

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЛАЗЕРНОЙ ФОТОНИКИ В ОРТОПЕДИЧЕСКОЙ СТОМАТОЛОГИИ ДЛЯ НЕИНВАЗИВНОГО БЕСКОНТАКТНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕМНЫХ МИКРОДЕФОРМАЦИЙ КОСТНЫХ ТКАНЕЙ

М.А. Гроссманн¹, А.И. Ларкин²

¹Страсбургский университет им. Луи Пастера, Страсбург, Франция

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

Резюме

Современные методы лазерной фотоники, позволяющие бесконтактно с высокой чувствительностью измерять динамику микродеформаций объемных объектов, находят все более широкое применение в самых разнообразных областях. Особенно привлекательно применение такой деликатной, не возмущающей объект методики в медицине. Цель настоящей работы – обосновать возможность и целесообразность применения лазерной фотоники в ортопедической стоматологии для неинвазивного бесконтактного исследования объемных микродеформаций костной ткани. В статье приведены результаты экспериментов с использованием методов лазерной фотоники в стоматологической имплантологии, позволивших дать практические медицинские рекомендации. В частности, в работе проведено исследование возможностей методов голографической и спекл-интерферометрии для измерения деформирования костной ткани челюсти при пошаговой установке мини-имплантов цилиндрической и конической формы. Продемонстрирована возможность определения времени релаксации деформаций после установки мини-имплантов.

Ключевые слова: лазерная фотоника, стоматологическая имплантология, спекл-эффект, голографическая интерферометрия.

Для цитирования: Гроссманн М.А., Ларкин А.И. Применение методов лазерной фотоники в ортопедической стоматологии для неинвазивного бесконтактного исследования объемных микродеформаций костной ткани // *Biomedical Photonics*. – 2018. – Т. 7, № 2. – С. 13–18. doi: 10.24931/2413–9432–2018–7–2–13–18.

Контакты: Ларкин А.И., e-mail: alexlarkin16@gmail.com

APPLICATION OF LASER PHOTONICS METHODS IN ORTHOPEDIC DENTISTRY FOR NON-INVASIVE NON-CONTACT EXAMINATION OF BULK MICRO-DEFORMATIONS OF BONE TISSUE

Grossmann M.A.¹, Larkin A.I.²

¹Louis Pasteur University of Strasbourg, Strasbourg, France

²National Nuclear Research University MEPhI, Moscow, Russia

Abstract

Modern methods of laser photonics, which make it possible to measure the dynamics of micro-deformations of volumetric objects without contact and with high sensitivity, find increasing application in a wide variety of fields. Particularly attractive is the use of such a delicate, non-perturbing technique in medicine. The article reports on experiments using laser photonics methods in dental implantology, which allowed to give practical medical recommendations. In the work, a study was made of the possibilities of holographic and speckle interferometry methods for measuring the deformation of the jaw bone tissue with a step-by-step installation of cylindrical and conical mini implants. The possibility of determining the relaxation time of deformations after the installation of mini implants was demonstrated. The purpose of this work is to justify the possibility and feasibility of using laser photonics to solve this medical problem.

Keywords: laser photonics, dental implantology, speckle effect, holographic interferometry.

For citation: Grossmann M.A., Larkin A.I. Application of laser photonics methods in orthopedic dentistry for non-invasive non-contact examination of bulk micro-deformations of bone tissue, *Biomedical Photonics*, 2018, T. 7, No. 2, pp. 13–18. (in Russian). doi: 10.24931/2413–9432–2018–7–2–13–18.

Contacts: Larkin A.I., e-mail: alexlarkin16@gmail.com

Введение

Лечение больных с полной утратой зубов по-прежнему остается одной из актуальных проблем ортопедической стоматологии. На данный момент, обеспеченность населения пожилого возраста протезами составляет 44%, из которых лишь 50% пациентов удовлетворены их качеством, а 25% – вовсе ими не пользуются. Причинами, не позволяющими адаптироваться к съемным пластиночным протезам, является их слабая фиксация в полости рта и дискомфорт или боль, проявляющиеся при их ношении. Наиболее остро стоит проблема крепления съемных пластиночных протезов у пациентов с полной утратой зубов и резкой формой атрофии альвеолярного отростка. Предложено много методов фиксации протезов на беззубых челюстях: механические, хирургические, физические, включая использование эластичных подкладок, адгезивных гелей, порошков, пленок и т.д., – однако радикальное решение данной проблемы дает только имплантология. В связи с этим становится актуальной проблема неинвазивного бесконтактного исследования объемных микродеформаций костной ткани в процессе внедрения импланта в челюсть пациента. Для решения таких задач ортопедической стоматологии, как исследование степени деформации костной ткани челюсти и истирания протеза, а также смещения зубов, целесообразно привлечение современных методов когерентной лазерной фотоники.

Материалы и методы

Использование методик лазерной фотоники позволяет проводить бесконтактные измерения полей перемещения объемных диффузных объектов с чувствительностью до долей длины волны излучения лазера.

Голографическая интерферометрия позволяет получить информацию о полных векторах перемещений точек поверхности деформируемого тела, но в отличие от классической, она позволяет работать с объемными диффузно рассеивающими объектами [1,2]. В голографической интерферометрии интерференционные полосы могут быть локализованными. Это обстоятельство существенно усложняет интерпретацию голографических интерферограмм – определение компонент вектора перемещения точки поверхности деформируемого тела по картине полос. Большинство методов голографической интерферометрии изучает только форму полос на интерференционной картине, в то время как контраст полос и положение области их локализации также связаны с изменениями, произошедшими с объектом между экспозициями.

