

Оценка токсического действия квантовых точек InP/ZnSe/ZnS 650 на структуры переднего отрезка глаза при внутрикамерном введении в эксперименте *in vivo*

В.О. Пономарев^{1,2}К.А. Ткаченко¹М.С. Колмогорцева¹

¹ АО «Екатеринбургский центр МНТК «Микрохирургия глаза»
ул. Академика Бардина, 4а, Екатеринбург, 620149, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Уральский государственный медицинский университет»
Министерства здравоохранения Российской Федерации
ул. Репина, 3, Екатеринбург, 620028, Российская Федерация

РЕЗЮМЕ

Офтальмология. 2025;22(4):876–881

Цель: проанализировать токсическое воздействие наночастиц (квантовых точек) InP/ZnSe/ZnS 650 на структуры переднего отрезка глаза при их внутрикамерном введении в эксперименте *in vivo*. **Материалы и методы.** Проведено экспериментальное исследование на 20 глазах новозеландских кроликов. Животные были разделены на 4 группы: в трех группах в переднюю камеру глаза инъецировали раствор квантовых точек в концентрациях 1, 0,1 и 0,01 % соответственно, в четвертой группе (контрольная) животным вводили сбалансированный солевой раствор. Оценка состояния роговицы, радужки, влаги передней камеры и эндотелия роговицы проводилась с помощью щелевой лампы, оптической когерентной томографии и эндотелиальной микроскопии на 1-е и 7-е сутки после инъекции. **Результаты.** Клинически признаки воспаления или токсического повреждения (отек роговицы, гипопион, преципитаты) отсутствовали во всех группах. Данные эндотелиальной микроскопии не выявили статистически значимых различий ($p > 0,05$) между группами и сроками наблюдения по ключевым морфометрическим параметрам: плотность эндотелиальных клеток (ECD), коэффициент вариации (CV) и процент гексагональных клеток (GA). Показатели оставались в пределах физиологической нормы для данного вида животных. **Заключение.** Внутрикамерное введение квантовых точек InP/ZnSe/ZnS 650 в исследованных концентрациях (до 1 %) не оказывает токсического воздействия на структуры переднего отрезка глаза в условиях эксперимента *in vivo* в период наблюдения 7 дней. Полученные данные демонстрируют высокую биосовместимость наночастиц и обосновывают перспективность их дальнейшего изучения в качестве платформы для целевой доставки лекарственных средств в терапии тяжелых инфекционных заболеваний глаз.

Ключевые слова: квантовые точки, роговица, токсичность квантовых точек, допустимые концентрации

Для цитирования: Пономарев В.О., Ткаченко К.А., Колмогорцева М.С. Оценка токсичности квантовых точек InP/ZnSe/ZnS 650 на структуры переднего отрезка при внутрикамерном введении в эксперименте *in vivo*. Офтальмология. 2025;22(4):876–881. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2025-4-876-881>

Прозрачность финансовой деятельности: никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Конфликт интересов отсутствует.



Evaluation of the InP/ZnSe/ZnS 650 Quantum Dots Toxic Effect on the Eye Anterior Segment Structures upon Intracameral Administration *in vivo* Experiment

V.O. Ponomarev^{1,2}, H.A. Tkachenko¹, M.S. Holmogortseva¹

¹ Eye Microsurgery Ekaterinburg Center
Bardina str., 4a, Ekaterinburg, 620149, Russian Federation

² Ural State Medical University
Repina str., 3, Ekaterinburg, 620028, Russian Federation

ABSTRACT

Ophthalmology in Russia. 2025;22(4):876–881

Objective: to evaluate the toxic effect of InP/ZnSe/ZnS 650 nanoparticles (quantum dots) on the structures of the anterior segment of the eye during their intracameral administration *in vivo*. **Materials and methods.** An experimental study was conducted on 20 eyes of New Zealand rabbits. Animals were divided into 4 groups: three groups were injected into the anterior chamber of the eye with a solution of quantum dots at concentrations of 1%, 0.1% and 0.01%, respectively, the fourth group (control) received a balanced saline solution. Corneal, iris, anterior chamber moisture, and corneal endothelium were evaluated by slit lamp, optical coherence tomography, and endothelial microscopy on Days 1 and 7 after injection. **Results.** Clinically, there were no signs of inflammation or toxic damage (corneal edema, hypopyon, precipitates) in all groups. Endothelial microscopy data showed no statistically significant differences ($p > 0.05$) between groups and follow-up periods in key morphometric parameters: endothelial cell density (ECD), coefficient of variation (CV), and percentage of hexagonal cells (6A). The parameters remained within the physiological norm for this animal species. **Conclusion.** Intracameral administration of InP/ZnSe/ZnS 650 quantum dots at the studied concentrations (up to 1%) does not have a toxic effect on the structures of the anterior segment of the eye under experimental conditions *in vivo* during the observation period of 7 days. The data obtained demonstrate the high biocompatibility of nanoparticles and justify the prospects for their further study as a platform for targeted drug delivery in the treatment of severe infectious eye diseases.

