мин}$.

Исследование генерации $^1\text{O}_2$ (фотокаталитических свойств)

Для селективного детектирования $^1\text{O}_2$ применялся метод с использованием RNO и Imd. В процессе облучения фотокатализатора генерируется $^1\text{O}_2$, который взаимодействует с имидазолом, что приводит к образованию промежуточного продукта — трансанулярного пероксида. Окисление имидазола до пероксо-формы вызывает обесцвечивание RNO. При этом такие АФК, как супероксидный и гидроксильный радикалы и перекись водорода, не оказывают значительного влияния на фотодеградацию RNO [16, 21]. По изменению оптической плотности полосы поглощения красителя в области длины волны 440 нм была выполнена оценка скорости продуцирования $^1\text{O}_2$. В качестве растворителя использовалась дистиллированная вода для создания условий, близким к среде в разрабатываемом генераторе.

Для исследования влияния фотокаталитических (ФК) покрытий на кинетику фоторазложения RNO были рассчитаны константы скорости нулевого порядка обесцвечивания красителя (k) по линейной зависимости концентрации (C) от времени (t) на длине волны максимума поглощения из уравнения [21]:

$$C = C_0 - kt,$$

где C_0 — начальная концентрация красителя в растворе.

На рис. 8 представлена зависимость концентрации RNO от времени взаимодействия с УФ-излучением без фотокатализатора (фотолиз) и с ФК-покрытиями без облучения (темновой период) и под УФ-воздействием. В темновой период концентрация оставалась постоянной, что свидетельствует об отсутствии существенного вклада абсорбции красителя на ФК-структурах. Под УФ-воздействием в процессе генерации $^1\text{O}_2$ фотокаталитическими покрытиями $\text{ZnO-SnO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ наблюдается значительное увеличение скорости обесцвечивания ($k_{\text{ФК}} = 0,01 \text{ (мкмоль/л)/мин}$) по сравнению с процессом фотолиза ($k_{\text{ФЛ}} = 0,002 \text{ (мкмоль/л)/мин}$), что подтверждает наличие $^1\text{O}_2$ в группе АФК на поверхности ФК.

Описание конструкции и методов измерения концентрации $^1\text{O}_2$ для генератора

На основании полученных выше фундаментальных данных разработана схема прибора для генерации $^1\text{O}_2$ под действием видимого излучения (длина волны 405 нм) из кислорода атмосферного воздуха. Генератор $^1\text{O}_2$ (рис. 9) представляет собой контейнер, содержащий массив пластинок из боросиликатного стекла с нанесенным фотосенсибилизирующим покрытием $\text{ZnO-SnO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$. В качестве вентилятора был выбран коммерчески доступный вентилятор для системного блока с геометрическими размерами $7 \times 7 \text{ см}$ и питанием 12 В. В качестве источника использован светодиодный источник для фотоотверждения полимерных материалов с длиной волны 405 нм и размерами излучающей поверхности $85 \times 80 \text{ мм}$. Покрытие наносилось на предметные стекла стандартного размера $75 \times 25 \text{ мм}$. Геометрические размеры генератора выбирались таким образом, чтобы все излучение источника попадало на

