

DOI: 10.37988/1811-153X\_2023\_1\_158

[С.Ю. Иванов](#)<sup>1,2</sup>,

член-корр. РАН, д.м.н., профессор, зав. кафедрой челюстно-лицевой хирургии и хирургической стоматологии; зав. кафедрой челюстно-лицевой хирургии

[Я.Н. Карасенков](#)<sup>3</sup>,

к.м.н., главный врач

[Н.В. Латута](#)<sup>1</sup>,

к.м.н., доцент кафедры детской, профилактической стоматологии и ортодонтии

[В.В. Джатдаев](#)<sup>4</sup>,

стоматолог-хирург

[Е.А. Егоров](#)<sup>5</sup>,

врач

[Е.К. Тарасова](#)<sup>5</sup>,

врач

[Э.В. Козлова](#)<sup>1</sup>,

врач-стоматолог отделения терапевтической стоматологии

[П.А. Козлов](#)<sup>1</sup>,

челюстно-лицевой хирург Клиники челюстно-лицевой хирургии

<sup>1</sup> Первый МГМУ им. И.М. Сеченова, 119991, Москва, Россия

<sup>2</sup> РУДН, 117198, Москва, Россия

<sup>3</sup> Стоматологическая клиника «Росдент», 119192, Москва, Россия

<sup>4</sup> Стоматологическая клиника «Президент», 117449, Москва, Россия

<sup>5</sup> Стоматологическая клиника «Эстетика», 141191, Фрязино, Россия

## Нанотехнологии в стоматологии: гидрозолы наночастиц металлов — перспективные антибиотики

**Реферат.** Инфекционные заболевания — одна из ведущих причин смертности в популяции человека. ВОЗ отмечает, что развитие множественной лекарственной устойчивости бактерий — одна из острых проблем глобального здравоохранения. Рост устойчивости к антибиотикам связан в том числе с отсутствием новых противомикробных препаратов. **Цель** — получить гидро- и спиртозолы наночастиц металлов с длительным бактерицидным действием. **Материалы и методы.** В дистиллированной воде/спирте дуговым электрическим разрядом через два электрода получены гидро-/спиртозолы Ag, TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, VO<sub>2</sub>, CoO, TaO<sub>2</sub>, ZnO, CuO, комбинации TiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + MoO<sub>2</sub>. Исследования гидрозолей наночастиц металлов CuO, TaO<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, TiO<sub>2</sub>, Ag, ZnO проводили на культурах микроорганизмов *S. aureus*, *P. aeruginosa*, *P. vulgaris*, *S. tiphimurium*, *C. albicans*, *E. coli*. В гидрозолях CuO, TaO<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, TiO<sub>2</sub>, ZnO в качестве стабилизатора содержался 0,07% цетилпиридиния хлорид, в гидрозоле Ag — цитрат натрия (E331). Период наблюдения 14 суток. **Результаты.** Гидрозоли металлов бактерицидно активны в цельном растворе в концентрации 2,4—13,88 мг/л. **Заключение.** Разработана методика получения гидро- и спиртозоль нанодисперсных систем серебра, оксидов титана, железа, тантала, ванадия, кобальта, цинка, меди, комбинации диоксида титана с оксидом алюминия и диоксидом молибдена. Гидрозоли наночастиц серебра, оксидов меди (II), тантала (IV), железа (II, III), титана (IV), цинка манифестируют длительную бактерицидную активность в течение по меньшей мере 14 суток.

**Ключевые слова:** наночастицы, минимальная бактерицидная активность, гидрозолы, спиртозолы

### ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Иванов С.Ю., Карасенков Я.Н., Латута Н.В., Джатдаев В.В., Егоров Е.А., Тарасова Е.К., Козлова Э.В., Козлов П.А. Нанотехнологии в стоматологии: гидрозолы наночастиц металлов — перспективные антибиотики. — *Клиническая стоматология*. — 2023; 26 (1): 158—163. DOI: 10.37988/1811-153X\_2023\_1\_158

[S.Yu. Ivanov](#)<sup>1,2</sup>,

associate member of the Russian Academy of Sciences, Grand PhD in Medical Sciences, professor of the Oral and maxillofacial surgery Department; head of Maxillofacial Surgery Department.

