

УДК 621.373.826:535.21

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ПРОЦЕССОВ ОПТИЧЕСКОЙ КАВИТАЦИИ И ФРАГМЕНТАЦИИ СВЕТОПОГЛОЩАЮЩИХ МИКРОВКЛЮЧЕНИЙ В ЖИДКИХ СРЕДАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

**Шамова А.А.** (Университет ИТМО), **Поляков Д.С.** (Университет ИТМО)

**Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Беликов А.В.**  
(Университет ИТМО)

**Научный консультант – к.ф.-м.н., доцент Шандыбина Г.Д.**  
(Университет ИТМО)

В работе представлена теоретическая модель формирования газового микропузыря на светопоглощающем микровключении в жидкости при лазерном воздействии. Проведённые оценки размера газового микропузыря в зависимости от размера микровключения и параметров лазерного воздействия сопоставлены с экспериментальными данными по облучению агломератов углеродных наночастиц в жидких средах короткими и ультракороткими лазерными импульсами с различной плотностью энергии и частотой следования. Исследованные закономерности могут способствовать оптимизации параметров лазеров для биомедицинских приложений.

**Введение.** Развитие широкого спектра нанотехнологий способствует изменению основ диагностики, профилактики и лечения заболеваний. В настоящее время наиболее широко изучаемым наноматериалом является технический углерод. Известно, что он в качестве чёрного пигмента входит в состав различных красок, применяемых, в частности, для создания косметических и медицинских татуировок (например, колоноскопической татуировки на стенке кишечника, лимфатического картирования, маркировки сосудов и т.д.). В последние годы активно исследуется возможность применения наночастиц технического углерода для внутриклеточной доставки лекарств. Основной тенденцией повышения безопасности и эффективности процедур удаления татуировок и внутриклеточной доставки лекарств является использование лазерных систем, генерирующих короткие и ультракороткие импульсы и позволяющих минимизировать тепловое повреждение биотканей, окружающих микровключения. Особенностью взаимодействия лазерного излучения с углеродными нано- и микрочастицами, введёнными в биоткань, является то, что оно происходит в окружении внутритканевой жидкости и сопровождается явлением оптической кавитации. Формирующиеся при этом микропузыри могут играть как положительную роль (позволяют увеличить проницаемость плазматической мембраны клетки при доставке биоактивных молекул), так и отрицательную роль (при удалении татуировок микропузыри приводят к росту светорассеяния в дерме, что ухудшает доставку излучения к глубоко расположенным частицам тату-пигмента, снижает эффективность и увеличивает продолжительность лечения). Для повышения эффективности лазерного воздействия на светопоглощающие микровключения, введённые в биоткань, а также для уменьшения размеров области повреждения вокруг зоны обработки может использоваться многоимпульсный режим облучения. Однако степень влияния оптической кавитации, инициируемой в биоткани лазерным излучением, на процесс фрагментации светопоглощающих микровключений может существенно изменяться в зависимости от энергии импульсов, их числа и частоты следования. Поэтому следует проанализировать связь между процессами оптической кавитации и фрагментации микровключений (агломератов углеродных наночастиц) в жидкой среде при воздействии серии коротких и ультракоротких лазерных импульсов.

**Основная часть.** В работе используются имитирующие татуированную кожу фантомные образцы в виде сухого агломерата углеродных частиц, покрытого слоем (капель) дистиллированной воды либо глицерина, а также в виде капли коллоидного раствора чёрной краски «True Black» (World Famous Tattoo Ink, США) в 86% водном растворе глицерина,

нанесённых на предметные стёкла. Эксперименты были проведены с помощью иттербиевого импульсного волоконного ( $\lambda=1.07$  мкм,  $\tau=20$  нс,  $f=5-99$  кГц), пикосекундного ( $\lambda=1.064$  мкм,  $\tau=30$  пс,  $f=10$  Гц) и фемтосекундного волоконного ( $\lambda=1.03$  мкм,  $\tau=250$  фс – 3 пс,  $f=201$  кГц) лазеров. Для анализа и обработки изображений, полученных с помощью оптического микроскопа с CCD-камерой, использовалась программа ImageJ (National Institute of Health, США).

Продемонстрировано, что для используемых лазеров и режимов облучения в каплях жидкости, содержащей микровключения, на различной глубине наблюдаются долгоживущие микропузыри. При этом чем больше размер микропузыря, тем больше время его жизни.

В работе приведена упрощённая теоретическая модель формирования газового микропузыря на светопоглощающем микровключении в жидкости при лазерном воздействии, устанавливающая связь между размерами микропузыря и микровключения, а также параметрами лазерного излучения. Теоретические результаты сопоставлены с экспериментальными данными, полученными при облучении агломератов углеродных наночастиц в жидких средах серией коротких и ультракоротких лазерных импульсов.

Подтверждён пороговый характер двух процессов: лазерной фрагментации агломератов углеродных наночастиц и оптической кавитации в жидкой среде. Показано, что с увеличением частоты следования наносекундных лазерных импульсов на динамику распределения газовых микропузырей в жидкости начинают влиять накопительные процессы.

**Выводы.** Установлен ряд закономерностей в развитии процессов оптической кавитации и фрагментации агломератов углеродных наночастиц в жидких средах при воздействии импульсного лазерного излучения, что важно для развития биомедицинских применений лазеров, включая удаление татуировок и внутриклеточную доставку лекарств.