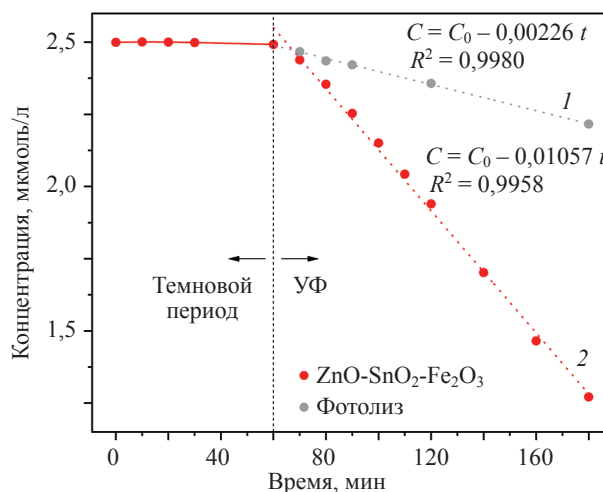
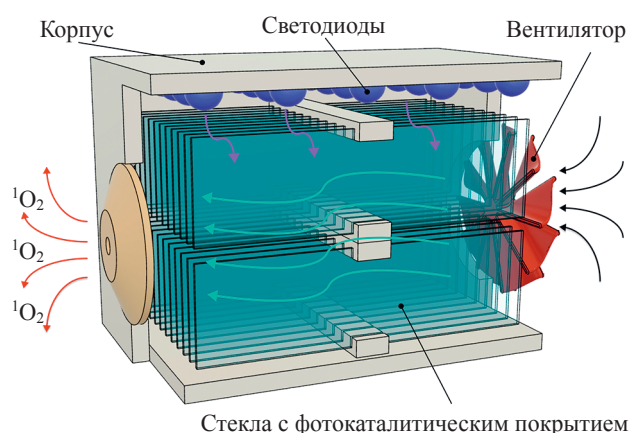


Рис. 8. Фотообесцвечивание RNO в присутствии Imd в процессе фотолиза (кривая 1) и в результате генерации $^1\text{O}_2$ фотокаталитическими покрытиями (кривая 2) в темновой период (без ультрафиолетового облучения) и под ультрафиолетовым воздействием

Fig. 8. Photobleaching of RNO in the presence of Imd during photolysis (curve 1) and as a result of singlet oxygen generation by photocatalytic coatings (curve 2) in the dark period (without ultraviolet irradiation) and under ultraviolet exposure

Рис. 9. 3D-модель разработанного генератора $^1\text{O}_2$ Fig. 9. 3D model of a $^1\text{O}_2$ generator

пластины. Пластины располагались перпендикулярно излучательной поверхности источника. Количество пластин выбиралось из критерия максимального заполнения рабочего объема генератора и расстояния между пластинами 2 мм. Количество пластинок получилось равным 22. Площадь каждой пластины составила 18 см^2 . В качестве источника излучения использовались светодиоды с длиной волны 405 нм и общей потребляемой мощностью 60 Вт. Поток воздуха обеспечивался вентилятором с рабочим потоком воздуха 230 л/мин.

На основании предлагаемой конструктивной модели разработан прототип прибора для изучения влияния генерируемого $^1\text{O}_2$ в экспериментальных условиях на животных (крысах). Прибор, адаптированный для индивидуально-вентилируемой клетки в виварии барьерного типа, представлен на рис. 10. Полученные данные по изучению системных эффектов экзогенно-генериру-

