

НАНОБИОМЕДИЦИНА
И НАНОФАРМАЦЕВТИКА

УДК 544.478.42+57.042.2

ВЛИЯНИЕ СВЕТА НА ПРОТИВОГРИБКОВУЮ АКТИВНОСТЬ
СУБМИКРОННЫХ ЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ВОЛЬФРАМА

© 2022 г. В. Ф. Смирнов^{1,*}, О. Н. Смирнова¹, А. Ю. Шишкин¹, Н. А. Аникина¹, Д. Г. Фукина¹,
А. В. Корягин¹, Е. В. Сулейманов¹

¹ Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия

*E-mail: biodeg@mail.ru

Поступила в редакцию 24.12.2021 г.

После доработки 02.03.2022 г.

Принята к публикации 02.03.2022 г.

Исследована противогрибковая активность мелкодисперсных частиц субмикронного размера WO_3 и $RbTe_{1.5}W_{0.5}O_6$ в отношении спор и вегетативного мицелия грибов *Aspergillus niger* и *Penicillium chrysogenum*. Установлено, что соединения WO_3 и $RbTe_{1.5}W_{0.5}O_6$ вызывают снижение выживаемости микромицетов в условиях темноты. Противогрибковая активность возрастала как в отношении спор, так и вегетативного мицелия грибов в условиях действия света мощностью 30 и 50 Вт с плотностью потока излучения 325.5 и 524 Вт/м² соответственно, что указывает на их фотокаталитическую активность. Отмечено, что противогрибковая активность $RbTe_{1.5}W_{0.5}O_6$ и в условиях действия света, и в условиях темноты в отношении спор и вегетативного мицелия грибов была выше по сравнению с WO_3 . С увеличением длительности экспозиции и интенсивности освещения противогрибковый эффект исследуемых соединений усиливался.

DOI: 10.56304/S1992722322030177

ВВЕДЕНИЕ

Среди биоцидных препаратов в настоящее время широкое применение находят вещества на основе оксидов тяжелых металлов (ZnO , TiO_2 , CuO). Данные соединения способны подавлять жизнедеятельность бактерий, грибов, водорослей и используются в медицине, ветеринарии, сельском хозяйстве, а также в качестве средств защиты промышленных материалов от биоповреждений и биообрастаний [1–3]. Среди таких антимикробных препаратов все больше внимания уделяется мелкодисперсным микро- и наноразмерным частицам оксидов металлов [4–6]. Для данных соединений отмечена фотокаталитическая активность, т.е. при воздействии на них света в различных областях спектра имеет место увеличение антимикробного эффекта [4, 7, 8]. Известно, что биоцидное действие фотокаталитически активных микро- и наночастиц тяжелых металлов зависит от целого ряда факторов: размера и формы частиц, их концентрации, светового спектра, мощности освещения, а также от вида биологического объекта [4, 9, 10]. Наличие фотокаталитической активности позволяет создавать новое поколение биоцидных и дезинфицирующих средств с регулируемым антимикробным эффектом как в плане интенсивности биоцидного действия, так и

в плане избирательности по отношению к видам микроорганизмов [4].

Известно, что TiO_2 , ZnO и другие простые оксиды металлов и их модификации [11–15] фотокаталитически активны только в УФ-диапазоне или близкой к УФ-области видимого света. УФ-диапазон составляет ~5–9% в спектре солнечного света (100–400 нм), при этом распределение интенсивности между этими длинами волн не одинаково и основная часть приходится на 350–400 нм. Соединения, поглощающие свет с длиной волны менее 400 нм, работают под действием солнечного света малоэффективно и требуют отдельный источник излучения на длине волны поглощения. В связи с этим актуальным является поиск новых соединений, поглощающих свет в видимом диапазоне, т.е. проявляют фотокаталитическую активность.

В [15] была исследована антимикробная активность мелкодисперсных частиц субмикронного размера WO_3 и $RbTe_{1.5}W_{0.5}O_6$ (синтезированного в НИИХ ННГУ им. Н.И. Лобачевского) по отношению к бактериям *Escherichia coli* и *Staphylococcus aureus*. Установлено, что все исследуемые соединения вызывают снижение выживаемости бактерий как в условиях темноты, так и под воздействием света. Показано, что уменьшение

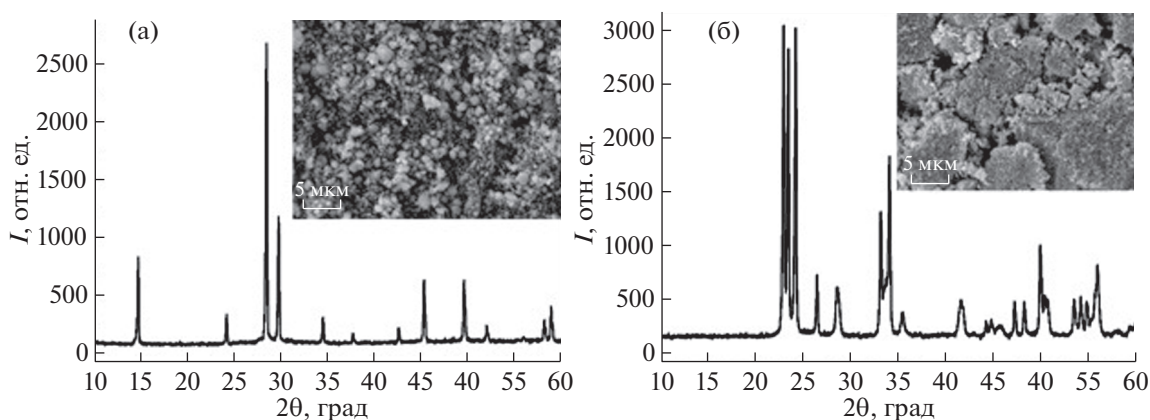


Рис. 1. Рентгенограмма и РЭМ-изображение порошка RbTe_{1.5}W_{0.5}O₆ (а) и WO₃ (б).

размеров частиц RbTe_{1.5}W_{0.5}O₆ усиливало их антимикробный эффект. Действие света (мощность источников 30 и 50 Вт) усиливало антимикробную активность исследуемых соединений, особенно для RbTe_{1.5}W_{0.5}O₆ с меньшим размером частиц, что говорит об их фотокаталитической активности. С увеличением длительности экспозиции антимикробный эффект исследуемых соединений усиливался.

Целью настоящей работы являлось исследование противогрибковой активности соединений WO₃ и RbTe_{1.5}W_{0.5}O₆ в условиях темноты и воздействия света на споры и вегетативный мицелий микромицетов.

Для реализации этой цели были поставлены следующие задачи:

- сравнить активность действия данных соединений на споры и вегетативный мицелий грибов *Aspergillus niger* и *Penicillium chrysogenum* как в условиях темноты, так и в условиях воздействия света;

- выявить зависимость противогрибкового эффекта от источников освещения 30 и 50 Вт с плотностью потока излучения 325.5 и 524 Вт/м² соответственно;

- определить время экспозиции, необходимое для появления противогрибкового эффекта исследуемых соединений в отношении спор и вегетативного мицелия грибов *Aspergillus niger* и *Penicillium chrysogenum*;

- на основе ряда физико-химических характеристик исследуемых веществ с помощью спектроскопических методов определить возможные фотохимические реакции, приводящие к образованию активных форм кислорода (АФК).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объектов исследований использовали оксид вольфрама(III) (WO₃) (1) со средним

размером частиц ~670 нм; сложный оксид RbTe_{1.5}W_{0.5}O₆ (2) со структурой β-пирохлора, средним диаметром частиц ~740 нм. В качестве образца мелкодисперсного оксида вольфрама WO₃ использовали химически чистый реактив, который предварительно перетирали в агатовой ступке в этиловом спирте.

Соединение 2 получали твердофазным методом синтеза из химически чистых исходных реактивов (нитрат рубидия, оксиды теллура(IV) и вольфрама(VI)), взятых в стехиометрическом соотношении, при 700°C в течение 10 ч. Поликристаллический порошок перед дальнейшими исследованиями подвергался диспергированию в шаровой мельнице в течение 16–18 ч в этиловом спирте [15–18].