[Ya.N. Karasenkov](#)<sup>3</sup>,

PhD in Medical Sciences, chief medical officer

[N.V. Latuta](#)<sup>1</sup>,

PhD Medical Sciences, associate professor of the Department of Pediatric Dentistry, Preventive Dentistry and Orthodontics

[V.V. Dzhataev](#)<sup>4</sup>,

dental surgeon

[E.A. Egorov](#)<sup>5</sup>,

doctor

## Nanotechnology in dentistry: hydrosols of metal nanoparticles are promising antibiotics

**Abstract.** Infectious diseases are the leading cause of morbidity and mortality in the human population. The causative agent for the development of multidrug-resistant bacteria is one of the most acute health problems. The rise in antibiotic resistance is also associated with the lack of new antimicrobials. Purpose: to obtain hydro/alcohol sols of metal nanoparticles with long-term bactericidal action. **Materials and methods.** Hydro/alcohol sols were obtained in distilled water/alcohol by arc electric discharge passing through two electrodes: Ag, TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, VO<sub>2</sub>, CoO, TaO<sub>2</sub>, ZnO, CuO, a combination of TiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + MoO<sub>2</sub>. The studies hydrosols of metal nanoparticles CuO, TaO<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, TiO<sub>2</sub>, Ag, ZnO were carried out on cultures of microorganisms *S. aureus*, *P. aeruginosa*, *P. vulgaris*, *S. tiphimurium*, *C. albicans*, *E. coli*. The hydrosols CuO, TaO<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, TiO<sub>2</sub>, ZnO contain cetylpyridinium chloride (CPC) as a stabilizer — 0.07%, in the hydrosol Ag the stabilizer is sodium citrate (E331). The observation period is 14 days. **Results.** Metal hydrosols are bactericidally active

[E.K. Tarasova](#)<sup>5</sup>,  
doctor

[E.V. Kozlova](#)<sup>1</sup>,  
dentist at the Therapeutic Division

[P.A. Kozlov](#)<sup>1</sup>,  
maxillofacial surgeon at the Maxillofacial  
Surgery Clinic

<sup>1</sup> Sechenov University,  
119991, Moscow, Russia

<sup>2</sup> RUDN University,  
117198, Moscow, Russia

<sup>3</sup> "Rosdent" Dental Clinic,  
119192, Moscow, Russia

<sup>4</sup> "President" Dental Clinic,  
117449, Moscow, Russia

<sup>5</sup> "Aesthetics" Dental Clinic,  
141191, Fryazino, Russia

in a whole solution of 2.4—13.88 mg/L. **Conclusions.** A method for obtaining hydro/alcohol sols of nanodispersed systems of metals Ag, TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, VO<sub>2</sub>, CoO, TaO<sub>2</sub>, ZnO, CuO, a combined solution of TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MoO<sub>2</sub> has been developed. Hydrosols CuO, TaO<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, TiO<sub>2</sub>, ZnO, demonstrate long-term bactericidal activity for 14 days.

**Key words:** nanoparticles, minimal bactericidal activity, hydrosols, alcohol sols

**FOR CITATION:**

Ivanov S.Yu., Karasenkov Ya.N., Latuta N.V., Dzhatdaev V.V., Egorov E.A., Tarasova E.K., Kozlova V.E., Kozlov P.A. Nanotechnology in dentistry: hydrosols of metal nanoparticles are promising antibiotics. *Clinical Dentistry (Russia)*. 2023; 26 (1): 158—163 (In Russ.). DOI: 10.37988/1811-153X\_2023\_1\_158

## ВВЕДЕНИЕ

Биопленка полости рта — структурированное сообщество, состоящее из широкого спектра микроорганизмов, включенных в матрицу внеклеточных полисахаридов. Она является фактором вирулентности инфекционных заболеваний полости рта, таких как кариес, пульпит, гингивит, пародонтит [1—4].

Кариес зубов — наиболее распространенное бактериальное инфекционное заболевание в популяции человека. Кариес и его осложнения являются дестабилизирующими факторами полости рта, общего здоровья и значительным финансовым обременением бюджета здравоохранения.

Основной механизм возникновения кариеса зубов — деминерализация эмали, возникающая при воздействии кислот, вырабатываемых бактериями биопленки зубного налета. Увеличение колоний ацидогенных бактерий, организация/созревание биопленок под воздействием ферментируемых углеводов повышают риски развития кариозного процесса [5—7].