Keywords: quantum dots, cornea, quantum dot toxicity, permissible concentrations

For citation: Ponomarev V.O., Tkachenko H.A., Holmogortseva M.S. Evaluation of the InP/ZnSe/ZnS 650 Quantum Dots Toxic Effect on the Eye Anterior Segment Structures upon Intracameral Administration *in vivo* Experiment. *Ophthalmology in Russia*. 2025;22(4):876–881. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2025-4-876-881>

Financial Disclosure: no author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

There is no conflict of interests.

АКТУАЛЬНОСТЬ

Современная офтальмология уделяет особое внимание вопросам безопасности и эффективности локальной доставки лекарственных и диагностических агентов, особенно при лечении воспалительных и инфекционных заболеваний глаз. В условиях тяжелых поражений роговицы, сопровождающихся риском перфорации, возможно как спонтанное, так и терапевтически обусловленное попадание веществ в переднюю камеру глаза [1, 2].

Глубокие бактериальные кератиты представляют собой тяжелую форму инфекционного поражения роговицы, при которой инфильтрат проникает в средние и глубокие слои стромы — более чем на 200–250 мкм от поверхности, то есть свыше 50–70 % от ее толщины [3]. Такие формы воспаления сопровождаются деструкцией коллагенового матрикса, могут приводить к перфорации роговицы, формированию гипопиона и вторичному вовлечению структур передней камеры глаза, включая развитие иридоциклита и эндофтальмита. Наиболее частыми возбудителями глубоких бактериальных кератитов являются *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus* и *Streptococcus pneumoniae* [4]. Особенно тяжело протекают случаи, вызванные

мультирезистентной флорой, при которой эффективность традиционных антибиотиков существенно снижена. Устойчивость *S. aureus* и *P. aeruginosa* к фторхинолонам и аминогликозидам продолжает возрастать [5], а при кератитах, вызванных *MDR-P. aeruginosa* (*Multidrug-Resistant Pseudomonas aeruginosa*), частота перфорации роговицы достигает 50 % и выше [6].

На этом фоне возрастает интерес к нанотехнологиям, в частности к квантовым точкам (КТ), как к многофункциональным платформам с потенциалом для терапии, целевой доставки препаратов и визуализации. Ранее нами была продемонстрирована способность КТ InP/ZnSe/ZnS 650 проникать в ткань роговицы на глубину до 390 мкм с прямой корреляционной зависимостью от времени экспозиции и концентрации раствора [7]. Однако данное исследование проводилось на кадаверных глазах без признаков воспаления, что ограничивает экстраполяцию результатов на клиническую практику. При активном кератите, сопровождающемся разрушением стромального каркаса и повышением проницаемости тканей, КТ потенциально могут проникать в переднюю камеру глаза, вызывая острую токсическую реакцию

V.O. Ponomarev, H.A. Tkachenko, M.S. Holmogortseva

Contact information: Holmogortseva Maria S. maria_kolm@mail.ru

Evaluation of the InP/ZnSe/ZnS 650 Quantum Dots Toxic Effect on the Eye Anterior Segment...

на структуры переднего отрезка, прежде всего на эндотелий роговицы и радужку.

С учетом потенциального клинического применения КТ возникает необходимость предварительной оценки их биобезопасности при возможном проникновении в переднюю камеру глаза, особенно в условиях воспалительного поражения роговицы. Это важно для понимания допустимых пределов концентрации, путей доставки и риска токсического воздействия на жизненно важные внутриглазные структуры.