Фазовую однородность полученного образца и использованного реактива проверяли методом рентгенофазового анализа (РФА). Исследование порошкового образца проводили на дифракто-

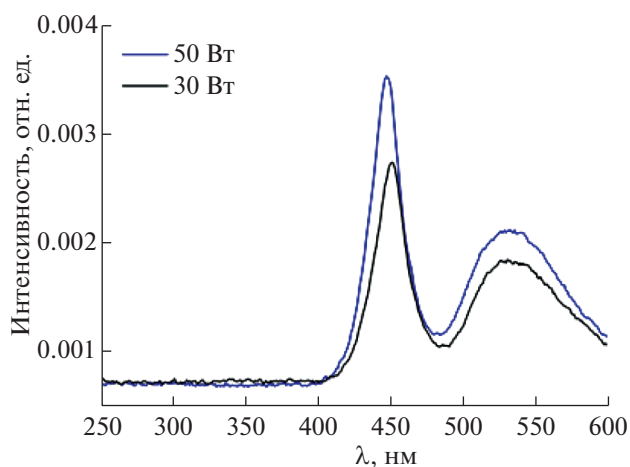


Рис. 2. Спектры светодиодных прожекторов PFL-C3 мощностью 30 и 50 Вт.

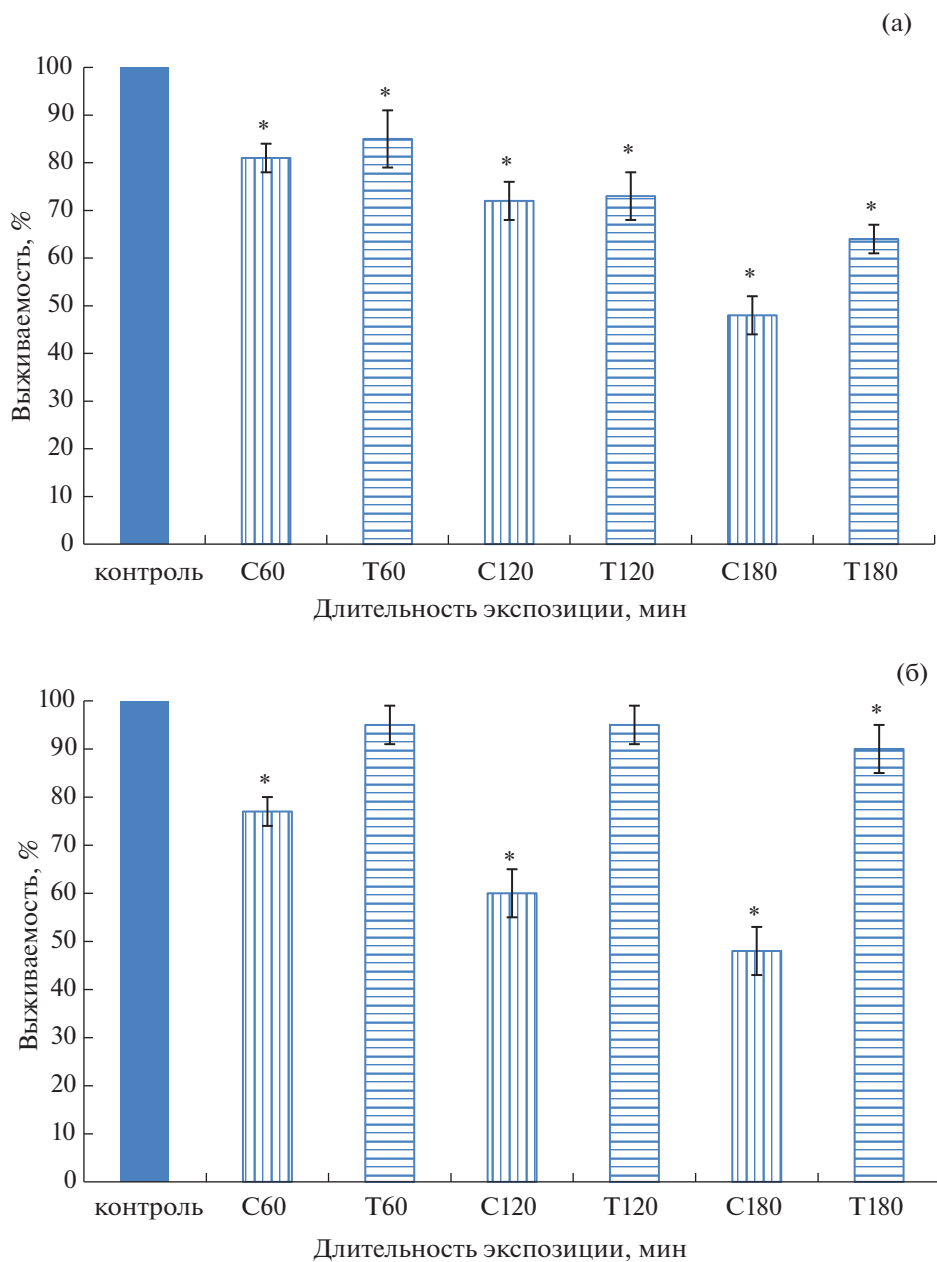


Рис. 3. Выживаемость спор грибов *P. chrysogenum* (а) и *A. niger* (б) в присутствии WO_3 в условиях темноты (Т) и при воздействии источника света 30 Вт (С).

метре Shimadzu XRD-6100 (Shimadzu, Япония) с использованием Ni-фильтра (CuK_{α} , $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$) в интервале 2θ 10° – 60° со скоростью $1^{\circ}/\text{мин}$.

Фотографии частиц порошковых образцов получены методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе JSM-IT300LV (JEOL, Япония) с диаметром электронного зонда до 5 нм (рабочее напряжение 20 кВ). Исследование поверхности образцов проводили с использованием низкоэнергетичных вторичных электронов. Исследование элементного состава образца проводили методом электронно-зондового мик-

роанализа с помощью микроскопа, оснащенного детектором X-Max^N 20 (OxfordInstruments) $K_{\alpha}(O)$ и $L_{\alpha}(Rb, Te, W)$.

Объемное и количественное распределение частиц по размерам в полученном порошковом образце определяли методом лазерной дифракции света при помощи анализатора SALD-2300 (SHIMADZU, Япония).

Соединения **1** и **2** стерилизовали сухим жаром при температуре 180°C в течение 2 ч.