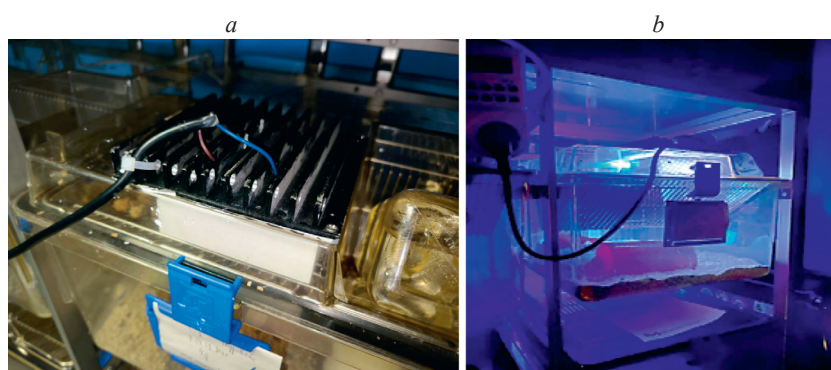
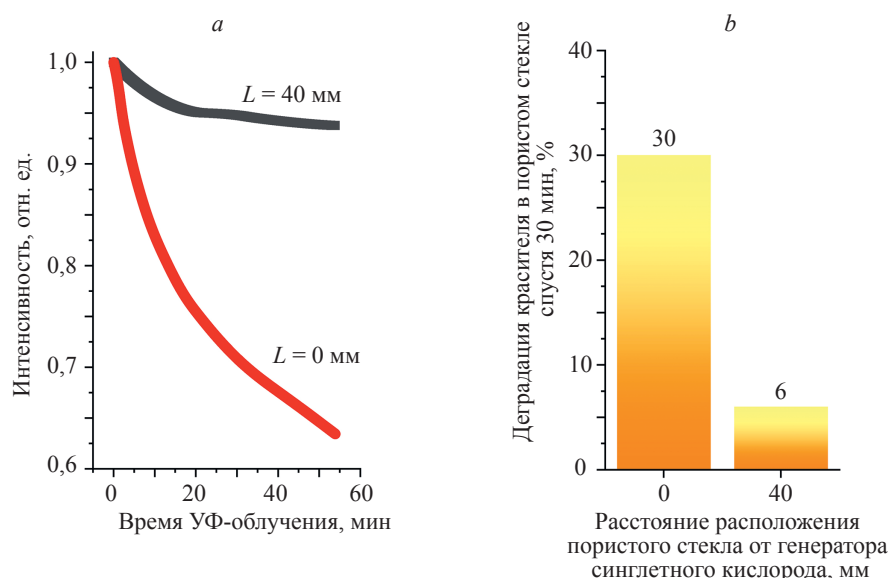
Рис. 10. Вид генератора $^1\text{O}_2$, адаптированного для индивидуально-вентилируемой клетки (ИВК) содержания животных вивария барьерного типа. Прибор, установленный в решетку ИВК для решения задач экспериментальной медицины (a).Генератор $^1\text{O}_2$ в работающем режиме в ИВК содержания крыс (b)

Fig. 10. Appearance of the singlet oxygen generator adapted for IVC animal housing in a barrier-type animal facility. The device installed in the IVC rack for experimental medicine purposes (a). Singlet oxygen generator in operating mode in the IVC housing for rats (b)

Рис. 11. Зависимость интенсивности флуоресценции для родамина 6Ж в пористом стекле от расстояния (L) и расположения пористого стекла от генератора синглетного кислорода (a); деградация в процентах красителя в зависимости от расстояния (b)Fig. 11. Fluorescence intensity of Rhodamine 6G in porous glass versus the distance (L) from the singlet oxygen generator (a), and dye degradation percentage as a function of distance (b)

емого $^1\text{O}_2$ в эксперименте *in vivo* представлены в работе [22]. Показана биологическая безопасность экзогенно-генерируемого $^1\text{O}_2$, попадающего в организм в ходе дыхания с атмосферным воздухом, выявлены первые биологические эффекты длительного воздействия, рассмотрены возможные механизмы их развития и области медицинского применения [22].

Концентрация $^1\text{O}_2$ на выходе генератора, оцененная способом расчета концентрации по фотодеградации органического красителя родамина 6Ж, представлена на рис. 11.

Уровень интенсивности пика флуоресценции через 30 мин экспозиции составил 0,7 от исходного значения. Таким образом, можно предположить, что за 30 мин произошло обесцвечивание 30 % молекул. Величину потока $^1\text{O}_2$ можно оценить как:

$$0,3C_0/t = 10 \text{ (мкмоль/л)/мин,}$$

где C_0 — начальная концентрация красителя в пористом стекле, 10^{-3} моль/л; t — время экспозиции.

Для образца, расположенного на расстоянии 40 мм от выхода генератора, снижение интенсивности флуоресценции наблюдалось только на 6 %, что соответствует потоку молекул $^1\text{O}_2$ с величиной 2 (мкмоль/л)/мин.