Целью настоящего исследования был анализ токсического воздействия квантовых точек InP/ZnSe/ZnS на структуры переднего отрезка глаза при их внутрикамерном введении *in vivo*.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материал: правые глаза лабораторных животных (Новозеландские кролики, $n = 20$), раствор КТ InP/ZnSe/ZnS 650 в концентрациях 1, 0,1, 0,01 %.

Методы: эндотелиальная микроскопия (ЕМ4000, TOMEY, Германия), оптическая когерентная томография переднего отрезка глаза (Casia 2, TOMEY, Германия), фотофиксация переднего отрезка на фотоцелевой лампе (BM 900, Haag-Streit, Швейцария).

Объект исследования: лабораторные Новозеландские кролики ($n = 20$) — 10 женских и 10 мужских особей. Возраст животных варьировал от 3,5 до 4,5 месяцев (средний возраст $3,9 \pm 0,6$ месяца), вес от 3,5 до 4,2 кг (средний вес $3,8 \pm 0,4$ кг).

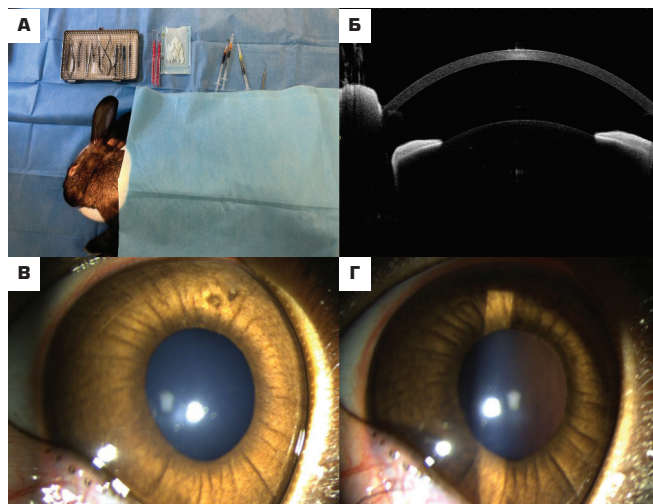


Рис. 1. Предоперационный коллаж фото: А — обзорный снимок операционного поля с инструментарием; Б — снимок структур переднего отрезка на оптическом когерентном томографе; В — снимок переднего отрезка на фотоцелевой лампе; Г — снимок переднего отрезка на фотоцелевой лампе в режиме ретроиллюминации

Fig. 1. Preoperative photo collage: A — overview photo of the surgical field with instruments; Б — photo of the anterior segment structures on an optical coherence tomography; В — photo of the anterior segment on a slit lamp; Г — photo of the anterior segment on a slit lamp in retroillumination mode

ДИЗАЙН ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент *in vivo* проводили в условиях операционного блока лицензированной ветеринарной клиники с офтальмологическим профилем ООО «Здоровье животных» города Екатеринбурга. Все этапы динамического наблюдения и выполнения объективных методов исследования выполняли на базе АО «Екатеринбургский центр МНТК “Микрохирургия глаза”». Все этапы экспериментального исследования с участием лабораторных животных проводились в соответствии заявлению ARVO (The Association for Research in Vision and Ophthalmology) об использовании животных в офтальмологических исследованиях [8].

Первым этапом всем лабораторным животным производилась общая анестезия с использованием современных средств для наркоза животным в виде комбинации препаратов тилетамин 50 мг и золазепам 50 мг (телазол 100 мг, раствор для инъекций) и ксилазин 20 мг («Ксила», раствор для инъекций). Препараты вводили внутримышечно для достижения выраженного расслабления мускулатуры и кратковременной общей анестезии из расчета телазол — 10 мг/кг, ксила — 3 мг/кг. Для достижения местной эпibuльбарной анестезии выполнялись инстилляции раствора проксиметакаина гидрохлорида 0,5 %.

Всем лабораторным животным предварительно выполняли следующие методы исследования: эндотелиальная микроскопия (ЕМ4000, TOMEY, Германия) с оценкой плотности эндотелиальных клеток, коэффициента вариации размеров клеток и выявлением процента гексагональных клеток, оптическая когерентная томография переднего отрезка глаза с определением толщины роговицы, состояния радужки, клеточной инфильтрации влаги передней камеры (Casia 2, TOMEY, Германия), фотофиксация переднего отрезка глаза на фотоцелевой лампе (BM 900, Haag-Streit, Швейцария) (рис. 1).

