

## МИКРОБИОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 579.22

doi: 10.17072/1994-9952-2022-2-131-136.

### Влияние одностенных углеродных нанотрубок на биопленкообразование актинобактерий рода *Rhodococcus* и протеобактерий активного ила

Юлия Геннадьевна Максимова<sup>1✉, 3</sup>, Яна Евгеньевна Быкова<sup>2, 4</sup>

<sup>1, 2</sup> Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН – филиал ПФИЦ УрО РАН, Пермь, Россия

<sup>1✉</sup> maks@iegm.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1870-1369>

<sup>2</sup> yanabykova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4930-5537>

<sup>3, 4</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

**Аннотация.** Исследовано влияние одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) на формирование и разрушение биопленок протеобактерий активного ила и актинобактерий рода *Rhodococcus*. Показано, что ОУНТ не ингибирует формирование биопленок этих бактерий и не вызывает их разрушения, при этом в присутствии ОУНТ формируются значительно более массивные биопленки *Alcaligenes faecalis* 2 и *Acinetobacter guillouiae* 11h. Показано, что уровень дегидрогеназной активности, оцененный по восстановлению соли тетразолия до формазана, у клеток биопленок, формируемых в присутствии ОУНТ, превышал таковой биопленок в контроле.

**Ключевые слова:** одностенные углеродные нанотрубки, родококки, протеобактерии, активный ил

**Для цитирования:** Максимова Ю. Г., Быкова Я. Е. Влияние одностенных углеродных нанотрубок на биопленкообразование актинобактерий рода *Rhodococcus* и протеобактерий активного ила // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2022. Вып. 2. С. 131–136. <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2022-2-131-136>.

**Благодарности:** исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-44-596002.

## MICROBIOLOGY

Original article

### Influence of single-walled carbon nanotubes on the biofilm formation of actinobacteria of the *Rhodococcus* genus and proteobacteria of activated sludge

Yulia G. Maksimova<sup>1✉, 3</sup>, Yana E. Bykova<sup>2, 4</sup>

<sup>1, 2</sup> Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms, Ural Branch RAS, Perm, Russia

<sup>1✉</sup> maks@iegm.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1870-1369>

<sup>2</sup> yanabykova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4930-5537>

<sup>3, 4</sup> Perm State University, Perm, Russia

**Abstract.** The effect of single-walled carbon nanotubes (SWCNTs) on the formation and eradication of biofilms of activated sludge proteobacteria and actinobacteria of the genus *Rhodococcus* was studied. It has been shown that SWCNTs do not inhibit the formation of biofilms of these bacteria and do not cause their destruction, while in the presence of SWCNTs, much more massive biofilms of *Alcaligenes faecalis* 2 and *Acinetobacter guillouiae* 11h are formed. It was shown that the level of dehydrogenase activity, estimated by the reduction of tetrazolium salt to formazan, in biofilm cells formed in the presence of SWCNTs, exceeded that of biofilms in the control.

**Keywords:** single-walled carbon nanotubes, rhodococci, proteobacteria, activated sludge

**For citation:** Maksimova Yu. G., Bykova Ya. E. [Influence of single-walled carbon nanotubes on the biofilm formation of actinobacteria of the *Rhodococcus* genus and proteobacteria of activated sludge]. *Bulletin of Perm University. Biology*. Iss. 2 (2022): pp. 131-136. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2022-2-131-136>.

**Acknowledgments:** the reported study was funded by RFBR and Perm Territory, project number № 20-44-596002.

## Введение

В последние годы в связи с широким распространением наноматериалов активно изучается их воздействие на живые организмы, как на клетки эукариотов, так и на прокариотов. Малые размеры одноклеточных прокариотов обеспечивают непосредственное взаимодействие клетки с наноматериалами. Массовое производство и применение наночастиц приводит к их попаданию в окружающую среду, сточные воды и почвы, в связи с чем возникает интерес к изучению их воздействия на микроорганизмы этих экосистем.

Одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ) представляют собой листы графена, свернутые в цилиндры [Iijima, Ichinashi, 1993]. Предполагается, что за счет малого диаметра повреждающее действие ОУНТ на живые организмы, по сравнению с многостенными углеродными наноматериалами, будет более выраженным [Boncel et al., 2015]. Было показано, что взаимодействие модельного организма *Escherichia coli* с нефункционализированными агрегатами ОУНТ в течение 60 мин. приводило к гибели 80% клеток [Kang et al., 2008]. Также наблюдалось увеличение экспрессии стресс-зависимых генов после инкубации *E. coli* с углеродными нанотрубками, что доказывало их цитотоксический эффект [Rodrigues, Elimelech, 2010]. При этом предполагали трехступенчатый антимикробный механизм: (1) первоначальный контакт ОУНТ с бактериями, (2) нарушение структуры мембраны, (3) окислительный стресс [Vecitis et al., 2010]. Высказано предположение, что ОУНТ действуют как «нанодропки», нарушая целостность цитоплазматической мембраны [Liu et al., 2009]. Морфологическими, физиологическими исследованиями и прямым высевом подтвердили бактерицидный эффект ОУНТ в суспензиях генно-инженерного штамма *E. coli* K12 TG1 (plx) с клонированным в него lux-опероном [Зарубина и др., 2009]. Антибактериальный эффект диспергированных ОУНТ как на грамотрицательные *E. coli*, так и на грамположительные *Bacillus subtilis* был подтвержден методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) [Liu et al., 2010]. Однако ряд исследователей придерживается другого мнения. Так, в работе Д.Г. Дерябина методом АСМ было показано отсутствие мембрано-повреждающего действия очищенных ОУНТ на *E. coli* [Дерябин и др., 2010].

В связи с попаданием наноматериалов такого типа в окружающую среду возникает вопрос об их воздействии на микробные сообщества в целом. В ряде работ было показано, что активность почвенных ферментов снижалась, а состав микробного сообщества почвы значительно изменялся под воздействием ОУНТ [Jin et al., 2013; Jin et al., 2014]. Так как в окружающей среде микроорганизмы существуют в основном в виде прикрепленных сообществ, погруженных в полимерный матрикс – биопленок, возникает закономерный вопрос о воздействии ОУНТ на такие сообщества, как на процесс их формирования, так и на зрелые биопленки. На модельной *E. coli* было показано, что в зрелых биопленках полимерный матрикс снижает токсический эффект ОУНТ на клетки [Rodrigues, Elimelech, 2010]. В целом, вопрос воздействия углеродных нанотрубок на бактериальные биопленки остается малоизученным. Ранее нами было показано, что многостенные углеродные нанотрубки не ингибируют биопленкообразование штаммов *E. coli* [Максимова, Быкова, 2021]. Цель настоящей работы – изучение биопленкообразования и разрушения биопленок некоторых видов грамотрицательных бактерий активного ила и актинобактерий рода *Rhodococcus* под действием ОУНТ.

## Материалы и методы исследования

### Объекты исследования и условия культивирования биопленок

Биопленки грамотрицательных бактерий *Alcaligenes faecalis* 2, *Acinetobacter guillouiae* 11h [Демаков и др., 2015], *Achromobacter pulmonis* ПНОС, *Burkholderia dolosa* БОС [Максимова и др., 2020], ранее выделенных нами из активного ила очистных сооружений, а также грамположительных бактерий *R. erythropolis* ИЛБИО, *R. erythropolis* 11-2, *R. ruber* gt1, ранее выделенных нами из почв Пермского края, выращивали в 96-луночном полистироловом планшете «Медполимер» (Россия) в 200 мкл среды LB «Sigma-Aldrich» (США), инокулированной 5 мкл бактериальной суспензии, содержащей  $10^9$  КОЕ/мл.

В среду вносили 200 мкг/мл ОУНТ TUBALL™ (OCSiAl, Россия). ОУНТ имели следующие характеристики: внешний средний диаметр  $1.6 \pm 0.4$  нм, полная удельная поверхность  $1311 \text{ м}^2/\text{г}$ , чистота 99.5. Перед инокуляцией бактериальными штаммами среду с ОУНТ обрабатывали УЗ в ультразвуковой ванне Elma Ultrasonic 30S (Германия) при 37 кГц 10 раз по 1 мин. Контролем служили биопленки, выращенные на среде LB без ОУНТ.