Биопленка организуется на различных поверхностях: зубах, стоматологических материалах, ортопедических и ортодонтических конструкциях, слизистой оболочке. На поверхности формируется белковый слой из слюны и остатков пищи, называемый приобретенной пленкой, которая в дальнейшем колонизируется микроорганизмами. Как только кислоты, вырабатываемые микроорганизмами биопленки, инициируют кариозный процесс, он становится необратимым.

Лечение кариеса включает санацию кариозной полости зуба и пломбирование препарированной полости композитным материалом [8, 9]. Композитные реставрации подвергаются жевательным нагрузкам, агрессивному химическому воздействию и микробной деградации.

Микроорганизмы биопленки колонизируют границу раздела сред зуб—адгезив—пломба, что инициирует процесс вторичного/рецидивирующего кариеса и снижает срок функционирования реставрации. Вторичный кариес, возникающий на границе раздела сред, является основной причиной разрушений реставрации. В результате более половины установленных композитных стоматологических реставраций деградируют в течение 10 лет [10—13].

Порядка 50—70% всех реставраций — это замена ранее установленных пломб, а это серьезная финансовая нагрузка на бюджет системы здравоохранения и граждан. Вторичный кариес — основная причина микробной деградации композитных реставраций, таким образом, необходимо придать композиту, адгезиву и препарированной поверхности зуба длительные антибактериальные свойства.

Нанотехнологии предоставляют новые возможности в профилактике, лечении кариеса и его осложнений, контроля и управления биопленками полости рта [14—18]. Наночастицы имеют размер от 1 до 100 нм, использование их уникальных свойств для борьбы с инфекцией заметно выросло за последнее десятилетие. По мере уменьшения размеров частиц с микро- до нанометров результирующие свойства материалов резко меняются.

Например, прочность, активная площадь поверхности, химическая реакционная способность и биологическая активность стоматологических материалов в отношении биопленки полости рта меняются [19—23]. Применение наночастиц в стоматологии можно разделить на два основных направления: профилактическая и реставрационная стоматология.

Синтез новых бактерицидных агентов с пролонгированным антибактериальным эффектом позволит снизить назначение системных антибиотиков. Придать выраженные пролонгированные бактерицидные

свойства пломбирочным материалам, имплантатам, ортопедическим и ортодонтическим конструкциям имеющимся на сегодняшний день антибактериальными и антисептическими средствами не удается.

Изучение бактерицидных, токсических свойств гидро- и спиртозоль наночастиц металлов и их оксидов, применение наночастиц в качестве модифицирующих, легирующих агентов в композиционных стоматологических материалах, имплантах, ортопедических и ортодонтических конструкциях актуально и востребовано [24–32].

Биопленка полости рта, механические нагрузки на конструкции, микробная деградация композитных материалов, анатомия зубочелюстной системы выдвигают определенные требования к стоматологическим композитным материалам, адгезивным системам, ортопедическим и ортодонтическим конструкциям:

- наличие длительного антибактериального эффекта;
- низкий токсический эффект;
- адгезия к зубу, хирургическим/ортопедическим/ортодонтическим конструкциям;
- стабильные физико-химические свойства при взаимодействии с композиционными стоматологическими материалами/конструкциями;
- компенсация полимеризационного стресса/полимеризационной деформации;

В настоящее время применяются 3 основных способа получения наночастиц:

- 1) химический — окислительно-восстановительные реакции;

- 2) физический;
- 3) биологический.

Химический метод имеет ряд недостатков: используется осаждение, обработка ультразвуком, шаровая мельница, термическое разложение, распылительный пиролиз, термический гидролиз, золь-гель. Данные методики используют токсичные растворители/реагенты, высокую температуру/давление, присадки для стабилизации металлических наночастиц. Методы химического синтеза наночастиц не всегда воспроизводимы: размеры наночастиц, распределение агрегатов, геометрия, форма не всегда могут быть стабильно получены от одной партии к другой.

При физическом способе получения гидрозолей наночастиц металлов гидрозоли содержат наночастицы с чистой поверхностью, оптимальным дзета-потенциалом, контролируемым распределением агрегатов.