Далее животные были разделены на 4 группы по 5 глаз в каждой:

1. Первой группе лабораторных животных с помощью иглы 31G в переднюю камеру правого глаза вводили 1 % раствор КТ InP/ZnSe/ZnS 650 в объеме 0,1 мл.
2. Второй группе лабораторных животных с помощью иглы 31G в переднюю камеру правого глаза вводили 0,1 % раствор КТ InP/ZnSe/ZnS 650 в объеме 0,1 мл.
3. Третьей группе лабораторных животных с помощью иглы 31G в переднюю камеру правого глаза вводили 0,01 % раствор КТ InP/ZnSe/ZnS 650 в объеме 0,1 мл.
4. Четвертая группа была контрольной, им в переднюю камеру правого глаза вводили сбалансированный солевой раствор BSS в объеме 0,1 мл.

В дальнейшем, через 1, 7 суток с помощью выполненных на предварительном этапе объективных методов исследования оценивали состояние структур переднего отрезка глаза.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основании данных оптической когерентной томографии переднего отрезка глаза и фотофиксации на щелевой лампе, полученных в сроки наблюдения (1-е и 7-е сутки), токсической реакции со стороны структур переднего отрезка глаза не было выявлено во всех исследуемых группах (рис. 2–5).

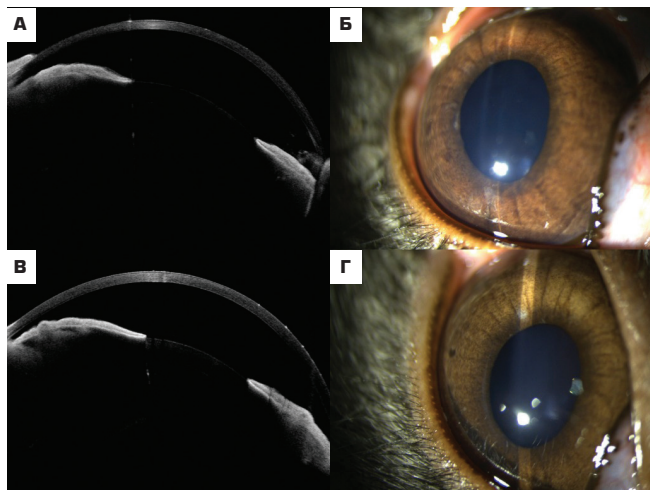


Рис. 2. Данные оптической когерентной томографии переднего отрезка и фотофиксация переднего отрезка при внутрикамерном введении 1 % раствора КТ InP/ZnSe/ZnS 650 в объеме 0,1 мл: на А, Б — 1-е сутки после введения; В, Г — 7-е сутки после введения

Fig. 2. Optical coherence tomography data of the anterior segment and photofixation of the anterior segment during intracameral injection of 1% InP/ZnSe/ZnS 650 CT solution in a volume of 0.1 ml: on А, Б — 1 day after injection; and В, Г — 7 days after injection

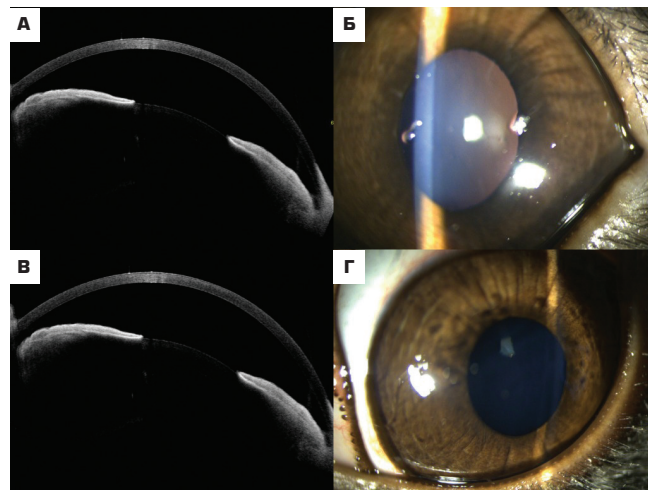


Рис. 3. Данные оптической когерентной томографии переднего отрезка и фотофиксация переднего отрезка при внутрикамерном введении 0,1 % раствора КТ InP/ZnSe/ZnS 650 в объеме 0,1 мл: на А, Б — 1-е сутки после введения; В, Г — 7-е сутки после введения