Заключение

На основании разработанного фотокаталитического покрытия системы $\text{ZnO-SnO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ разработан прототип генератора многофункционального использования для получения синглетного кислорода из кислорода атмосферного воздуха. Отличительными технологическими особенностями конструкции выступают много-разовое фотокаталитическое покрытие, экологическая безопасность материалов, доступность (действующие

поверхности не содержат дорогостоящих металлов платиновой группы), низкий класс энергопотребления, биологическая безопасность, обусловленная использованием излучения видимого диапазона.

Исследование генерации синглетного кислорода с использованием спиновых ловушек и электронного парамагнитного резонанса продемонстрировало, что используемые фотокаталитические материалы эффективно генерируют синглетный кислород при облучении излучением с длиной волны 405 нм. Кинетические характеристики генерации синглетного кислорода соответствовали константе скорости фотогенерации $k = 100$ (мкмоль/л)/мин, в то время как обесцвечивание красителя RNO под действием фотокаталитических покрытий показало заметное увеличение константы скорости до $k_{\text{ФК}} = 0,011$ (мкмоль/л)/мин по сравнению с фотолизом, что подтверждает активное участие синглетного кислорода в процессе деградации.

Конструкция генератора синглетного кислорода, основанная на использовании фотокаталитических покрытий и пористого стекла для детекции, позволила оценить поток синглетного кислорода, который составил 10 (мкмоль/л)/мин на выходе генератора.

Селективность генерации синглетного кислорода без дополнительных агрессивных примесей позволяет использовать генератор для решения задач, связанных с длительным непосредственным контактом с тканями человека, в присутствии человека в закрытых помещениях и безопасно как для потребителя, так и для персонала. Разработанный генератор синглетного кислорода предполагает создание линейки многофункциональных приборов. Это позволяет обсуждать возможности нового применения в медицине по терапевтическим и реабилитационным показаниям, в создании безопасной среды обитания здорового человека.

Литература

- Correia J.H., Rodrigues J.A., Pimenta S., Dong T., Yang Z. Photodynamic Therapy Review: Principles, Photosensitizers, Applications, and Future Directions // *Pharmaceutics*. 2021. V. 13. N 9. P. 1332. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13091332>
- Мартусевич А.А. Метаболические и гемодинамические эффекты синглетного кислорода: диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук. Казань, 2019. 167 с.
- Lundberg J., Lindgård A., Elander A., Soussi B. Improved energetic recovery of skeletal muscle in response to ischemia and reperfusion injury followed by in vivo 31P-magnetic resonance spectroscopy // *Microsurgery*. 2002. V. 22. N 4. P. 158–164. <https://doi.org/10.1002/micr.21744>
- Самосюк И.З., Чухраев Н.В., Писанко О.И., Диденко А.А., Бондаренко Л.Н., Курик Л.М. Синглетно-кислородная терапия. Аппараты «МИТ-С» // *Биомедицинская радиоэлектроника*. 2007. № 1. С. 67–75.
- Gunaydin G., Gedik M.E., Ayan S. Photodynamic Therapy—Current Limitations and Novel Approaches // *Frontiers in Chemistry*. 2021. V. 9. P. 691697. <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.691697>
- Wang K.-K., Song S., Jung S.-J., Hwang J.-W., Kim M.-G., Kim J.-H., Sung J., Lee J.-K., Kim Y.-R. Lifetime and diffusion distance of singlet oxygen in air under everyday atmospheric conditions // *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2020. V. 22. N 38. P. 21664–21671. <https://doi.org/10.1039/d0cp00739k>
- Sun X., Xu K., Chatzidakis A., Norby T. Photocatalytic generation of gas phase reactive oxygen species from adsorbed water: remote action