### Определение массивности биопленки

После 7 сут. инкубации в термостате при 30°C планктонные клетки удаляли из лунок декантацией, дважды отмывали биопленку 200 мкл калий-фосфатного буфера и определяли массивность образованной биопленки. Биопленку окрашивали 0.1%-ным кристаллическим фиолетовым в течение 40 мин. в темноте,

удаляли краситель, отмывали 1 раз калий-фосфатным буфером и экстрагировали краситель 200 мкл 96%-ного спирта. Биоленкообразование оценивали по оптической плотности раствора красителя при  $\lambda$  540 нм на планшетном ридере Infinite M1000 pro, «TECAN» (Швейцария).

### Тест на разрушение биоленок

Влияние ОУНТ на разрушение биоленок оценивали по общей массивности биоленки, определенной описанным выше методом, после суточной инкубации выращенных на среде LB биоленок с 0.9%-ным NaCl, содержащим 200 мкг/мл ОУНТ. Контролем служили биоленки, инкубированные с 0.9%-ным NaCl без ОУНТ.

### Определение дыхательной активности клеток биоленок

Воздействие ОУНТ на дыхательную активность биоленок оценивали колориметрическим методом с использованием набора реактивов ХТТ Cell Proliferation Assay Kit, «Roche» (Germany).

Сформированные биоленки отмывали и вносили 100 мкл 0.9% раствора NaCl с добавлением 50 мкл реактива ХТТ (2,3-бис-(2-метокси-4-нитро-5-сульфопенил)-2Н-тетразолий-5-карбоксамид). Измерения проводили на планшетном ридере Infinite M1000 pro «TECAN» (Швейцария) при  $\lambda$  480 нм через каждый час в течение 7 ч. Во второй серии экспериментов биоленки, выращенные на среде LB, отмывали, вносили 100 мкл 0.9%-ного NaCl с ОУНТ (200 мкг/мл) и добавляли 50 мкл реактива ХТТ. Контролем служил 0.9%-ный NaCl без добавок. Измерения проводили, как описано выше. Уровень влияния ОУНТ на метаболическую активность бактериальных клеток (I) определяли как отношение оптической плотности экспериментального образца к оптической плотности контрольного образца через 7 ч. инкубации. Значение  $> 1$  свидетельствовало о повышении дыхательной активности,  $< 1$  – о снижении дыхательной активности.

Статистическую обработку проводили с использованием t-критерия Стьюдента, различия считали значимыми при  $p < 0.05$ .

## Результаты и их обсуждение

Актинобактерии рода *Rhodococcus* и штаммы грамотрицательных бактерий, выделенные ранее нами из активного ила, были выращены в присутствии ОУНТ на среде LB. После 7 сут. роста оценивали массивность образующихся биоленок. Было установлено, что ОУНТ не оказывали ингибирующего действия на биоленкообразование изученных бактерий: так, все грамотрицательные бактерии активного ила формировали достоверно более массивные биоленки в присутствии наноматериалов, причем массивность биоленок *A. guillouiae* 11h и *A. faecalis* 2, формируемых в среде с ОУНТ, превышала таковую на среде LB в 8.5 и 73.2 раза соответственно (рис. 1). Несмотря на то, что в ряде работ подтверждалось бактерицидное действие ОУНТ [Kang et al., 2007; Kang et al., 2008; Liu S. et al., 2010; Rodrigues, Elimelech, 2010], в нашем исследовании было показано отсутствие антибактериального эффекта в сочетании со стимуляцией биоленкообразования.

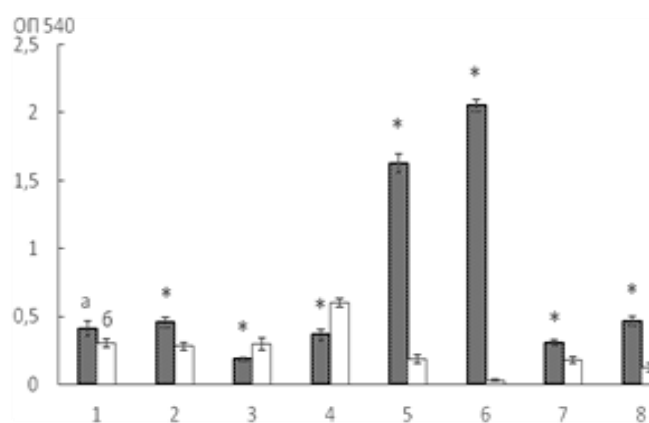


Рис. 1. Массивность биоленок при росте на среде LB с ОУНТ (а) и без наноматериалов (б) в течение 7 сут.: 1 – *R. ruber* gt1, 2 – *R. erythropolis* ИЛБИО, 3 – *R. erythropolis* 11-2, 4 – *R. erythropolis* 4-1, 5 – *A. guillouiae* 11h, 6 – *A. faecalis* 2, 7 – *A. pulmonis* ПНОС, 8 – *B. dolosa* БОС, (\*  $p < 0.05$ )