Fig. 3. Optical coherence tomography data of the anterior segment and photofixation of the anterior segment during intracameral injection of 0.1% InP/ZnSe/ZnS 650 CT solution in a volume of 0.1 ml: on А, Б — 1 day after injection; and В, Г — 7 days after injection

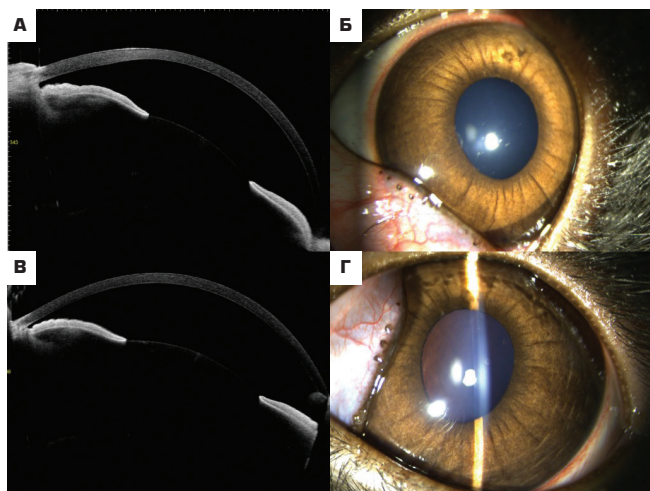


Рис. 4. Данные оптической когерентной томографии переднего отрезка и фотофиксация переднего отрезка при внутрикамерном введении 0,01% раствор КТ InP/ZnSe/ZnS 650 в объеме 0,1 мл: на А, Б — 1-е сутки после введения; В, Г — 7-е сутки после введения

Fig. 4. Optical coherence tomography data of the anterior segment and photofixation of the anterior segment during intracameral injection of 0.01% InP/ZnSe/ZnS 650 CT solution in a volume of 0.1 ml: on А, Б — 1 day after injection; and В, Г — 7 days after injection

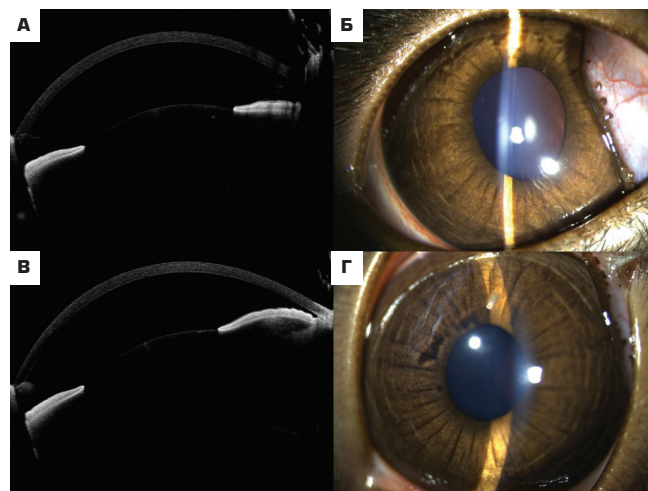


Рис. 5. Данные оптической когерентной томографии переднего отрезка и фотофиксация переднего отрезка при внутрикамерном введении раствора BSS в объеме 0,1 мл: на А, Б — 1-е сутки после введения, В, Г — 7-е сутки после введения

Fig. 5. Optical coherence tomography data of the anterior segment and photofixation of the anterior segment during intracameral injection of BSS solution in a volume of 0.1 ml: on А, Б — 1 day after injection, and В, Г — 7 days after injection

Радужная оболочка во всех случаях сохраняла структуру и четкие анатомические контуры без признаков атрофии или неоваскуляризации. Зрачковая реакция на световое раздражение оставалась «живой» и симметричной с парным глазом: время латентности сужения составляло 0,3–0,5 секунды, диаметр зрачка при мезопическом освещении 2,5–3,5 мм.

Передняя камера глаза сохраняла нормальную глубину (1,8–2,2 мм), а внутриглазная жидкость оставалась оптически прозрачной, без признаков клеточной инфильтрации. Хрусталик во всех наблюдениях сохранял полную прозрачность.