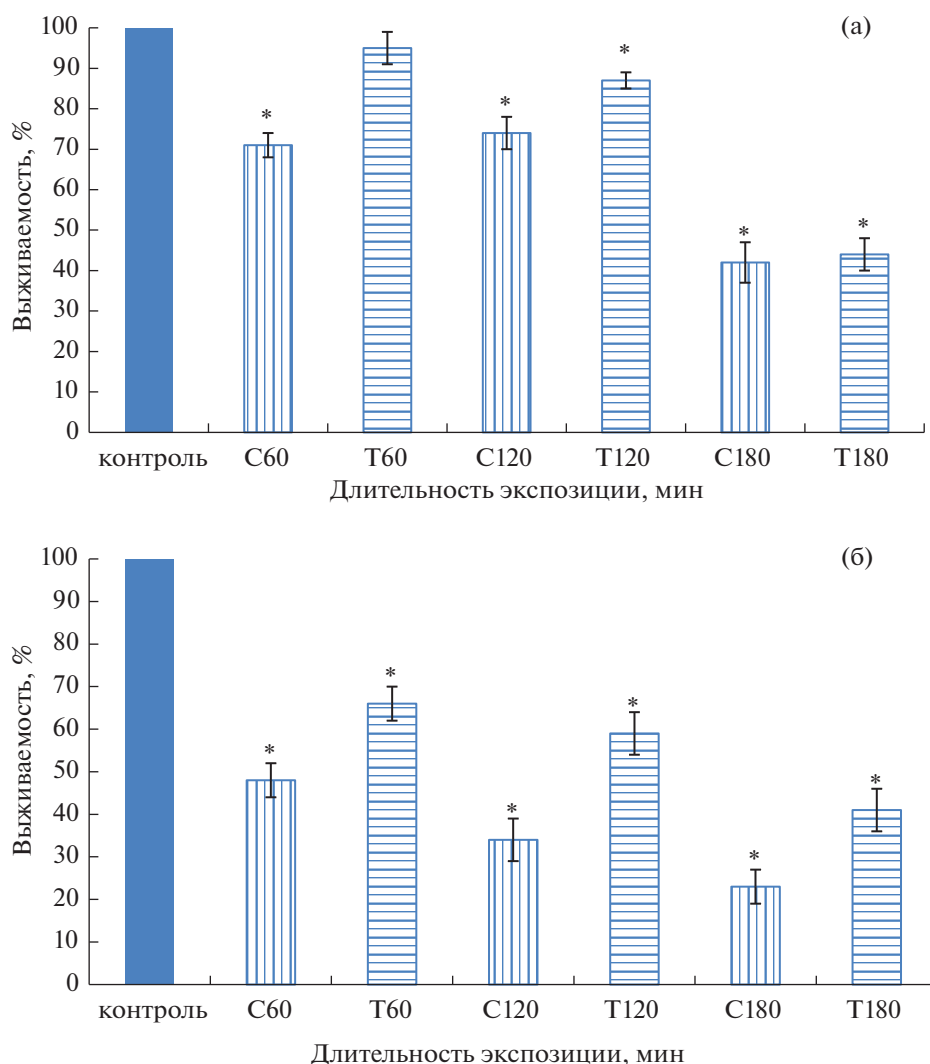


Рис. 4. Выживаемость спор грибов *P. chrysogenum* (а) и *A. niger* (б) в присутствии $\text{RbTe}_{1.5}\text{W}_{0.5}\text{O}_6$ в условиях темноты (Т) и при воздействии источника света 30 Вт (С).

В качестве источника света использовали светодиодные пылевлагозащищенные прожекторы JAZZWAY PFL-C3 мощностью 30 и 50 Вт. Поверхностная плотность потока излучения светодиодных прожекторов, воздействующая на поверхность образцов химических соединений, составляла 325.5 Вт/м^2 (для источника 30 Вт) и 524 Вт/м^2 (для источника 50 Вт). Данные источники света имеют одинаковый волновой спектр и различаются только по интенсивности (рис. 2).

В качестве тест-культур микроорганизмов использовали штаммы мицелиальных грибов, полученные из Всероссийской коллекции микроорганизмов (ИБФМ РАН, Пушкино): *Aspergillus niger* van Tieghen ВКМ F-1119, *Penicillium chrysogenum* Thom ВКМ F-245. Данные микромицеты являются активными биодеструкторами различных промышленных материалов.

В экспериментах изучали противогрибковое действие исследуемых препаратов как на споры грибов, так и на вегетативный мицелий.

Для оценки действия света на противогрибковую активность соединений готовили суспензию спор грибов в стерильной воде. В 10 мл суспензии спор грибов (с титром 10^4 Кл/мл) вносили соединения так, чтобы их конечная концентрация составляла 2 мг/мл. Опытные варианты подвергали воздействию света (30 и 50 Вт) в течение 60, 120 и 180 мин. Другие варианты эксперимента выдерживали в условиях темноты в течение таких же периодов времени. Контрольными служили варианты со спорами грибов без исследуемых соединений. Все варианты помещали на орбитальные шейкеры при 150 об./мин. После этого определяли изменение титра культур грибов чашечным методом (метод Коха) путем посева грибов на агаризо-

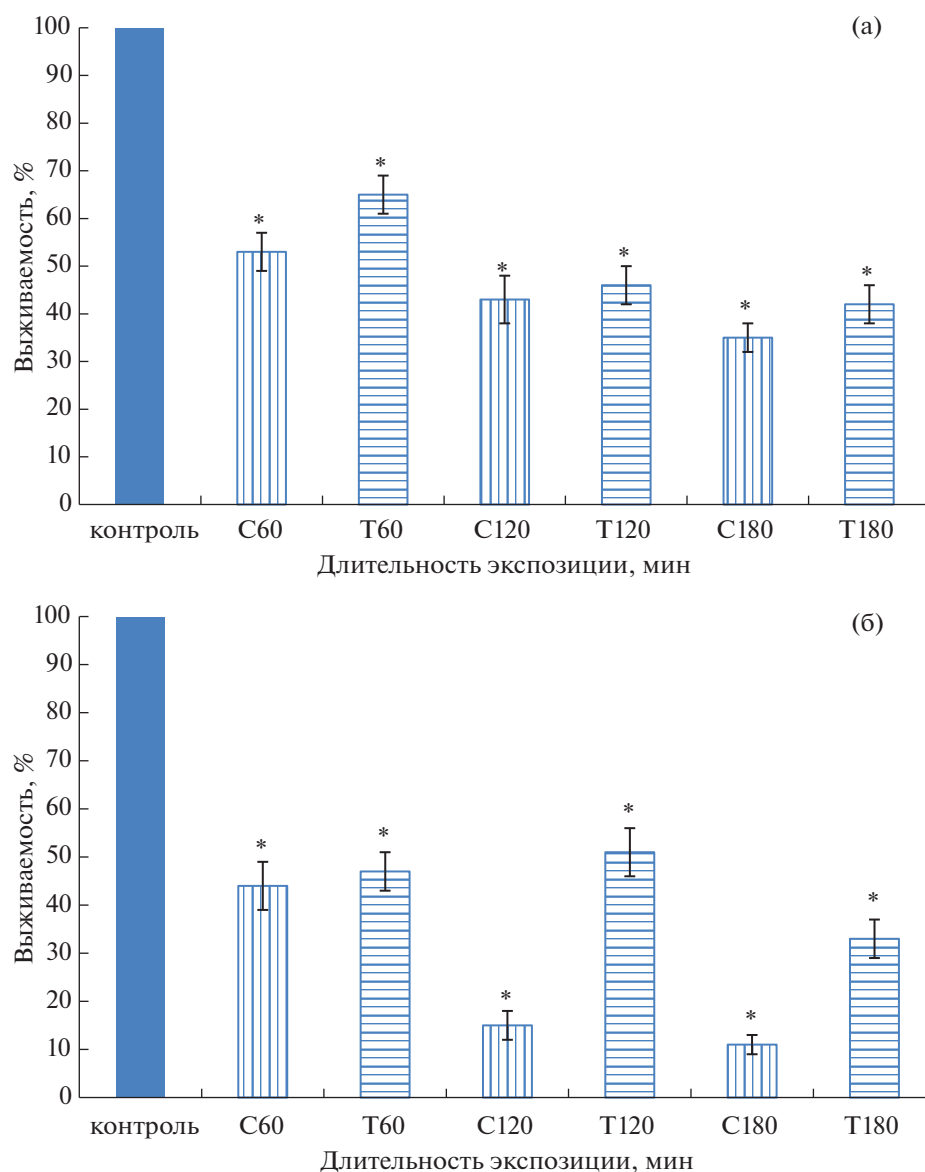


Рис. 5. Выживаемость спор грибов *P. chrysogenum* (а) и *A. niger* (б) в присутствии WO_3 в условиях темноты (Т) и при воздействии источника света 50 Вт (С).

ванную среду Чапека–Докса ($NaNO_3$ – 2.0, KH_2PO_4 – 0.74, K_2HPO_4 – 0.3, KCl – 0.5, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ – 0.5, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ – 0.01 г/л, агар-агар – 20.0, сахара – 30.0 г/л) с последующим учетом количества выросших колоний грибов. Чашки Петри с культурами грибов помещали в термостат при $28 \pm 2^\circ C$ на 72 ч. Противогрибковое действие препаратов оценивали по степени выживаемости микроорганизмов, которую определяли по изменению титра спор культур грибов.

При исследовании действия соединений на вегетативный мицелий грибы выращивали на жидкой (без агара) питательной среде Чапека–Докса на шейкерах (150 об./мин) в колбах Эрленмейра объемом 500 мл при температуре $27 \pm 2^\circ C$ в

течение 7 сут. Исследуемые соединения в концентрации 2 мг/мл ресуспендировали в стерильной питательной среде объемом 10 мл в стерильных бюксах, затем к ним добавляли навески мицелия грибов (50–100 мг).

Контрольными служили варианты с мицелием грибов без исследуемых соединений.