[The massiveness of biofilms when growing on LB medium with OUNT (a) and without nanomaterials (b) for 7 days: 1 – *R. ruber* gt1, 2 – *R. erythropolis* ИЛБИО, 3 – *R. erythropolis* 11-2, 4 – *R. erythropolis* 4-1, 5 – *A. guillouiae* 11h, 6 – *A. faecalis* 2, 7 – *A. pulmonis* ПНОС, 8 – *B. dolosa* БОС, (\*  $p < 0.05$ )]

Так как в биопленке микроорганизмы в большей степени защищены от неблагоприятных внешних воздействий, переход из планктонной формы существования к росту в биопленке может быть адаптивной реакцией в ответ на стрессовый фактор. Кроме того, нельзя исключать агрегацию клеток в суспензии с ОУНТ и их оседание под действием силы тяжести, способствующее адгезии клеток к поверхности полистиролового планшета как на первых этапах роста, так и в дальнейшем к формируемой биопленке. При этом в среде LB рост *A. faecalis* 2 в основном планктонный, а уровень биопленкообразования незначительный. У штаммов родококков не было выявлено закономерности биопленкообразования в присутствии ОУНТ: у *R. erythropolis* ИЛБИО формировались достоверно более массивные биопленки, у *R. erythropolis* 11-2 и *R. erythropolis* 4-1 – менее массивные.

Оценивали разрушение биопленок под воздействием ОУНТ в течение 24 ч. Как и в случае формирования биопленок, ОУНТ не только не вызывали разрушение биопленок *A. guillouiae* 11h и *A. faecalis* 2, но и способствовали их большому сохранению в среде без питательного субстрата, в отличие от варианта с физиологическим раствором без наноматериалов (рис. 2). При этом не было показано значительного влияния ОУНТ в среде на разрушение или сохранение биопленок родококков.

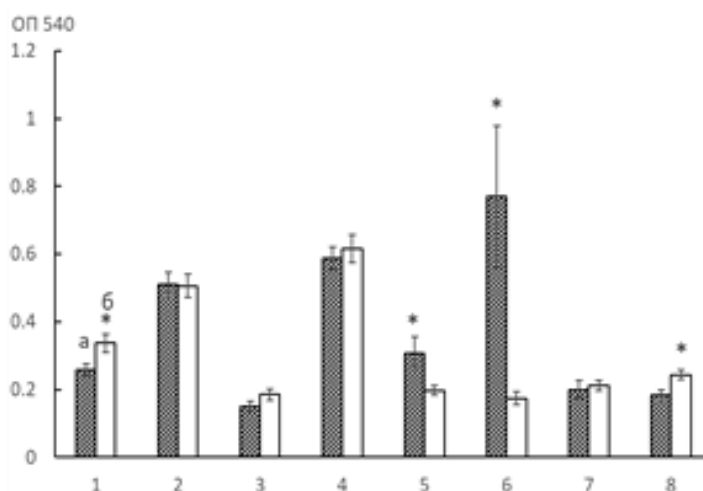


Рис. 2. Разрушение биопленок при 24 ч. инкубации в 0.9%-ном NaCl с ОУНТ (а) и без наноматериалов (б):  
1 – *R. ruber* gt1, 2 – *R. erythropolis* ИЛБИО, 3 – *R. erythropolis* 11-2, 4 – *R. erythropolis* 4-1, 5 – *A. guillouiae* 11h,  
6 – *A. faecalis* 2, 7 – *A. pulmonis* ПНОС, 8 – *B. dolosa* БОС, (\* p < 0,05)

[Destruction of biofilms at 24 h. incubation in 0.9% NaCl with OUNT (a) and without nanomaterials (б):  
1 – *R. ruber* gt1, 2 – *R. erythropolis* IL-BIO, 3 – *R. erythropolis* 11-2, 4 – *R. erythropolis* 4-1, 5 – *A. guillouiae* 11h,  
6 – *A. faecalis* 2, 7 – *A. pulmonis* PNOS, 8 – *B. dolosa* BOS, (\* p < 0.05)]