Биологический (зеленый) синтез — это почти все растения (травы, кустарники, деревья), содержащие латекс, флавоноиды, фенолы, спирты, белки, которые могут синтезировать наночастицы металлов. Метод зеленого синтеза наночастиц металлов и их оксидов связан с восстановлением ионов металлов биологическими материалами/организмами — растительными экстрактами, дрожжами, грибами и бактериями. Форму и размер наночастиц можно прогнозировать, контролируя температуру и концентрацию среды.

Синтезированные различными способами (химический, физический, биологический) наночастицы можно разделить на наночастицы металлов/неметаллов и оксидов металлов [33–35].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Гидрозоль наночастиц металлов и их оксидов получен электроимпульсным методом на установке ЛБМИ 04-08-2008 (ООО «Лаборатория биомедицинской инженерии»). Концентрирование дисперсной фазы наночастиц проводилось в водных растворах 0,07% цетилпиридиния хлорида (ЦПХ) и 0,5% цитрата натрия (Е331). Средние размеры 95% получаемых наночастиц — 1–3 нм, что создает высокоэнергетическую среду на границе раздела фаз дисперсной системы.

Критерием устойчивости гидрозолей нанодисперсных систем является величина дзета-потенциала на диффузионно-подвижной границе между наночастицами/агрегатами наночастиц дисперсной фазы и дисперсионной средой. Вторым критерий — степень агрегации наночастиц дисперсной фазы.

Искродуговой разряд между электродами в дистиллированной воде вызывает электрическую эрозию металла в электродах, в образующейся низкотемпературной плазме (до 40 000 К). Происходит конденсация металла электродов в жидкости (дистиллированная вода), образуется коллоидный раствор наноразмерных металлов, концентрация 1–50 мг/л.

Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) демонстрирует коллоидные растворы с кристаллической

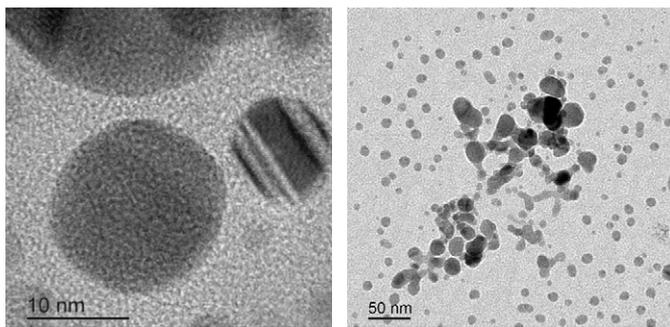


Рис. 1. ПЭМ (JEM 2100) наночастиц Ag  
Fig. 1. Transmission electron microscopy (JEM 2100) of Ag nanoparticles

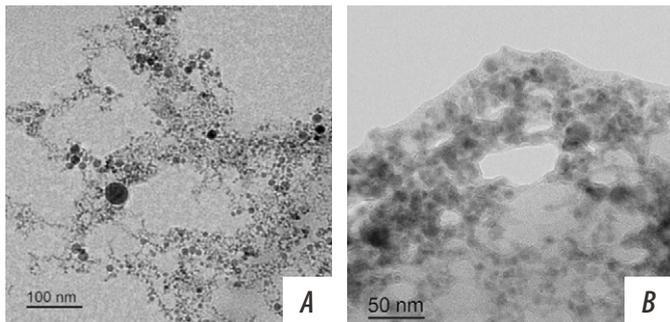


Рис. 2. ПЭМ наночастиц: А — CuO+ZnO, В — Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>  
Fig. 2. Transmission electron microscopy (JEM 2100) of nanoparticles: A — CuO+ZnO, B — Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

и аморфной фазой, с разным соотношением агрегатов, что обуславливает выраженную энергию поверхности наночастиц. Данная энергия передается дисперсионной среде процессами коагуляции, коалесценции, кристаллизации, окислительно-восстановительных реакций.

Для исследования бактерицидной активности взяты 6 гидрозолей наночастиц металлов со следующими составами и концентрациями:

1. Cu — 6,64 мг/л + 0,07% ЦПХ;
2. TaO<sub>2</sub> — 8,55 мг/л + 0,07% ЦПХ;
3. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> — 4,94 мг/л + 0,07% ЦПХ;
4. TiO<sub>2</sub> — 3,4 мг/л + 0,07% ЦПХ;
5. Ag — 2,4 мг/л + 0,5% цитрат натрия (Е331) — 5 мг/л;
6. ZnO — 13,88 мг/л + 0,07% ЦПХ.