Все варианты помещали на орбитальные шейкеры при 150 об./мин на 120 и 240 мин в условиях темноты и воздействия света (30 и 50 Вт). Затем мицелий (во всех вариантах) из бюксов перемещали в колбы Эрленмейра объемом 100 мл в жидкую среду Чапека–Докса на доращивание еще на 7 сут в тех же условиях. По истечении срока культивирования ингибирующее действие исследуе-

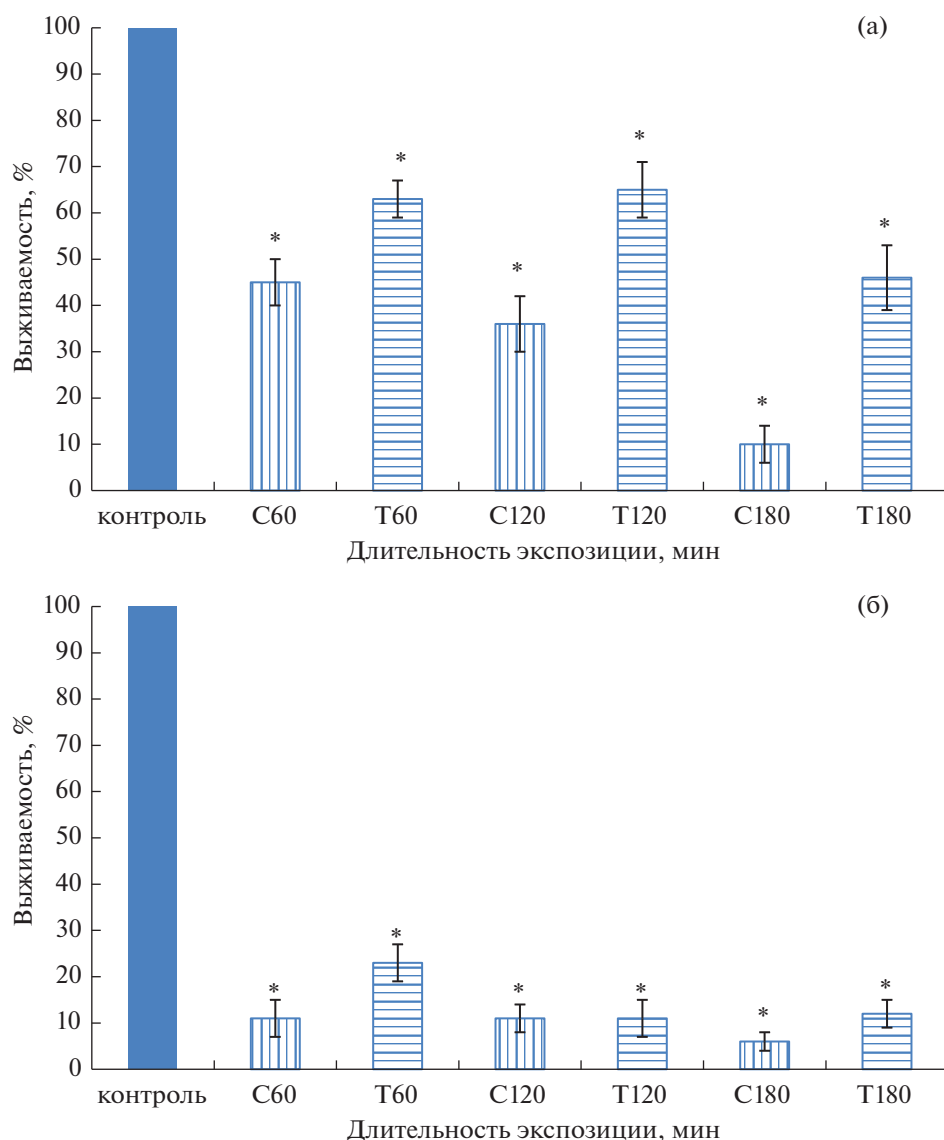


Рис. 6. Выживаемость спор грибов *P. chrysogenum* (а) и *A. niger* (б) в присутствии $\text{RbTe}_{1.5}\text{W}_{0.5}\text{O}_6$ в условиях темноты (Т) и при воздействии источника света 50 Вт (С).

мых веществ определяли по приросту биомассы мицелия.

Все экспериментальные результаты обрабатывали с применением непараметрического критерия U (Манна–Уитни) с поправкой Холма. Результаты были получены в трех независимых экспериментах. Каждый вариант в эксперименте представлен в пяти повторностях. Из каждой повторности для анализа брали по три микробиологических пробы. Таким образом, количество независимых экспериментальных повторностей для каждого варианта опыта составляло 15.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Соединение **2** было получено ранее, некоторые его физические свойства изучены в [16–18].

Исследования показали, что соединение имеет линии поглощения в видимом диапазоне света при ~ 2.51 эВ (~ 493 нм) и способно к фотоокислению метиленового синего [16–18].

Монофазная природа полученных образцов порошков соединений **1** и **2** подтвердилась результатами РФА (рис. 1). Примесные фазы не были обнаружены в пределах чувствительности метода. Из данных микроскопии видно, что морфология порошков при использованных условиях диспергирования соответствует полученным ранее результатам и средние значения размеров частиц порошка меньше 1 мкм.

Исследование элементного состава методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии показало равномерное распределение элементов Rb, Te, W, O и W, O по порошкам со-

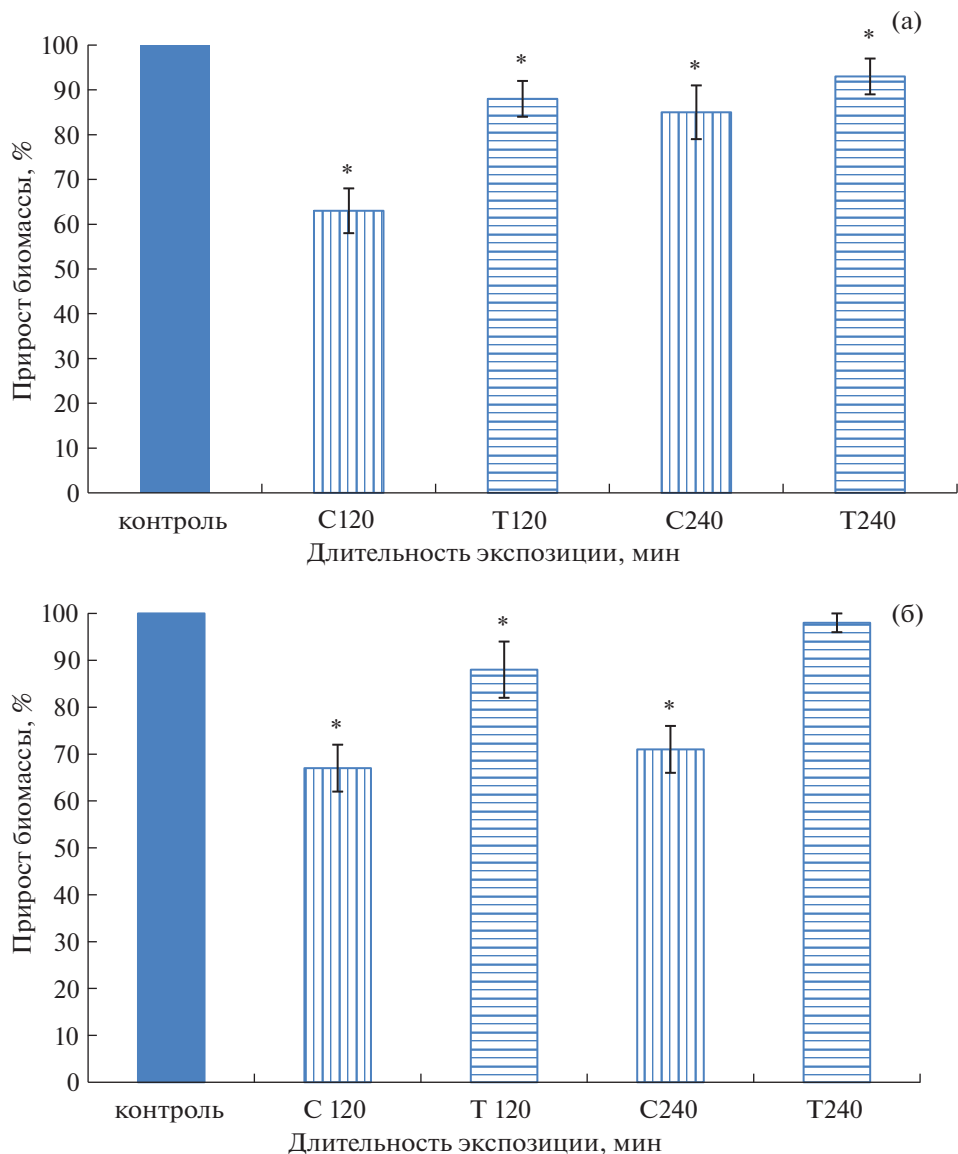


Рис. 7. Прирост биомассы грибов *P. chrysogenum* (а) и *A. niger* (б) на среде с добавлением WO_3 в условиях темноты (Т) и при воздействии источника света 30 Вт (С).