Оценивали дыхательную активность клеток биопленок с использованием реактива ХТТ Cell Proliferation Assay Kit. Более интенсивная оранжевая окраска реагента, связанная с восстановлением соли тетразолия до формазана, коррелирует с количеством дегидрогеназ, и, следовательно, с количеством жизнеспособных клеток. У всех изученных бактерий, за исключением *R. erythropolis* 11-2, было отмечено возрастание дыхательной активности клеток биопленок, формируемых в присутствии ОУНТ (рис. 3, таблица). Наибольшее возрастание дыхательной активности отмечено у клеток биопленок *R. erythropolis* 4-1, при этом общая массивность биопленок этого штамма, образованных в присутствии ОУНТ, была даже снижена. Данное противоречие может быть объяснено воздействием ОУНТ на формирование полимерного матрикса. Известно, что кристаллический фиолетовый окрашивает не только живые, но и мертвые клетки и полимерный матрикс биопленки, следовательно, снижение массивности может быть связано с меньшим количеством экзополимера. При воздействии ОУНТ на выращенные биопленки дыхательная активность *A. guillouiae* 11h, *A. faecalis* 2 и *A. pulmonis* ПНОС незначительно снижалась, а *B. dolosa* БОС, *R. erythropolis* ИЛБИО, *R. erythropolis* 11-2 и *R. erythropolis* 4-1 незначительно повышалась (таблица).

#### Индекс воздействия (I) ОУНТ на дыхательную активность биопленок [Index of the impact (I) of OUNT on the respiratory activity of biofilms]

Штамм	Биопленки, выращенные в присутствии ОУНТ	Воздействие ОУНТ на выращенные биопленки
<i>A. pulmonis</i> ПНОС	1.62	0.83
<i>A. guillouiae</i> 11h	2.79	0.92

Штамм	Биопленки, выращенные в присутствии ОУНТ	Воздействие ОУНТ на выращенные биопленки
<i>A. faecalis</i> 2	0.97	0.70
<i>B. dolosa</i> БОС	1.94	1.75
<i>R. ruber</i> gt1	2.54	-
<i>R. erythropolis</i> ИЛ БИО	1.84	1.26
<i>R. erythropolis</i> 11-2	0.61	1.37
<i>R. erythropolis</i> 4-1	3.49	1.32

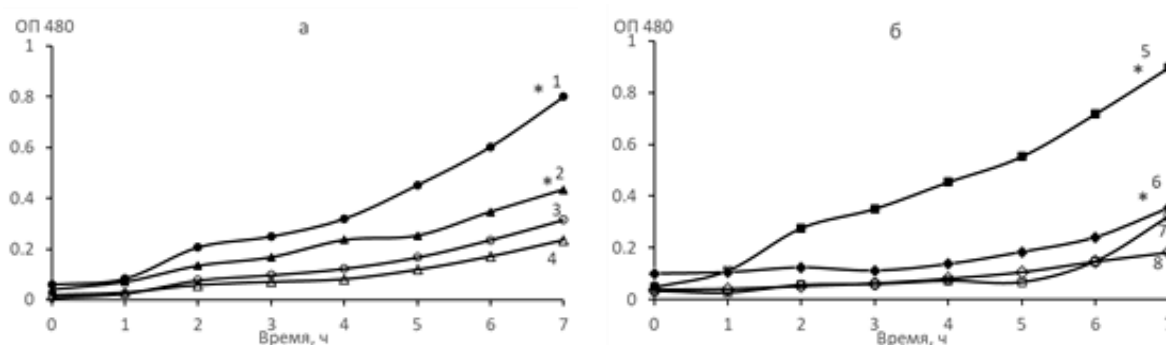


Рис. 3. Дыхательная активность 7-суточных биопленок *R. ruber* gt1 (1, 3), *R. erythropolis* ИЛ БИО (2, 4), *A. guillouiae* 11h (5, 7), *B. dolosa* БОС (6, 8), выращенных на среде LB с ОУНТ (1, 2, 5, 6) и на среде LB без наноматериалов (3, 4, 7, 8), (\*  $p < 0.05$ )