References

- Correia J.H., Rodrigues J.A., Pimenta S., Dong T., Yang Z. Photodynamic Therapy Review: Principles, Photosensitizers, Applications, and Future Directions. *Pharmaceutics*, 2021, vol. 13, no. 9, pp. 1332. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13091332>
- Martusevich A.A. *Metabolic and hemodynamic effects of singlet oxygen*. Dissertation for the search of the academic degree of candidate of biological sciences. Kazan, 2019, 167 p. (in Russian)
- Lundberg J., Lindgård A., Elander A., Soussi B. Improved energetic recovery of skeletal muscle in response to ischemia and reperfusion injury followed by in vivo 31P-magnetic resonance spectroscopy. *Microsurgery*, 2002, vol. 22, no. 4, pp. 158–164. <https://doi.org/10.1002/micr.21744>
- Samosiuk I.Z., Chukhraev N.V., Pisanko O.I., Didenko A.A., Bondarenko L.N., Kurik L.M. O.I. Singletno-oxygen therapy. apparatus “MIT — C”. *Biomedical Radioelectronics*, 2007, no. 1, pp. 67–75. (in Russian)
- Gunaydin G., Gedik M.E., Ayan S. Photodynamic Therapy—Current Limitations and Novel Approaches. *Frontiers in Chemistry*, 2021, vol. 9, pp. 691697. <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.691697>
- Wang K.-K., Song S., Jung S.-J., Hwang J.-W., Kim M.-G., Kim J.-H., Sung J., Lee J.-K., Kim Y.-R. Lifetime and diffusion distance of singlet oxygen in air under everyday atmospheric conditions. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2020, vol. 22, no. 38, pp. 21664–21671. <https://doi.org/10.1039/d0cp00739k>
- Sun X., Xu K., Chatzidakis A., Norby T. Photocatalytic generation of gas phase reactive oxygen species from adsorbed water: remote action