единений $RbTe_{1.5}W_{0.5}O_6$ и WO_3 соответственно. Обнаруженное соотношение элементов для $RbTe_{1.5}W_{0.5}O_6$ 10.92 ат. % (L_{α} , Rb), 16.09 ат. % (L_{α} , Te), 5.79 ат. % (L_{α} , W), 67.2 ат. % (K_{α} , O) и для WO_3 25.12 ат. % (L_{α} , W) и 74.88 ат. % (K_{α} , O) соответствует ожидаемому в пределах чувствительности метода (~ 0.1 ат. %).

Эти данные указывают на элементарную и фазовую чистоту исследуемых соединений, а также на сопоставимость размеров их частиц, позволяя говорить об адекватности сравнения результатов по их биоцидной активности.

Спектры используемых источников света показаны на рис. 2.

Экспериментальные данные микробиологических исследований представлены в виде диаграмм, на которых указаны пределы среднеквадратического отклонения. Символом “*” отмечены варианты, статистически отличные от контроля при уровне значимости $p \leq 0.05$.

На рис. 3 представлены результаты исследований действия WO_3 на споры грибов *Penicillium chrysogenum* и *Aspergillus niger* в условиях темноты и воздействия света (30 Вт). Длительность экспозиций в условиях света и темноты без исследуемых соединений не влияла на выживаемость спор грибов, поэтому на графиках в качестве контроля использовали выживаемость спор грибов при отсутствии исследуемых соединений. Анализ ре-

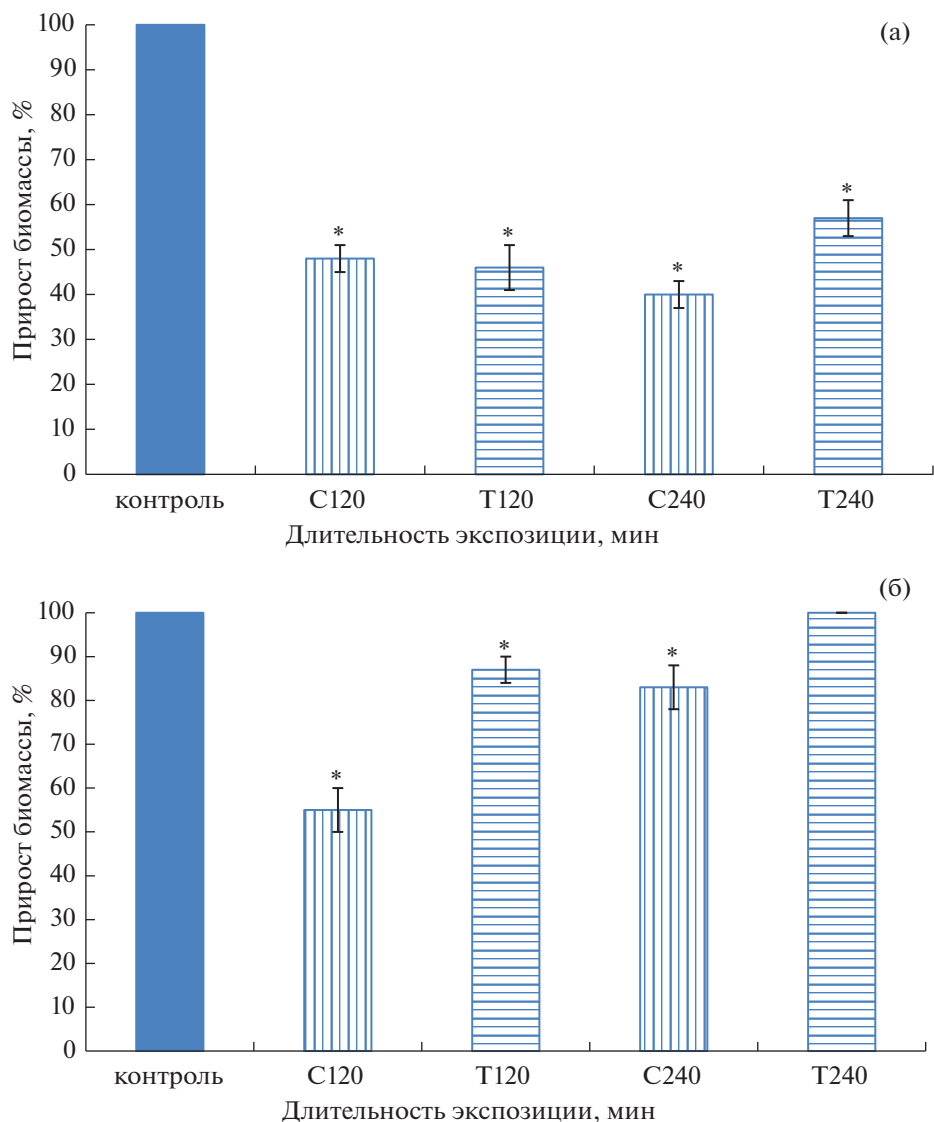


Рис. 8. Прирост биомассы грибов *P. chrysogenum* (а) и *A. niger* (б) на среде с добавлением $\text{RbTe}_{1.5}\text{W}_{0.5}\text{O}_6$ в условиях темноты (Т) и при воздействии источника света 30 Вт (С).

зультатов показывает, что имело место снижение выживаемости спор грибов *P. chrysogenum* и *A. niger* под действием соединения **1** как при освещении мощностью 30 Вт, так и в условиях темноты. Действие света усиливало противогрибковый эффект соединения **1** в отношении *A. niger* во всех вариантах эксперимента, а в отношении *P. chrysogenum* только в условиях экспозиции 180 мин.

На рис. 4 представлены результаты исследования влияния соединения **2** на споры исследуемых микроорганизмов при освещенности 30 Вт. Здесь, так же как в случае соединения **1**, наблюдалось снижение выживаемости спор как в условиях света, так и в условиях темноты. Ингибирующий эффект соединения **2** в отношении *P. chrysogenum* в этой серии экспериментов наблюдается уже при

экспозиции 60 мин в отличие от **1**. В случае *A. niger* при воздействии света мощностью 30 Вт как на соединение **1**, так и на соединение **2** выживаемость спор была ниже, чем в условиях темноты. Отметим, что соединение **2** в условиях темноты обладало более выраженным противогрибковым эффектом в отношении *A. niger* по сравнению с **1**.

Согласно [3, 4] антимикробная активность нано- и субмикронных частиц оксидов металлов может изменяться в зависимости от мощности источника освещения, поэтому также проводились эксперименты с источником освещения мощностью 50 Вт (рис. 5, 6).