Определение стерильности гидрозолей металлов проводили по ГОСТ 28085-2013 «Методы бактериологического контроля стерильности».

Исследуемые образцы гидрозолей металлов вносили в питательные среды по 1,0 см<sup>3</sup>:

- а) жидкая тиогликолевая среда при 32,5±2,5°С;
- б) жидкая среда Сабуро при 22,5±2,5°С;
- в) соево-казеиновая среда при 22,5±2,5°С.

Срок инкубирования — 14 суток. Параллельно проводился контроль стерильности через 14 суток.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Учет результатов стерильности проводили через 24, 48 и 72 ч. Рост на питательных средах не установлен, окончательный результат стерильности учли на 14-е сутки термостатирования посевов: исследуемые образцы гидрозолей металлов являются стерильными (см. таблицу).

## ОБСУЖДЕНИЕ

Определение стерильности гидрозолей металлов и их оксидов показывает выраженный, длительный антибактериальный эффект в концентрации коллоидных растворов 6,64–13,88 мг/л.

Манифестирование стерильных свойств гидрозолей металлов на 14-е сутки наблюдения показывает высокую эффективность коллоидных систем. С большой долей вероятности можно предположить, что модификация состава и поверхности стоматологических композиционных материалов, ортопедических, ортодонтических, хирургических конструкций покажет антибактериальные свойства стоматологических композитов и конструкций.

## ВЫВОДЫ

1. Отработана модифицированная методика получения гидро-/спиртозолей металлов и их оксидов Ag, TiO<sub>2</sub>,

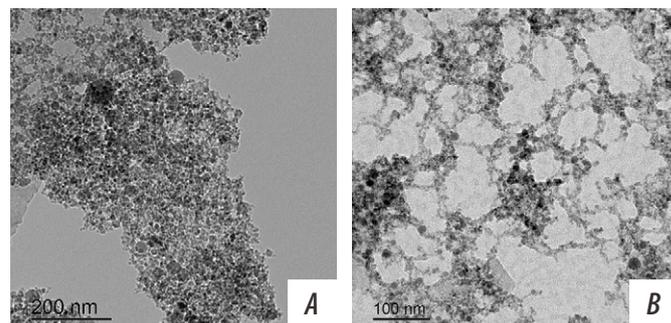


Рис. 3. ПЭМ (JEM 2100) наночастиц: А — TaO<sub>2</sub>, В — TiO<sub>2</sub>  
Fig. 3. Transmission electron microscopy (JEM 2100) of nanoparticles: А — TaO<sub>2</sub>, В — TiO<sub>2</sub>

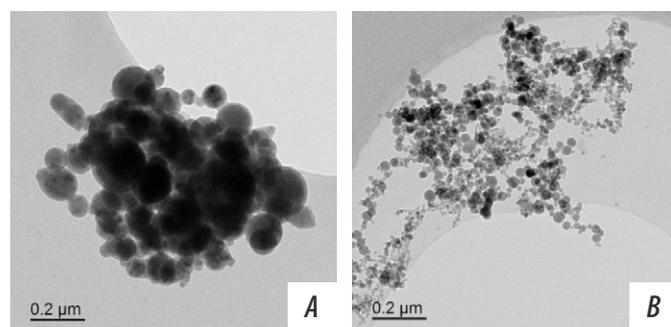


Рис. 4. ПЭМ (JEM 2100) наночастиц: А — CuO, В — VO<sub>2</sub>  
Fig. 4. Transmission electron microscopy (JEM 2100) of a nanoparticles: А — CuO, В — VO<sub>2</sub>

## Результаты бактериологического контроля стерильности гидрозолей металлов

The results of bacteriological control of the sterility of metal hydrosols

Образец	Жидкая тиогликолевая среда	Жидкая среда Сабуро	Соево-казеиновая среда	МПА	Эндо
CuO + ЦПХ	–	–	–	–	–
TaO <sub>2</sub> + ЦПХ	–	–	–	–	–
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> + ЦПХ	–	–	–	–	–
TiO <sub>2</sub> + ЦПХ	–	–	–	–	–
Ag + цитрат натрия	–	–	–	–	–
ZnO + ЦПХ	–	–	–	–	–
Контроль жидкой тиогликолевой среды	–	–	–	–	–
Контроль среды Сабуро	–	–	–	–	–
Контроль соево-казеиновой среды	–	–	–	–	–
Контроль МПА	–	–	–	–	–
Контроль среды Эндо	–	–	–	–	–

Примечание. (–) – рост отсутствует, (+) – рост микроорганизмов.

Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, VO<sub>2</sub>, CoO, TaO<sub>2</sub>, ZnO, CuO, композиционного гидрозоля TiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + MoO<sub>2</sub>.

2. Гидрозоли наночастиц CuO + 0,07% ЦПХ, TaO<sub>2</sub> + 0,07% ЦПХ, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> + 0,07% ЦПХ, TiO<sub>2</sub> + 0,07% ЦПХ, Ag + цитрат натрия (Е 331), ZnO + 0,07% ЦПХ манифестируют длительную, выраженную бактерицидную активность в периоде наблюдения 14 суток (ГОСТ 28085-2013).

3. Гидрозолями наночастиц металлов и их оксидов можно модифицировать композиционные стоматологические материалы, ортопедические, ортодонтические и хирургические конструкции для придания им антибактериальных свойств.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

**Поступила:** 11.07.2022      **Принята в печать:** 08.02.2023

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**Received:** 11.07.2022      **Accepted:** 08.02.2023

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES:

- Jiao Y., Tay F.R., Niu L.N., Chen J.H. Advancing antimicrobial strategies for managing oral biofilm infections. — *Int J Oral Sci.* — 2019; 11 (3): 28. [PMID: 31570700](#)
- Chevalier M., Ranque S., Prêcheur I. Oral fungal-bacterial biofilm models in vitro: a review. — *Med Mycol.* — 2018; 56 (6): 653—667. [PMID: 29228383](#)
- Sterzenbach T., Helbig R., Hannig C., Hannig M. Bioadhesion in the oral cavity and approaches for biofilm management by surface modifications. — *Clin Oral Investig.* — 2020; 24 (12): 4237—4260. [PMID: 33111157](#)
- Benoit D.S.W., Sims K.R. Jr, Fraser D. Nanoparticles for oral biofilm treatments. — *ACS Nano.* — 2019; 13 (5): 4869—4875. [PMID: 31033283](#)
- Chapple I.L., Bouchard P., Cagetti M.G., Campus G., Carra M.C., Cocco F., Nibali L., Hujuel P., Laine M.L., Lingstrom P., Manton D.J., Montero E., Pitts N., Rangé H., Schlueter N., Teughels W., Twetman S., Van Loveren C., Van der Weijden F., Vieira A.R., Schulte A.G. Interaction of lifestyle, behaviour or systemic diseases with dental caries and periodontal diseases: consensus report of group 2 of the joint EFP/ORCA workshop on the boundaries between caries and periodontal diseases. — *J Clin Periodontol.* — 2017; 44 Suppl 18: S39-S51. [PMID: 28266114](#)
- Sanz M., Beighton D., Curtis M.A., Cury J.A., Dige I., Domisch H., Ellwood R., Giacaman R.A., Herrera D., Herzberg M.C., Könönen E., Marsh P.D., Meyle J., Mira A., Molina A., Mombelli A., Quirynen M., Reynolds E.C., Shapira L., Zaura E. Role of microbial biofilms in the maintenance of oral health and in the development of dental caries and periodontal diseases. Consensus report of group 1 of the Joint EFP/ORCA workshop on the boundaries between caries and periodontal disease. — *J Clin Periodontol.* — 2017; 44 Suppl 18: S5-S11. [PMID: 28266109](#)
- Giacaman R.A., Fernández C.E., Muñoz-Sandoval C., León S., García-Manríquez N., Echeverría C., Valdés S., Castro R.J., Gambetta-Tessini K. Understanding dental caries as a non-communicable and behavioral disease: Management implications. — *Front Oral Health.* — 2022; 3: 764479. [PMID: 36092137](#)