- and electrochemical detection // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021. V. 9. N 2. P. 104809. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104809>
8. Khomutinnikova L., Evstropiev S., Meshkovskii I., Bagrov I., Kiselev V. Ceramic ZnO-SnO₂-Fe₂O₃ powders and coatings — effective photogenerators of reactive oxygen species // *Ceramics*. 2023. V. 6. N 2. P. 886–997. <https://doi.org/10.3390/ceramics6020051>
 9. Ronald Dehmlow. Activating and energising water-saturated inhaled air [Электронный ресурс]. URL: [http://www.holmevalleywellbeing.com/files/image/files/Activated Oxygen Therapy/Dr Ronald Dehmlow Study.pdf](http://www.holmevalleywellbeing.com/files/image/files/Activated%20Oxygen%20Therapy/Dr%20Ronald%20Dehmlow%20Study.pdf) (дата обращения: 10.12.2024).
 10. Li B., Lin L., Lin H., Wilson B.C., Photosensitized singlet oxygen generation and detection: Recent advances and future perspectives in cancer photodynamic therapy // *Journal of Biophotonics*. 2016. V. 9. N 11–12. P. 1314–1325. <https://doi.org/10.1002/jbio.201600055>
 11. Гаврилова Д.А., Гаврилова М.А., Хомутичкикова Л.Л., Евстропьев С.К., Мешковский И.К. Оптимизация химического состава и структуры фотокатализаторов системы ZnO-SnO₂-Fe₂O₃ // *Оптика и спектроскопия*. 2024. Т. 132. № 4. С. 413–420. <https://doi.org/10.61011/OS.2024.04.58220.6016-24>
 12. Lachheb H., Ajala F., Hamrouni A., Houas A., Parrino F., Palmisano L. Electron transfer in ZnO-Fe₂O₃ aqueous slurry systems and its effects on visible light photocatalytic activity // *Catalysis Science and Technology*. 2017. V. 7. N 18. P. 4041–4047. <https://doi.org/10.1039/c7cy01085k>
 13. Evstropiev S.K., Karavaeva A.V., Vasilyev V.N., Nikonorov N.V., Aseev V.A., Dukelskii K.V., Lesnykh L.L. Bactericidal properties of ZnO-SnO₂ nanocomposites prepared by polymer-salt method // *Materials Science and Engineering B*. 2021. V. 264. P. 114877. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2020.114877>
 14. Saratovskii A.S., Senchik K.Yu., Karavaeva A.V., Evstropiev S.K., Nikonorov N.V. Photo-oxygenation of water media using photoactive plasmonic nanocomposites // *The Journal of Chemical Physics*. 2022. V. 156. N 20. P. 201103. <https://doi.org/10.1063/5.0094408>
 15. Shelemanov A.A., Nuryev R.K., Evstropiev S.K., Kiselev V.M., Nikonorov N.V. The influence of polyvinylpyrrolidone on the structure and optical properties of ZnO-MgO nanocomposites synthesized by the polymer-salt method // *Optics and Spectroscopy*. 2021. V. 129. N 12. P. 1300–1305. <https://doi.org/10.1134/S0030400X21090198>
 16. Kraljić I., El Mohsni S. A new method for the detection of singlet oxygen in aqueous solutions // *Photochemistry and Photobiology*. 1978. V. 28. N 4–5. P. 577–581. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1978.tb06972.x>
 17. Evstropiev S.K., Lesnykh L.L., Nikonorov N.V., Karavaeva A.V., Kolobkova E.V., Oreshkina K.V., Mironov L.Yu., Bagrov I.V. Transparent ZnO-SnO₂ photocatalytic nanocoatings prepared by polymer-salt method // *Optics and Spectroscopy*. 2019. V. 126. N 4. P. 431–438. <https://doi.org/10.1134/S0030400X19040064>
 18. Yi S., Cui J., Li S., Zhang L., Wang D., Lin Y. Enhanced visible-light photocatalytic activity of Fe/ZnO for rhodamine B degradation and its photogenerated charge transfer properties // *Applied Surface Science*. 2014. V. 319. N 1. P. 230–236. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.06.151>
 19. Guo L., Yang S., Yang C., Yu P., Wang J., Ge W., Wong G.K.L. Highly monodisperse polymer-capped ZnO nanoparticles: Preparation and optical properties // *Applied Physics Letters*. 2000. V. 76. N 20. P. 2901–2903. <https://doi.org/10.1063/1.126511>
 20. Khomutinnikova L.L., Evstropiev S.K., Meshkovskii I.K., Moskalenko I.V., Bagrov I.V., Skorb E.V. Intensive singlet oxygen photogeneration and photocatalytic activity of Sn,Fe-doped ZnO-based composites // *Journal of Photochemistry and Photobiology, A: Chemistry*. 2025. V. 462. P. 116254. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2024.116254>
 21. Herman J., Neal S.L. Efficiency comparison of the imidazole plus RNO method for singlet oxygen detection in biorelevant solvents // *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2019. V. 411. N 20. P. 5287–5296 <https://doi.org/10.1007/s00216-019-01910-2>
 22. Журавский С.Г., Мешковский И.К., Подъячева Е.Ю., Шульмейстер Г.А., Зелинская И.А., Плясцов С.А., Хомутичкикова Л.Л., Евстропьев С.К., Баиндурашвили А.Г., Васильев В.Н. Системные эффекты хронической ингаляции воздушной смеси с синглетным кислородом у крыс // *Медицинский академический журнал*. 2025. Т. 25. № 2. С. 41–50.