Так же как и в предыдущей серии экспериментов, в присутствии соединения **1** имело место снижение выживаемости спор грибов *P. chrysoge-*

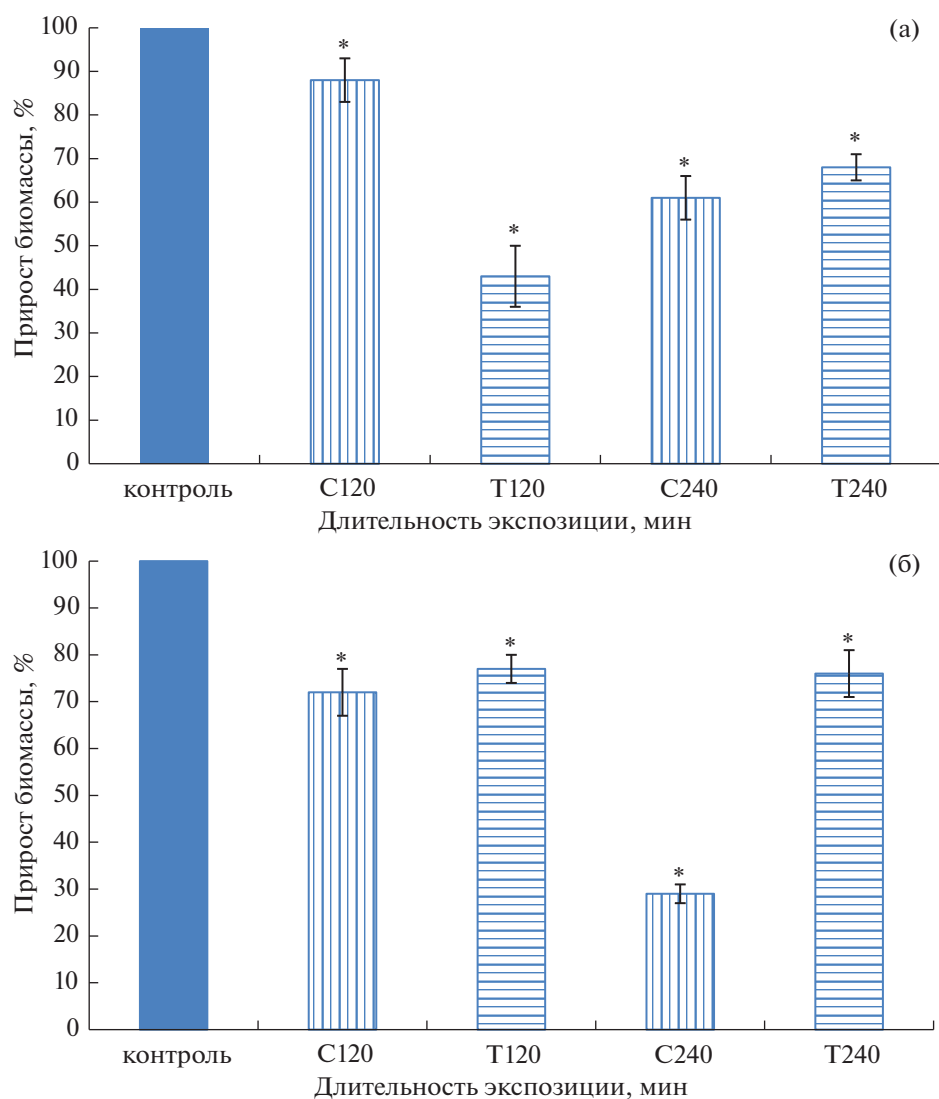


Рис. 9. Прирост биомассы грибов *P. chrysogenum* (а) и *A. niger* (б) на среде с добавлением WO_3 в условиях темноты (Т) и при воздействии источника света 50 Вт (С).

nut и *A. niger*, причем действие света усиливало наблюдаемый эффект. Особенно это было заметно в отношении гриба *A. niger* при экспозиции 120 и 180 мин. Ингибирующий эффект соединения **1** при воздействии света мощностью 50 Вт на выживаемость спор *A. niger* был выше, чем в условиях освещенности 30 Вт. Отметим, что более существенное изменение выживаемости спор *A. niger* наблюдалось в случае воздействия данного источника освещения на соединение **1** по сравнению с соединением **2**.

Соединение **2** в отношении спор гриба *P. chrysogenum* обладало более выраженным противогрибковым эффектом по сравнению с **1**, причем наибольший эффект наблюдался при экспозиции 180 мин.

Согласно [2, 19] многие противогрибковые препараты проявляют разный биоцидный эффект на споры и вегетативный мицелий грибов. В связи с этим провели серию экспериментов по оценке действия соединений **1** и **2** на экзогенный мицелий *P. chrysogenum* и *A. niger* как при воздействии света, так и в условиях темноты (рис. 7–10). Противогрибковое действие соединений на мицелий грибов оценивали по изменению прироста биомассы. Данные эксперименты также проводили с источниками света 30 и 50 Вт с плотностью потока излучения 325.5 и 524 Вт/м² соответственно.

Длительность экспозиций в условиях света и темноты без исследуемых соединений не влияла на прирост биомассы грибов, поэтому на графиках в качестве контроля использовали прирост

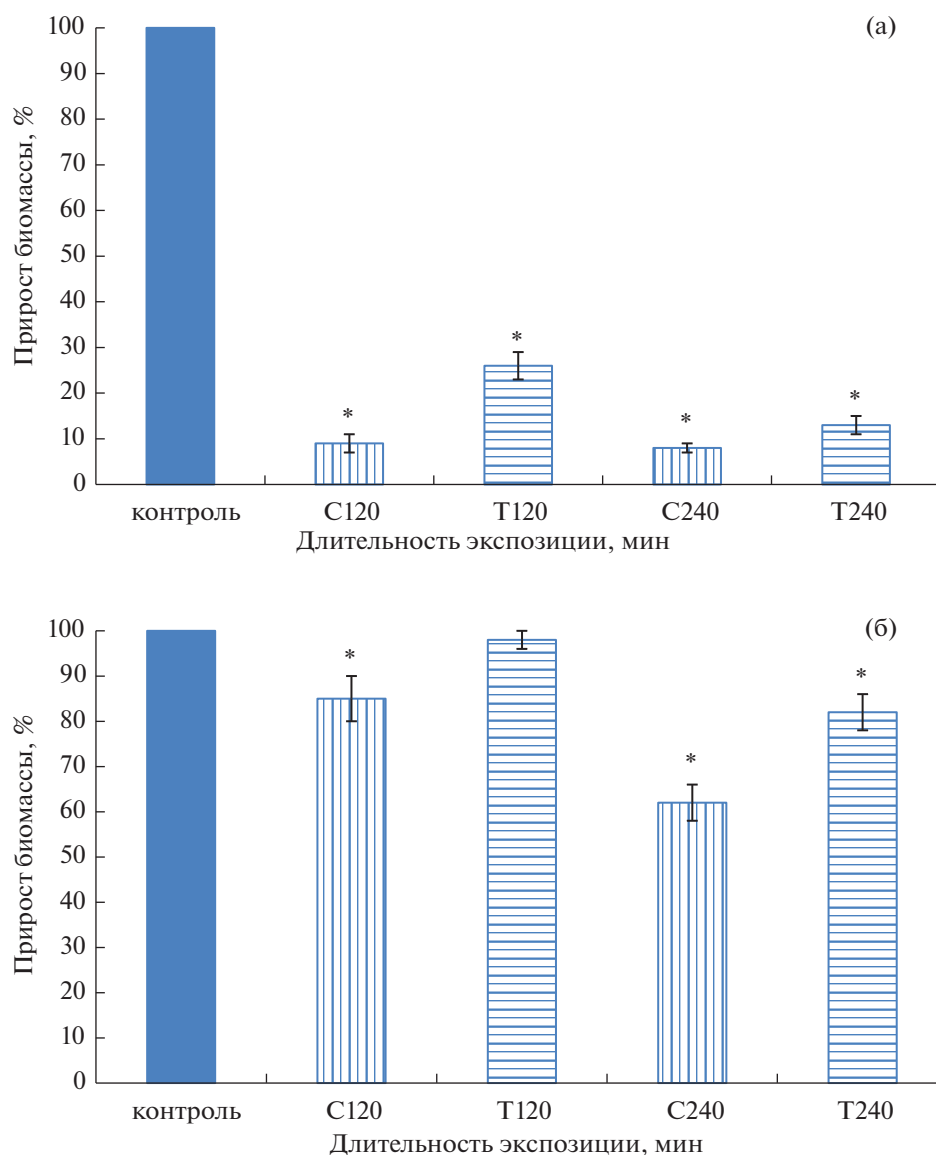


Рис. 10. Прирост биомассы грибов *P. chrysogenum* (а) и *A. niger* (б) на среде с добавлением $\text{RbTe}_{1.5}\text{W}_{0.5}\text{O}_6$ в условиях темноты (Т) и при воздействии источника света 50 Вт (С).