На контрольной фотофиксации на щелевой лампе (BM 900, Haag-Streit, режим диффузного освещения, увеличение 16×) не было выявлено ни в одном случае перикорнеальной инъекции сосудов, отложения воспалительных клеток на эндотелии роговицы, преципитатов, фибриновых пленок или гипопиона.

При эндотелиальной микроскопии оценивались плотность эндотелиальных клеток (Endothelial Cell Density, ECD) в виде количества клеток на мм², норма 2500–3000 кл/мм²; коэффициент вариации (Coefficient of Variation, CV) отражает вариабельность размеров клеток; норма ≤30 %; гексагональность (6A) — процент клеток эндотелия, имеющих шестиугольную форму, в норме ≥50–60 % клеток должны быть гексагональными (табл.).

Таблица. Основные статистические показатели (описательная статистика эндотелиальной микроскопии).

Table. Main statistical indicators (descriptive statistics of endothelial microscopy).

Параметр Parameter	Группа Group	1-е сутки 1 day	7-е сутки 7 day	p-value (t-тест)
Плотность эндотелиальных клеток (ECD)	1 % KT / quantum dots	2346,6 ± 107,8	2500,6 ± 195,3	0,12
	0,1 % KT / quantum dots	2494,2 ± 193,9	2500,8 ± 137,5	0,94
	0,01 % KT / quantum dots	2509,8 ± 123,5	2476,2 ± 168,3	0,71
	Контроль (BSS) / control	2460,4 ± 158,2	2491,8 ± 126,5	0,73
Коэффициент вариации (CV)	1 % KT / quantum dots	23,0 ± 3,2	23,0 ± 3,2	1,00
	0,1 % KT / quantum dots	23,8 ± 3,8	26,2 ± 3,6	0,18
	0,01 % KT / quantum dots	23,8 ± 3,5	22,8 ± 2,7	0,52
	Контроль (BSS) / control	27,6 ± 1,7	26,0 ± 3,5	0,25
Гексагональность Hexagonality (6A)	1 % KT / quantum dots	62,0 ± 1,4	62,0 ± 1,4	1,00
	0,1 % KT / quantum dots	63,0 ± 2,6	63,0 ± 2,6	1,00
	0,01 % KT / quantum dots	65,4 ± 3,0	65,8 ± 2,3	0,85
	Контроль (BSS) / control	66,4 ± 2,7	63,4 ± 3,8	0,09

Примечание: показатели представлены как среднее ± стандартное отклонение в каждой группе.

Note: the values are presented as mean ± standard deviation in each group.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЭНДОТЕЛИЯ

При статистическом анализе морфометрических параметров роговичного эндотелия не было выявлено достоверных различий между группами во все сроки наблюдения ($p > 0,05$). При сравнении групп между собой методом однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) были получены следующие результаты:

- Плотность эндотелиальных клеток (CD):
 - на 1-е сутки: $F(3,16) = 1,15$, $p = 0,35$,
 - на 7-е сутки: $F(3,16) = 0,19$, $p = 0,91$.
- Коэффициент вариации размеров клеток (CV):
 - на 1-е сутки: $F(3,16) = 1,89$, $p = 0,15$,
 - на 7-е сутки: $F(3,16) = 1,38$, $p = 0,27$.
- Процент гексагональных клеток (6A):
 - на 1-е сутки: $F(3,16) = 2,24$, $p = 0,11$,
 - на 7-е сутки: $F(3,16) = 1,23$, $p = 0,32$.

Парное сравнение динамики изменений внутри каждой группы с использованием парного t-теста также не показало статистически значимых различий между показателями на 1-е и 7-е сутки наблюдения (все $p > 0,05$). Наибольшие изменения отмечались в группе 0,1 % KT по показателю CV ($p = 0,18$) и в контрольной группе по показателю 6A ($p = 0,09$), однако эти различия не достигли уровня статистической значимости.

Корреляционный анализ выявил слабую отрицательную взаимосвязь между плотностью эндотелиальных клеток и коэффициентом вариации их размеров как на 1-е ($r = -0,31$, $p = 0,22$), так и на 7-е сутки ($r = -0,42$, $p = 0,09$), однако эти корреляции не были статистически значимыми.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты демонстрируют высокую степень биосовместимости квантовых точек InP/ZnSe/ZnS 650 при их внутрикамерном введении в глаз в эксперименте на животных. Несмотря на потенциальные опасения, связанные с токсичностью наночастиц и их взаимодействием с чувствительными структурами переднего отрезка глаза, такими как роговичный эндотелий, радужка, ни клинически, ни морфометрически не зафиксировано признаков повреждения или воспаления. Отсутствие статистически значимых различий между исследуемыми и контрольной группой по показателям плотности эндотелиальных клеток, вариации размеров клеток и гексагональности подтверждает безопасность данного наноматериала в краткосрочной перспективе.