 - and electrochemical detection. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, vol. 9, no. 2, pp. 104809. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104809>
 8. Khomutinnikova L., Evstropiev S., Meshkovskii I., Bagrov I., Kiselev V. Ceramic ZnO-SnO₂-Fe₂O₃ powders and coatings — effective photogenerators of reactive oxygen species. *Ceramics*, 2023, vol. 6, no. 2, pp. 886–997. <https://doi.org/10.3390/ceramics6020051>
 9. Ronald Dehmlow. *Activating and energising water-saturated inhaled air*. Available at: [http://www.holmevalleywellbeing.com/files/image/files/Activated Oxygen Therapy/Dr Ronald Dehmlow Study.pdf](http://www.holmevalleywellbeing.com/files/image/files/Activated%20Oxygen%20Therapy/Dr%20Ronald%20Dehmlow%20Study.pdf) (accessed: 10.12.2024).
 10. Li B., Lin L., Lin H., Wilson B.C., Photosensitized singlet oxygen generation and detection: Recent advances and future perspectives in cancer photodynamic therapy. *Journal of Biophotonics*, 2016, vol. 9, no. 11–12, pp. 1314–1325. <https://doi.org/10.1002/jbio.201600055>
 11. Gavrilova D.A., Gavrilova M.A., Khomutinnikova L.L., Evstropiev S.K., Meshkovskii I.K. Optimization of chemical composition and structure of the photocatalyst. *Optics and Spectroscopy*, 2024, vol. 132, no. 4, pp. 380–386. <https://doi.org/10.61011/EOS.2024.04.58882.6016-24>
 12. Lachheb H., Ajala F., Hamrouni A., Houas A., Parrino F., Palmisano L. Electron transfer in ZnO-Fe₂O₃ aqueous slurry systems and its effects on visible light photocatalytic activity. *Catalysis Science and Technology*, 2017, vol. 7, no. 18, pp. 4041–4047. <https://doi.org/10.1039/c7cy01085k>
 13. Evstropiev S.K., Karavaeva A.V., Vasilyev V.N., Nikonorov N.V., Aseev V.A., Dukelskii K.V., Lesnykh L.L. Bactericidal properties of ZnO-SnO₂ nanocomposites prepared by polymer-salt method. *Materials Science and Engineering B*, 2021, vol. 264, pp. 114877. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2020.114877>
 14. Saratovskii A.S., Senchik K.Yu., Karavaeva A.V., Evstropiev S.K., Nikonorov N.V. Photo-oxygenation of water media using photoactive plasmonic nanocomposites. *The Journal of Chemical Physics*, 2022., vol. 156, no. 20, pp. 201103. <https://doi.org/10.1063/5.0094408>
 15. Shelemanov A.A., Nuryev R.K., Evstropiev S.K., Kiselev V.M., Nikonorov N.V. The influence of polyvinylpyrrolidone on the structure and optical properties of ZnO-MgO nanocomposites synthesized by the polymer-salt method. *Optics and Spectroscopy*, 2021, vol. 129, no. 12, pp. 1300–1305. <https://doi.org/10.1134/S0030400X21090198>
 16. Kraljić I., El Mohsni S. A new method for the detection of singlet oxygen in aqueous solutions. *Photochemistry and Photobiology*, 1978, vol. 28, no. 4–5, pp. 577–581. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1978.tb06972.x>
 17. Evstropiev S.K., Lesnykh L.L., Nikonorov N.V., Karavaeva A.V., Kolobkova E.V., Oreshkina K.V., Mironov L.Yu., Bagrov I.V. Transparent ZnO-SnO₂ photocatalytic nanocoatings prepared by polymer-salt method. *Optics and Spectroscopy*, 2019, vol. 126, no. 4, pp. 431–438. <https://doi.org/10.1134/S0030400X19040064>
 18. Yi S., Cui J., Li S., Zhang L., Wang D., Lin Y. Enhanced visible-light photocatalytic activity of Fe/ZnO for rhodamine B degradation and its photogenerated charge transfer properties. *Applied Surface Science*, 2014, vol. 319, no. 1, pp. 230–236. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.06.151>
 19. Guo L., Yang S., Yang C., Yu P., Wang J., Ge W., Wong G.K.L. Highly monodisperse polymer-capped ZnO nanoparticles: Preparation and optical properties. *Applied Physics Letters*, 2000, vol. 76, no. 20, pp. 2901–2903. <https://doi.org/10.1063/1.126511>
 20. Khomutinnikova L.L., Evstropiev S.K., Meshkovskii I.K., Moskalenko I.V., Bagrov I.V., Skorb E.V. Intensive singlet oxygen photogeneration and photocatalytic activity of Sn,Fe-doped ZnO-based composites. *Journal of Photochemistry and Photobiology, A: Chemistry*, 2025, vol. 462, pp. 116254. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2024.116254>
 21. Herman J., Neal S.L. Efficiency comparison of the imidazole plus RNO method for singlet oxygen detection in biorelevant solvents. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2019, vol. 411, no. 20, pp. 5287–5296 <https://doi.org/10.1007/s00216-019-01910-2>
 22. Zhuravskii S.G., Meshkovskii I.K., Podiacheva E.Iu., Shulmeister G.A., Zelinskaia I.A., Pliastcov S.A., Khomutinnikova L.L., Evstropiev S.K., Baindurashvili A.G., Vasilev V.N. Systemic effects of chronic inhalation of air mixture with singlet oxygen in rats. *Medical Academic Journal*, 2025, vol. 25, no. 2, pp. 41–50. (in Russian)