биомассы грибов в отсутствие исследуемых соединений.

Исследуемые соединения снижали прирост биомассы грибов *P. chrysogenum* и *A. niger* как под действием света (30 и 50 Вт), так и в условиях темноты по сравнению с контролем, что позволяет говорить об их противогрибковой активности. Воздействие света мощностью 30 Вт на соединение **1** увеличивало его противогрибковую активность при экспозиции 120 мин в отношении *P. chrysogenum*, а в отношении *A. niger* – при экспозиции 120 и 240 мин по сравнению с вариантами эксперимента в темноте. В то же время противогрибковая активность соединения **2** под действием света 30 Вт изменялась сильнее в

отношении *P. chrysogenum* при экспозиции 240 мин, а в отношении *A. niger* – при экспозиции 120 мин.

При исследовании действия соединения **1** на *P. chrysogenum* с использованием источника света мощностью 50 Вт не наблюдали превалирования противогрибковой активности по сравнению с темнотой, напротив, прирост биомассы *A. niger* в этих условиях освещенности существенно снижался при экспозиции 240 мин.

При использовании источника света мощностью 50 Вт происходило увеличение противогрибковой активности соединения **2** по сравнению с вариантами эксперимента в темноте. Данный эф-

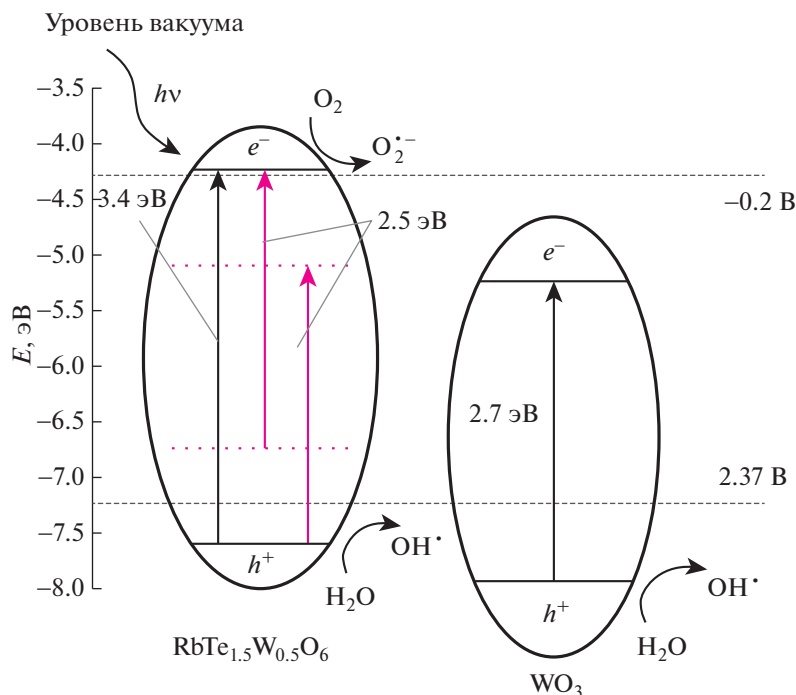


Рис. 11. Схема относительных положений уровня проводимости и края валентной зоны соединений $\text{RbTe}_{1.5}\text{W}_{0.5}\text{O}_6$ и WO_3 .

фekt более выражен для гриба *P. chrysogenum*, чем для гриба *A. niger*.

Известно, что нано- и субмикронные частицы тяжелых металлов способны проявлять антимикробный эффект и вызывать повреждения микроорганизмов, в том числе грибов, и без воздействия света [4–6, 20–22]. В частности, вследствие электростатических взаимодействий наночастицы устанавливают прочную связь с мембранами, что приводит к разрушению клеточных стенок микроорганизмов и, следовательно, увеличению их проницаемости. Обладая малыми размерами, эти частицы могут преодолевать клеточную стенку и, проникая через мембрану, повреждать митохондрии и рибосомы, а также вызывать конденсацию и маргинацию хроматина, приводя к апоптотической гибели клеток [23].

Кроме того, проникновение наночастиц в клетку приводит к их связыванию с транспортными белками и нарушению работы протонных насосов [24], а также к инактивации фосфор- и серосодержащих соединений, таких как ДНК и ферменты. Наночастицы значительно ингибируют уровень бактериального аденозинтрифосфата (АТФ) и вызывают уменьшение количества копий гена бактериальной 16S рДНК [25].

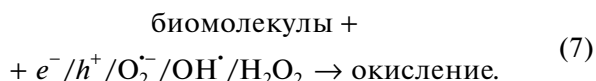
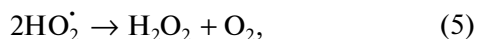
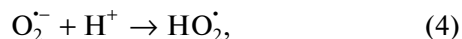
Как отмечалось ранее, токсичность ряда нано- и субмикронных частиц оксидов тяжелых металлов, в том числе по отношению к мицелиальным грибам, возрастает на свету, что связано с их фо-

токаталитической активностью [7, 26, 27]. При облучении соединения длиной волны, соответствующей ширине запрещенной зоны или внутрizonным переходам, его электроны из валентной зоны переходят в зону проводимости [28, 29]. В случае соединения 2, несмотря на широкую запрещенную зону ~ 3.5 эВ, соответствующую УФ-диапазону, сложный оксид имеет дефектно-примесное поглощение в видимой области, за счет чего и осуществляется процесс окисления на его поверхности.

Из рис. 11 видно, что благодаря такому внутрizonному переходу с шириной, соответствующей видимому свету, появляется возможность для образования электронно-дырочных пар, приводящих к реакциям окисления органических соединений. В результате поглощения света в зоне проводимости оказываются электроны, которые могут вступать в реакции окисления биомолекул напрямую или участвовать в реакциях окисления воды или растворенного кислорода с образованием АФК, супероксидного радикала и пероксида водорода (реакции (3–5)), которые в свою очередь также могут взаимодействовать с биомолекулами и таким образом подавлять жизнедеятельность организмов.

После заброса электронов в зону проводимости в валентной зоне остаются дырки, которые также выступают как активные частицы для разложения органики или взаимодействуют с адсор-

бироваанной на поверхности сложного оксида водой с образованием гидроксильного радикала – сильного окислительного агента (реакция (2)).



В случае оксида вольфрама (рис. 11) дно зоны проводимости находится ниже, чем окислительно-восстановительный потенциал реакции (3), поэтому при облучении оксида супероксидные анион-радикалы образовываться не будут [30, 31]. Основными окислительными агентами будут выступать гидроксильные радикалы и непосредственно электронно-дырочные пары.

Однако на поверхности частиц порошка соединений **1** и **2** может протекать процесс рекомбинации электронно-дырочных пар, который уменьшает число образующихся окислительных агентов и снижает антимикробную эффективность. При увеличении мощности источников освещения и росте числа фотонов, падающих на порошок, число генерирующихся электрон-дырочных пар также растет, что может приводить к усилению процесса рекомбинации на поверхности соединения **2**.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исследуемые соединения способны проявлять противогрибковую активность по отношению к спорам и вегетативному мицелию *P. chrysogenum* и *A. niger* как в условиях темноты, так и в условиях освещенности.

Соединение **1** в условиях темноты в наибольшей степени снижало жизнеспособность спор *P. chrysogenum*, а соединение **2** – выживаемость спор *A. niger*. Соединение **2** в большей степени ингибировало рост вегетативного мицелия по сравнению с соединением **1**. Данный факт может быть связан с физиолого-биохимическими особенностями исследуемых культур грибов, а именно наличием у них разных механизмов резистентности по отношению к каждому из исследуемых соединений.

В условиях действия света противогрибковая активность соединений **1** и **2** возрастала, причем возрастание происходило в большей степени в

условиях экспериментов с использованием источника света 50 Вт по сравнению с 30 Вт. Данный эффект наблюдался при действии света как на споры грибов, так и на вегетативный мицелий.