[Respiratory activity of 7-day biofilms of *R. ruber* gt1 (1, 3), *R. erythropolis* IL BIO (2, 4), *A. guillouiae* 11h (5, 7), *B. dolosa* BOS (6, 8) grown on LB medium with OUNT (1, 2, 5, 6) and on LB medium without nanomaterials (3, 4, 7, 8), (\*  $p < 0.05$ )]

## Заключение

Было установлено, что ОУНТ в среде культивирования не оказывали антибактериального действия в отношении изученных актинобактерий рода *Rhodococcus* и протеобактерий активного ила – представителей родов *Alcaligenes*, *Acinetobacter*, *Achromobacter* и *Burkholderia*. Также эти наноматериалы не ингибировали образование биопленок изученных бактерий и значительно усиливали биопленкообразование *A. guillouiae* 11h и *A. faecalis* 2. Разрушение биопленок *A. guillouiae* 11h и *A. faecalis* 2 в физиологическом растворе с ОУНТ было гораздо менее выражено, чем в отсутствие наноматериалов. Уровень дегидрогеназной активности, оцененный по восстановлению соли тетразолия до формазана, у клеток биопленок, формируемых в присутствии ОУНТ, превышал таковой биопленок в контроле (на среде LB без наноматериалов); при этом исключением являлся *R. erythropolis* 11-2. Таким образом, ОУНТ не оказывает ингибирующего действия на формирование биопленок родококков и грамотрицательных бактерий активного ила, не вызывает их разрушения и не подавляет дыхательную активность клеток.

## Список источников

1. Демаков В.А. и др. Бактерии активного ила биологических очистных сооружений, трансформирующие цианопиридины и амиды пиридинкарбоновых кислот // Микробиология. 2015. Т. 84, № 3. С. 369–378.
2. Дерябин Д.Г. и др. Исследование взаимодействия углеродных наноматериалов с клетками *Escherichia coli* методом атомно-силовой микроскопии // Российские нанотехнологии. 2010. Т. 5, № 11–12. С. 103–108.
3. Зарубина А.П. и др. Биотестирование биологических эффектов одностенных углеродных нанотрубок с использованием тест-системы люминесцентных бактерий // Российские нанотехнологии. 2009. Т. 4, № 11–12. С. 152–155.
4. Максимова Ю.Г., Быкова Я.Е. Влияние многостенных углеродных нанотрубок на биопленкообразование *Escherichia coli* // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2021. Вып. 2. С. 87–92.
5. Максимова Ю.Г. и др. Деградация пиридина суспензиями и биопленками штаммов *Achromobacter pulmonis* ПНОС и *Burkholderia dolosa* БОС, выделенных из активного ила очистных сооружений // Биотехнология. 2020. Т. 36, № 2. С. 86–98.
6. Boncel S. et al. Interactions of carbon nanotubes with aqueous/aquatic media containing organic/inorganic contaminants and selected organisms // Chemosphere. 2015. Vol. 136. P. 211–221.
7. Iijima S., Ichinashi T. Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter // Nature. 1993. Vol. 363. P. 603–605.

8. Jin L. et al. High concentrations of single-walled carbon nanotubes lower soil enzyme activity and microbial biomass // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2013. Vol. 88. P. 9–15.
9. Jin L. et al. Single-walled carbon nanotubes alter soil microbial community composition // *Science of the Total Environment*. 2014. Vol. 466–467. P. 533–538.
10. Kang S. et al. Single-walled carbon nanotubes exhibit strong antimicrobial activity // *Langmuir*. 2007. Vol. 23. P. 8670–8673.
11. Kang S. et al. Antibacterial effects of carbon nanotubes: size does matter! // *Langmuir*. 2008. Vol. 24, № 13. P. 6409–6413.
12. Liu S. et al. Sharper and faster “nano darts” kill more bacteria: A study of antibacterial activity of individually dispersed pristine single-walled carbon nanotube // *ACS Nano*. 2009. Vol. 3. P. 3891–3902.
13. Liu S. et al. Antibacterial action of dispersed single-walled carbon nanotubes on *Escherichia coli* and *Bacillus subtilis* investigated by atomic force microscopy // *Nanoscale*. 2010. Vol. 2. P. 2744–2750.
14. Rodrigues D.F., Elimelech M. Toxic effects of single-walled carbon nanotubes in the development of *E. coli* biofilm // *Environmental Science and Technology*. 2010. Vol. 44. P. 4583–4589.
15. Vecitis C.D. et al. Electronic-structure-dependent bacterial cytotoxicity of single-walled carbon nanotubes // *ACS Nano*. 2010. Vol. 4, № 9. P. 5471–5479.