Особенно важно подчеркнуть, что даже при введении наивысшей исследуемой концентрации KT (1 %) не было выявлено ни клинических признаков воспалительной реакции, ни изменений, указывающих на структурное или функциональное нарушение роговичного эндотелия. В нашем предыдущем исследовании [9] на культурах клеток конъюнктивы и роговицы человека установлены нетоксичные концентрации KT CdTe/Cd (теллурид

кадмиевые) МРА 710; Ag (10 %) InP/ZnS (фосфид индиевые, допированные серебром) МРА 710; InP/ZnSe/ZnS (фосфид индиевые) 650 МРА от 0,0001 % и меньше на уровне изучения морфологии и жизнеспособности клеток *in vitro*. Более высокую устойчивость структур глаза кроликов к более концентрированным растворам КТ в сравнении с культурами клеток человека, вероятно, можно объяснить тем, что целостный организм на уровне тканевой организации и местной нейроэндокринной регуляции и иммунной защиты является менее уязвимым к воздействию внешних факторов, в нашем случае — физико-химического воздействия КТ, чем изолированные популяции клеток *in vitro*. Это открывает перспективы для дальнейшего изучения КТ как платформы для локальной антимикробной терапии и направленной доставки лекарств в офтальмологии. Полученные данные особенно актуальны на фоне растущей антибиотикорезистентности и ограничений классических подходов к терапии инфекционных поражений глаз.

Вместе с тем необходимо учитывать ограничения настоящего исследования: небольшой объем выборки, кратковременный период наблюдения и отсутствие гистологического анализа. Для окончательной оценки долгосрочной безопасности и биодegradации КТ *in vivo* требуется расширение сроков наблюдения, проведение повторных инъекций и изучение накопления наночастиц в структурах глаза, а также особенностей их фармакокинетики и фармакодинамики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное *in vivo* исследование продемонстрировало отсутствие признаков токсического воздействия на структуры переднего отрезка глаза при внутрикамерном введении в глаз наночастиц InP/ZnSe/ZnS 650 в концентрациях до 1 %. По данным оптической когерентной томографии и фотофиксации на щелевой лампе установлено сохранение анатомической целостности роговицы, радужки и прозрачности влаги передней камеры на всех этапах наблюдения.

При эндотелиальной микроскопии не было выявлено статистически значимых различий в состоянии роговичного эндотелия при внутрикамерном введении квантовых точек InP/ZnSe/ZnS 650 в различных концентрациях (1, 0,1, 0,01 %) в сравнении с контрольной группой в сроки наблюдения до 7 суток. Полученные данные свидетельствуют об отсутствии токсического воздействия исследуемых наночастиц на морфометрические параметры эндотелия роговицы в условиях эксперимента.

ВЫВОДЫ

Внутрикамерное введение квантовых точек InP/ZnSe/ZnS 650 в концентрациях 1, 0,1 и 0,01 % не вызывает токсических изменений в тканях переднего отрезка глаза кроликов в течение 7 суток наблюдения.

УЧАСТИЕ АВТОРОВ:

Пономарев В.О. — концепция, дизайн исследования, научное редактирование; Ткаченко К.А. — написание текста, техническое редактирование; Колмогорцева М.С. — техническое редактирование, подготовка иллюстраций.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Gautam M, Gupta R, Singh P, Verma V, Verma S, Mittal P, Karkhur S, Sampath A, Mohan RR, Sharma B. Intracameral Drug Delivery: A Review of Agents, Indications, and Outcomes. *J Ocul Pharmacol Ther*. 2023 Mar;39(2):102–116. doi: 10.1089/jop.2022.0144.
- Ozlem TY, Necati DM, Fatma YM, Gülsen Y, Ayşe NB, Firdevs O. Are cefuroxime and vancomycin really safe on the corneal endothelial cells? *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*. 2010 Mar;248(3):415–420. doi: 10.1007/s00417-009-1267-3.
- Pearce JG, Sarac O, Maddess T. A Review of the Categorizations of Mild, Moderate, and Severe Bacterial Keratitis Ulcers and Day-1 Treatment Regimen When Using the Topical Fluoroquinolones 0.3% Ciprofloxacin and 0.3% Ofloxacin. *Curr Ther Res Clin Exp*. 2023 Nov 17;99:100729. doi: 10.1016/j.curtheres.2023.100729.
- Shah S, Wozniak RAF. Staphylococcus aureus and Pseudomonas aeruginosa infectious keratitis: key bacterial mechanisms that mediate pathogenesis and emerging therapeutics. *Front Cell Infect Microbiol*. 2023 Aug 21;13:1250257. doi: 10.3389/fcimb.2023.1250257.
- Lalitha P, Manoharan G, Karpagam R, Prajna NV, Srinivasan M, Mascarenhas J, Das M, Porco TC, Lietman TM, Cevallos V, Keenan JD. Trends in antibiotic resistance in bacterial keratitis isolates from South India. *Br J Ophthalmol*. 2017 Feb;101(2):108–113. doi: 10.1136/bjophthalmol-2016-308487.
- Fernandes M, Vira D, Medikonda R, Kumar N. Extensively and pan-drug resistant Pseudomonas aeruginosa keratitis: clinical features, risk factors, and outcome. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*. 2016 Feb;254(2):315–322. doi: 10.1007/s00417-015-3208-7.
- Пономарев ВО, Казайкин ВН, Ткаченко КА, Коваленко ЕГ, Вайнштейн ИА, Вохминцев АС, Жданов АЕ, Кулябин МК. Исследование проникающей способности квантовых точек InP/ZnSe/ZnS 650 в структуры переднего сегмента глаза в эксперименте *ex vivo*. *Офтальмохирургия*. 2024;4(142):84–96. Ponomarev VO, Kazaikin VN, Tkachenko KA, Kovalenko EG, Vokhmintsev AS, Vainshtein IA, Zhdanov AE, Kulyabin MK. Investigation of the penetration ability of INP/ZnSe/ZnS 650 quantum dots into the structures of the anterior segment of the eye in an *ex vivo* experiment. *Fyodorov Journal of Ophthalmic Surgery*. 2024;4(142):84–96 (In Russ.). doi: 10.25276/0235-4160-2024-4-84-96.
- ARVO (The Association for Research in Vision and Ophthalmology) (2024) ARVO statement for the use of animals in ophthalmic and vision research. Available at: <https://www.arvo.org/About/policies/arvo-statement-for-the-use-of-animals-in-ophthalmic-and-vision-research/> (Accessed: 12 August 2025).
- Пономарев ВО, Демченко НС, Ткаченко КА, Федотова ОС. Исследование цитотоксического воздействия квантовых точек на клеточных культурах роговицы и конъюнктивы человека в аспекте перспектив лечения инфекционного кератита. *Офтальмохирургия*. 2024;3(141):99–106. Ponomarev VO, Demchenko NS, Tkachenko KA, Fedotova OS. Investigation of the cytotoxic effect of quantum dots on human corneal and conjunctival cell cultures in the aspect of prospects for the treatment of infectious keratitis. *Fyodorov Journal of Ophthalmic Surgery*. 2024;3(141):99–106 (In Russ.). doi: 10.25276/0235-4160-2024-3-99-106.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Пономарев Вячеслав Олегович
доктор медицинских наук, врач-офтальмохирург, заместитель генерального директора по научно-клинической работе, ассистент кафедры офтальмологии
<https://orcid.org/0000-0002-2353-9610>

Ткаченко Константин Андреевич
врач-офтальмолог
<https://orcid.org/0000-0001-8593-9364>

Колмогорцева Мария Сергеевна
врач-офтальмолог
<https://orcid.org/0009-0008-4828-9751>

ABOUT THE AUTHORS

Ponomarev Vyacheslav O.
MD, ophthalmic surgeon, deputy general director for scientific and clinical work
assistant at the Department of Ophthalmology
<https://orcid.org/0000-0002-2353-9610>

Tkachenko Konstantin A.
ophthalmologist
<https://orcid.org/0000-0001-8593-9364>

Kolmogortseva Mariya S.
ophthalmologist
<https://orcid.org/0009-0008-4828-9751>