- Grigaluskienė R., Slabšinskienė E., Vasiliauskienė I. Biological approach of dental caries management. — *Stomatologija.* — 2015; 17 (4): 107—12. [PMID: 27189495](#)
- Duangthip D., Chen K.J., Gao S.S., Lo E.C.M., Chu C.H. Managing early childhood caries with atraumatic restorative treatment and topical silver and fluoride agents. — *Int J Environ Res Public Health.* — 2017; 14 (10): 1204. [PMID: 28994739](#)
- Pinna R., Usai P., Filigheddu E., Garcia-Godoy F., Milia E. The role of adhesive materials and oral biofilm in the failure of adhesive resin restorations. — *Am J Dent.* — 2017; 30 (5): 285—292. [PMID: 29178733](#)
- Schwendicke F., Lamont T., Innes N. Removing or controlling? How caries management impacts on the lifetime of teeth. — *Monogr Oral Sci.* — 2018; 27: 32—41. [PMID: 29794420](#)
- Abdelaziz M., Zuluaga A.F., Betancourt F., Fried D., Krejci I., Bortolotto T. Optical coherence tomography (OCT) for the evaluation of internal adaptation of class V resin restorations on dentin. — *Proc SPIE Int Soc Opt Eng.* — 2020; 11217: 1121706. [PMID: 33603262](#)
- Carrera C.A., Lan C., Escobar-Sanabria D., Li Y., Rudney J., Aparicio C., Fok A. The use of micro-CT with image segmentation to quantify leakage in dental restorations. — *Dent Mater.* — 2015; 31 (4): 382—90. [PMID: 25649496](#)
- Amisshah F., Andey T., Ahlschwede K.M. Nanotechnology-based therapies for the prevention and treatment of Streptococcus mutans-derived dental caries. — *J Oral Biosci.* — 2021; 63 (4): 327—336. [PMID: 34536629](#)
- Ahmadian E., Shahi S., Yazdani J., Maleki Dizaj S., Sharifi S. Local treatment of the dental caries using nanomaterials. — *Biomed Pharmacother.* — 2018; 108: 443—447. [PMID: 30241047](#)
- Chen H., Gu L., Liao B., Zhou X., Cheng L., Ren B. Advances of anti-caries nanomaterials. — *Molecules.* — 2020; 25 (21): 5047. [PMID: 33143140](#)
- Qi M., Chi M., Sun X., Xie X., Weir M.D., Oates T.W., Zhou Y., Wang L., Bai Y., Xu H.H. Novel nanomaterial-based antibacterial photodynamic therapies to combat oral bacterial biofilms and infectious diseases. — *Int J Nanomedicine.* — 2019; 14: 6937—6956. [PMID: 31695368](#)
- Abuzenada B.M., Sonbul H.M. Bionanocomposites in caries prevention and treatment: A systematic review. — *J Pharm Bioallied Sci.* — 2022; 14 (Suppl 1): S13-S18. [PMID: 36110829](#)
- Румянцев В.А., Фролов Г.А., Блинова А.В., Карасенков Я.Н., Битюкова Е.В. Электронно-микроскопические свойства нового противомикробного нанопрепарата на основе гидроксида медикальция. — *Вестник Авиценны.* — 2021; 4: 532—541 [Rumyantsev V.A., Frolov G.A., Blinova A.V., Karasenkov Y.N., Bityukova E.V. Electron microscopic properties of a new antimicrobial nanodrug based on copper-calcium hydroxide compound. — *Avicenna Bulletin.* — 2021; 4: 532—541 (In Russ.)]. [eLibrary ID: 48042741](#)
- Леонтьев В.К., Кузнецов Д.В., Фролов Г.А., Погорельский И.П., Латута Н.В., Карасенков Я.Н. Антибактериальные эффекты наночастиц металлов. — *Российский стоматологический журнал.* — 2017; 6: 304—307 [Leont'ev V.K., Kuznetsov D.V., Frolov G.A., Pogorelskiy I.P., Latuta N.V., Krasenkov Y.N. Antibacterial effects of nanoparticles of metals. — *Russian Journal of Dentistry.* — 2017; 6: 304—307 (In Russ.)]. [eLibrary ID: 32607605](#)