## References

1. Demakov V.A. et al. [Bacteria of activated sludge of biological treatment facilities transforming cyanopyridines and amides of pyridinecarboxylic acids]. *Mikrobiologiya*. V. 84, No 3 (2015): pp. 369-378. (In Russ.).
2. Deryabin D.G. et al. [Study of the interaction of carbon nanomaterials with *Escherichia coli* cells by atomic force microscopy]. *Rossijskie nanotechnologii*. V. 5, No 11-12 (2010): pp. 103-108. (In Russ.).
3. Zarubina A.P. et al. [Biotesting of the biological effects of single-walled carbon nanotubes using a test system of luminescent bacteria]. *Rossijskie nanotechnologii*. V. 4, No 11-12 (2009): pp. 152-155. (In Russ.).
4. Maksimova Yu.G., Bykova Ya.E. [Effect of multi-walled carbon nanotubes on *Escherichia coli* biofilm formation]. *Vestnik Permskogo universiteta. Biologiya*. Iss. 2 (2021): pp. 87-92. (In Russ.).
5. Maksimova Yu.G. et al. [Degradation of pyridine by suspensions and biofilms of strains of *Achromobacter pulmonis* PNOS and *Burkholderia dolosa* BOS isolated from activated sludge of treatment facilities]. *Biotechnologiya*. V. 36, No 2 (2020): pp. 86-98. (In Russ.).
6. Boncel et al. Interactions of carbon nanotubes with aqueous/aquatic media containing organic/inorganic contaminants and selected organisms. *Chemosphere*. V. 136 (2015): pp. 211-221.
7. Iijima S., Ichinashi T. Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter. *Nature*. V. 363 (1993): pp. 603-605.
8. Jin L. et al. High concentrations of single-walled carbon nanotubes lower soil enzyme activity and microbial biomass. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. V. 88 (2013): pp. 9-15.
9. Jin L. et al. Single-walled carbon nanotubes alter soil microbial community composition. *Science of the Total Environment*. V. 466-467. (2014): pp. 533-538.
10. Kang S. et al. Single-walled carbon nanotubes exhibit strong antimicrobial activity. *Langmuir*. V. 23 (2007): pp. 8670-8673.
11. Kang S. et al. Antibacterial effects of carbon nanotubes: size does matter! *Langmuir*. V. 24, No 13 (2008): pp. 6409-6413.
12. Liu S. et al. Sharper and faster “nano darts” kill more bacteria: A study of antibacterial activity of individually dispersed pristine single-walled carbon nanotube. *ACS Nano*. V. 3 (2009): pp. 3891-3902.
13. Liu S. et al. Antibacterial action of dispersed single-walled carbon nanotubes on *Escherichia coli* and *Bacillus subtilis* investigated by atomic force microscopy. *Nanoscale*. V. 2 (2010): pp. 2744-2750.
14. Rodrigues D.F., Elimelech M. Toxic effects of single-walled carbon nanotubes in the development of *E. coli* biofilm. *Environ. Sci. Technol.* V. 44 (2010): pp. 4583-4589.
15. Vecitis C.D. et al. Electronic-structure-dependent bacterial cytotoxicity of single-walled carbon nanotubes. *ACS Nano*. V. 4, No 9 (2010): pp. 5471-5479.

Статья поступила в редакцию 22.03.2022; одобрена после рецензирования 11.05.2022; принята к публикации 21.06.2022.  
The article was submitted 22.03.2022; approved after reviewing 11.05.2022; accepted for publication 21.06.2022.

### Информация об авторах

Ю. Г. Максимова – доктор биол. наук, доцент, зав. лабораторией;  
Я. Е. Быкова – инженер; студент.

### Information about the authors

Yu. G. Maksimova – doctor of biology, docent, head of the laboratory;  
Ya. E. Bykova – engineer, student.

### Вклад авторов:

Максимова Ю. Г. – научное руководство; концепция исследования; написание текста.  
Быкова Я. Е. – экспериментальная работа.

### Contribution of the authors:

Maksimova Yu. G. – scientific management; research concept.  
Bykova Ya. E. – research work.