Сравнивая действие света на соединения **1** и **2**, можно отметить, что соединение **2** в условиях воздействия света мощностью 30 и 50 Вт с плотностью потока излучения 325.5 и 524 Вт/м² соответственно проявляло более сильную антимикробную активность по отношению к спорам и вегетативному мицелию всех исследуемых грибов по сравнению с соединением **1**.

Длительность экспозиции на противогрибковый эффект исследуемых соединений действовала по-разному. Так, в случае спор грибов для обоих соединений как в условиях темноты, так и при воздействии света 30 и 50 Вт имело место усиление противогрибкового эффекта при увеличении длительности эксперимента.

Иная картина наблюдалась при действии на вегетативный мицелий грибов. Здесь возрастание противогрибкового эффекта в связи с длительностью экспозиции наблюдалось при использовании освещения мощностью 50 Вт, тогда как при использовании источника света мощностью 30 Вт возрастания противогрибкового эффекта с увеличением длительности экспозиции не наблюдалось.

Усиление антимикробной активности оксидов металлов связывают с их способностью в условиях действия света образовывать свободные электроны и АФК, которые способны окислять различные биомолекулы в живых организмах, что может приводить к ингибированию их жизнедеятельности.

Таким образом, обобщение полученных результатов показало, что поставленные задачи исследований выполнены в полном объеме. Это позволяет говорить о достижении поставленных целей.

Данные результаты вносят существенный вклад в изучение действия мелкодисперсных частиц оксидов металлов, проявляющих фотокаталитическую активность, на микроорганизмы. Для расширения проведенных исследований, на наш взгляд, очень важно сравнить действие различных по химическому строению частиц оксидов металлов на различные группы живых организмов, а также выявить особенности антимикробной активности в зависимости от размеров частиц, мощности источников излучения и характеристик волнового спектра.

Согласно результатам исследований соединения **1** и **2** обладают фотокаталитической активностью, усиливающей противогрибковый эффект и пролонгирующее их действие в условиях освещенности. Данный факт может иметь большое практическое значение, так как соединения WO_3

и $\text{RbTe}_{1.5}\text{W}_{0.5}\text{O}_6$ могут быть использованы не только в качестве биоцидов в различных отраслях промышленности, медицине, ветеринарии, но и в качестве дезинфекционных средств различных технологических сред и оборудования.

Весьма перспективным является создание самостерилизующихся поверхностей, содержащих мелкодисперсные частицы оксидов металлов, обладающих фотокаталитической активностью, так как в этом случае, меняя мощность источников освещения и характеристики волнового спектра, можно регулировать антимикробную активность избирательно по отношению к определенным видам микроорганизмов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (базовая часть Госзадания, проект 0729-2020-0053) с использованием оборудования ЦКП “Новые материалы и ресурсосберегающие технологии” (ННГУ им. Н.И. Лобачевского).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильичев В.Д., Бочаров Б.В., Горленко М.В. Экологические основы защиты от биоповреждений. М.: Наука, 1985. 261 с.
2. Огарков Б.Н. Мусота — основа многих биотехнологий. Иркутск: Время странствий, 2011. 207 с.
3. Мелешко А.А., Афиногенова А.Г., Афиногенов Г.Е. и др. // Инфекция и иммунитет. 2020. Т. 10. № 4. С. 639.
4. Захарова О.В., Гусев А.А. // Российские нанотехнологии. 2019. Т. 14. № 9–10. С. 3. <https://doi.org/10.21517/1992-7223-2019-9-10-3-17>
5. Lipovsky A., Nitzan Y., Gedanken A. et al. // Nanotechnology. 2011. V. 22. № 10. P. 105101. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/22/10/105101>
6. He L., Liu Y., Mustapha A.L. et al. // Microbiol. Res. 2011. V. 166. P. 207. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2010.03.003>
7. Thabet S., Simonet F., Lemaire M. et al. // Appl. Environ. Microbiol. 2014. V. 80. № 24. P. 642. <https://doi.org/10.1128/AEM.02416-14>
8. Mitoray D., Janczyk A., Strus M. et al. // Photochem. Photobiol. Sci. 2007. V. 6. № 6. P. 642.
9. Yamamoto O. // Int. J. Inorg. Mater. 2001. V. 3. P. 643. [https://doi.org/10.1016/S1466-6049\(01\)00197-0](https://doi.org/10.1016/S1466-6049(01)00197-0)
10. Adams L.K., Lyon D.J., Alvarez P.J. // Water Res. 2006. V. 40. № 10. P. 27. <https://doi.org/10.1016/j.waters.2006.08.004>
11. Zhang B., Li Q., Wang D. et al. // Nanomaterials. 2020. V. 10. № 11. P. 2096. <https://doi.org/10.3390/nano10112096>
12. Liu J., Wang Y., Ma J. et al. // J. Alloys Compd. 2019. V. 783. P. 898. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.330>
13. Pan H., Xie H., Chen G. et al. // Int. J. Biol. Macromol. 2020. V. 148. P. 608.
14. Prakash J., Sun Sh., Swart H. et al. // Appl. Mater. Today. 2018. V. 11. P. 82. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2018.02.002>
15. Шишкин А.Ю., Смирнов В.Ф., Смирнова О.Н. и др. // Тез. докл. “3-й Российский микробиологический конгресс г. Псков”. Материалы конгресса. 2021. С. 286. <https://lib.pskgu.ru/page/d1f45f6d-f629-4fa1-94fd-6449031c1269>
16. Fukina D.G., Koryagin A.V., Koroleva A.V. et al. // J. Solid State Chem. 2021. V. 300. P. 122235. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2021.122235>
17. Fukina D.G., Suleimanov E.V., Fukin G.K. et al. // J. Solid State Chem. 2020. V. 286. P. 121276.
18. Fukina D.G., Suleimanov E.V., Boryakov A.V. et al. // J. Solid State Chem. 2020. V. 293. P. 121. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2020.121787>
19. Сухаревич В.И., Кузикова И.Л., Медведева Н.Г. Защита от биоповреждений, вызываемых грибами. СПб.: ЭЛБИ-СПб, 2009. 207 с.
20. De la Rosa-Garcia S.C., Martinez-Torres P., Gomaz-Cornellio S. et al. // J. Nanomater. 2018. P. 3498527. <https://doi.org/10.1155/2018/3498527>
21. Yu K.P., Huang Y.T., Yang S.C. // J. Hazard. Mater. 2013. V. 261. P. 155.
22. Асанова А.А., Полонский В.И., Мануковский Н.С., Хижняк С.В. // Российские нанотехнологии. 2018. Т. 13. № 6. С. 62.
23. Xia Z., Ma Q., Li S. et al. // J. Microbiol., Immunol. Infect. 2016. V. 49. № 2. P. 182. <https://doi.org/10.1016/j.jmii.2014.04.013>
24. Kim J., Lee J., Kwon S., Jeong S. // J. Nanosci. Nanotechnol. 2009. V. 9. № 2. P. 1098. <https://doi.org/10.1166/jnn.2009.c096>
25. Meraat R., Ziabari A.A., Issazadeh Kh. et al. // Acta Metall. Sin-Engl. Lett. 2016. V. 29. № 7. P. 601. <https://doi.org/10.1007/s40195-016-0439-5>
26. Sichel C., de Cara M., Tello J. et al. // Appl. Surf. Sci. 2007. V. 74. № 1–2. P. 152. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2007.02.005>
27. Ye S.Y., Fan M.L., Song X.L. et al. // Int. J. Food Microbiol. 2010. V. 136. № 3. P. 332. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2009.09.028>
28. Kudo A., Miseki Y. // Chem. Soc. Rev. 38. 2009. P. 253. <https://doi.org/10.1039/B800489G>
29. Nosaka Y., Nosaka A.Y. Photocatalysis and Water Purification / Ed. Pichat P. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013. 406 p. <https://doi.org/10.1002/9783527645404>
30. Butler M.A. // J. Appl. Phys. 1977. V. 48. № 5. P. 1914.
31. Murillo-Sierra J.C., Hernández-Ramírez A., Hinojosa-Reyes L., Guzmán-Mar J.L. // Adv. Chem. Eng. 2021. V. 5. № 15. P. 1000070.