Авторы

Хомутинникова Лариса Львовна — кандидат технических наук, инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57958865600](https://orcid.org/0000-0003-0918-6350), <https://orcid.org/0000-0003-0918-6350>, larahlesnyh@yandex.ru

Быков Егор Павлович — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57376288300](https://orcid.org/0000-0002-5829-2590), <https://orcid.org/0000-0002-5829-2590>, egor1999b@gmail.com

Плясов Семён Алексеевич — кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57195587476](https://orcid.org/0000-0002-5764-0960), <https://orcid.org/0000-0002-5764-0960>, s.plyastsov@gmail.com

Евстропьев Сергей Константинович — доктор химических наук, ведущий инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 6507317768](https://orcid.org/0000-0002-0160-8443), <https://orcid.org/0000-0002-0160-8443>, evstropiev@bk.ru

Мешковский Игорь Касьянович — доктор технических наук, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 6603640937](https://orcid.org/0000-0003-3470-1000), <https://orcid.org/0000-0003-3470-1000>,

Журавский Сергей Григорьевич — доктор медицинских наук, ведущий научный сотрудник, Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова, Санкт-Петербург, 197341, Российская Федерация; ведущий инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 8244733500](https://orcid.org/0000-0002-5960-068X), <https://orcid.org/0000-0002-5960-068X>, s.jour@mail.ru

Баушев Владимир Николаевич — доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0004-3116-3563>, vb@npp17.ru

Authors

Larisa L. Khomutinnikova — PhD, Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57958865600](https://orcid.org/0000-0003-0918-6350), <https://orcid.org/0000-0003-0918-6350>, larahlesnyh@yandex.ru

Egor P. Bykov — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57376288300](https://orcid.org/0000-0002-5829-2590), <https://orcid.org/0000-0002-5829-2590>, egor1999b@gmail.com

Semyon A. Plyastsov — PhD, Head of Laboratory, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57195587476](https://orcid.org/0000-0002-5764-0960), <https://orcid.org/0000-0002-5764-0960>, s.plyastsov@gmail.com

Sergey K. Evstropiev — D.Sc. (Chemistry), Leading Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 6507317768](https://orcid.org/0000-0002-0160-8443), <https://orcid.org/0000-0002-0160-8443>, evstropiev@bk.ru

Igor K. Meshkovskii — D.Sc., Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 6603640937](https://orcid.org/0000-0003-3470-1000), <https://orcid.org/0000-0003-3470-1000>,

Sergei G. Zhuravskii — D.Sc. (Medicine), Leading Researcher, Almazov National Medical Research Centre, Saint Petersburg, 197341, Russian Federation; Leading Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 8244733500](https://orcid.org/0000-0002-5960-068X), <https://orcid.org/0000-0002-5960-068X>, s.jour@mail.ru

Vladimir N. Baushev — Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0004-3116-3563>, vb@npp17.ru

Статья поступила в редакцию 16.01.2025

Одобрена после рецензирования 22.04.2025

Принята к печати 28.05.2025

Received 16.01.2025

Approved after reviewing 22.04.2025

Accepted 28.05.2025



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»