21. Гладких П.Г. Эффект наночастиц серебра в отношении биопленок микроорганизмов (литературный обзор). — *Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание*. — 2015; 1: 3—4  
[Gladkikh P.G. Effect of silver nanoparticles on biofilms of microorganisms (review). — *Journal of New Medical Technologies, EEdition*. — 2015; 1: 3—4 (In Russ.)]. [eLibrary ID: 23131226](#)
22. Zhang L., Weir M.D., Chow L.C., Antonucci J.M., Chen J., Xu H.H. Novel rechargeable calcium phosphate dental nanocomposite. — *Dent Mater*. — 2016; 32 (2): 285—93. [PMID: 26743970](#)
23. Hook E.R., Owen O.J., Bellis C.A., Holder J.A., O'Sullivan D.J., Barbour M.E. Development of a novel antimicrobial-releasing glass ionomer cement functionalized with chlorhexidine hexameta-phosphate nanoparticles. — *J Nanobiotechnology*. — 2014; 12: 3. [PMID: 24456793](#)
24. Agnihotri R., Gaur S., Albin S. Nanometals in dentistry: Applications and toxicological implications — a systematic review. — *Biol Trace Elem Res*. — 2020; 197 (1): 70—88. [PMID: 31782063](#)
25. Vasiliu S., Racovita S., Gugoasa I.A., Lungu M.A., Popa M., Desbrieres J. The benefits of smart nanoparticles in dental applications. — *Int J Mol Sci*. — 2021; 22 (5): 2585. [PMID: 33806682](#)
26. Yin I.X., Zhang J., Zhao I.S., Mei M.L., Li Q., Chu C.H. The antibacterial mechanism of silver nanoparticles and its application in dentistry. — *Int J Nanomedicine*. — 2020; 15: 2555—2562. [PMID: 32368040](#)
27. Bapat R.A., Chaubal T.V., Dharmadhikari S., Abdulla A.M., Bapat P., Alexander A., Dubey S.K., Kesharwani P. Recent advances of gold nanoparticles as biomaterial in dentistry. — *Int J Pharm*. — 2020; 586: 119596. [PMID: 32622805](#)
28. Javed R., Rais F., Kaleem M., Jamil B., Ahmad M.A., Yu T., Qureshi S.W., Ao Q. Chitosan capping of CuO nanoparticles: Facile chemical preparation, biological analysis, and applications in dentistry. — *Int J Biol Macromol*. — 2021; 167: 1452—1467. [PMID: 33212106](#)
29. Jasso-Ruiz I., Velazquez-Enriquez U., Scougall-Vilchis R.J., Morales-Luckie R.A., Sawada T., Yamaguchi R. Silver nanoparticles in orthodontics, a new alternative in bacterial inhibition: in vitro study. — *Prog Orthod*. — 2020; 21 (1): 24. [PMID: 32803386](#)
30. Stubbing J., Brown J., Price G.J. Sonochemical production of nanoparticle metal oxides for potential use in dentistry. — *Ultrason Sonochem*. — 2017; 35 (Pt B): 646—654. [PMID: 27282407](#)
31. De Matteis V., Cascione M., Toma C.C., Albanese G., De Giorgi M.L., Corsalini M., Rinaldi R. Silver nanoparticles addition in poly (methyl methacrylate) dental matrix: Topographic and antimycotic studies. — *Int J Mol Sci*. — 2019; 20 (19): 4691. [PMID: 31546661](#)
32. Campos F., Bonhome-Espinosa A.B., Carmona R., Durán J.D.G., Kuzhir P., Alaminos M., López-López M.T., Rodríguez I.A., Carriell V. In vivo time-course biocompatibility assessment of bio-magnetic nanoparticles-based biomaterials for tissue engineering applications. — *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*. — 2021; 118: 111476. [PMID: 33255055](#)
33. Gutiérrez de la Rosa S.Y., Muñoz Diaz R., Villalobos Gutiérrez P.T., Patakfalvi R., Gutiérrez Coronado Ó. Functionalized platinum nanoparticles with biomedical applications. — *Int J Mol Sci*. — 2022; 23 (16): 9404. [PMID: 36012670](#)
34. Taran M., Rad M., Alavi M. Biosynthesis of TiO<sub>2</sub> and ZnO nanoparticles by *Halomonas elongata* IBRC-M 10214 in different conditions of medium. — *Bioimpacts*. — 2018; 8 (2): 81—89. [PMID: 29977829](#)
35. Paiva-Santos A.C., Herdade A.M., Guerra C., Peixoto D., Pereira-Silva M., Zeinali M., Mascarenhas-Melo F., Paranhos A., Veiga F. Plant-mediated green synthesis of metal-based nanoparticles for dermatopharmaceutical and cosmetic applications. — *Int J Pharm*. — 2021; 597: 120311. [PMID: 33539998](#)