Корреляционная спекл-интерферометрия представляет собой класс измерительных методов, в которых происходит когерентное сложение поля, имеющего спекл-структуру, с плоской опорной волной или с другим полем, имеющим спекл-структуру [3,4]. Добав-

ление опорной волны приводит к существенным изменениям в поведении картины спеклов при перемещении объекта в направлении к наблюдателю или от него. Чувствительность этого метода сравнима с чувствительностью голографической интерферометрии. Основные преимущества спекл-интерферометрии заключаются в снижении требований к механической стабильности элементов системы и когерентности лазерного излучения, легко перенастраиваемой чувствительности, простоте измерения смещений и возможности компьютерной обработки результатов.

По сравнению с голографическими методами, требования к разрешающей способности регистрирующей среды в методе корреляционной спекл-интерферометрии оказываются менее жесткими. Это связано с требованием обеспечить разрешение только спекл-структуры, которое может существенно превышать длину волны лазера, а не тонкой структуры полос, возникающих на голограмме в результате интерференции предметной и опорной волн. Характерный размер спекла b_s , определяется длиной волны излучения лазера λ , апертурой D и фокусным расстоянием линзы f

$$b_s \approx 1,22 \cdot \lambda \cdot \frac{f}{D}.$$

Типичные минимальные размеры спеклов лежат в пределах 1–100 мкм, поэтому для записи спекл-структуры можно использовать стандартную видеокамеру. Таким образом, для получения картины спекл-корреляционных полос наряду с фотографией можно использовать видеозапись. Отличительной особенностью метода электронной спекл-интерферометрии является то, что он позволяет выводить динамическую картину корреляционных полос непосредственно на экран дисплея, минуя этап фоторегистрации. Электронная спекл-интерферометрия позволяет создать автоматизированную систему регистрации полей перемещений с последующей обработкой данных на компьютере.

Изменение микрорельефа поверхности тела при регистрации голографических и спекл-интерферограмм приводит к уменьшению контраста интерференционных полос вплоть до их полного исчезновения. В голографической интерферометрии изменение микрорельефа поверхности тела приводит к декорреляции восстановленных световых волн, в результате чего контраст полос уменьшается. В спекл-фотографии, наиболее распространенном методе спекл-интерферометрии, изменение микрорельефа поверхности тела приводит к декорреляции спекл-структур изображения поверхности тела, в результате чего контраст полос Юнга уменьшается. Таким образом, исследование закономерностей регистрации го-

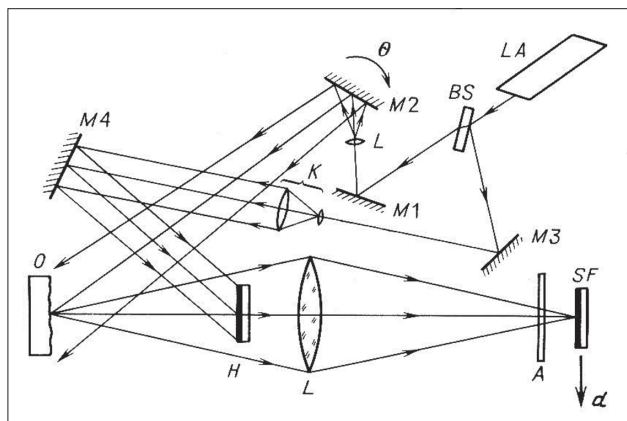


Рис. 1. Оптическая схема одновременной регистрации голографических интерферограмм и спекл-фотографий: LA – лазер, BS – делитель пучка, K – коллиматор, M1, M2, M3 и M4 – зеркала, L – объектив, O – объект, A – экран, H – голограмма, SF – спекл-фотография

Fig. 1. Optical scheme for simultaneous recording of holographic interferograms and speckle photographs: LA – laser, BS – beam splitter, K – collimator, M1, M2, M3 and M4 – mirrors, L – lens, O – object, A – screen, H – hologram, SF – speckle photo

логографических и спекл-интерферограмм при случайном изменении микрорельефа или смещения поверхности тела дает возможность использовать эти методы для изучения различного типа взаимодействий между твердыми телами. Для изучения релаксации деформаций при установке в костную ткань мини-имплантов регистрируются двухэкспозиционные голограммы костной ткани вблизи места установки в различные моменты времени с одинаковым интервалом времени между экспозициями. В результате обработки голографических и спекл-интерферограмм получаются зависимости перемещения по высоте тела челюсти для каждого из выбранных шагов вкручивания импланта.

Сравнивая результаты измерения перемещений точек костной ткани челюсти с целым зубным рядом и с протезом, можно оценить работоспособность и качество конкретного вида протеза.

Для проведения экспериментальных исследований разработано универсальное устройство, позволяющее совместить методы голографической интерферометрии и электронной спекл-интерферометрии (рис. 1).

В системах, основанных на регистрации отражательных голограмм, использованы две оптические схемы: с креплением фотопластинки на объекте исследования (рис. 2а), либо с креплением фотопластинки вне объекта исследования (рис. 2б). Первая схема эффективна в тех случаях, когда требуется определение только деформационных перемещений. Жесткие смещения челюсти, как целого, исключаются автоматически. Вторая схема позволяет зарегистрировать деформационные перемещения на фоне жестких смещений – трансляций и поворотов. При исследовании перемещений костной ткани челюсти и зубов может использоваться либо одна, либо другая схема. Отраженный зеркалом лазерный луч расширяется микрообъективом, установленным в фокусе линзы. Сформированная линзой плоская волна освещает исследуемый объект. Рассеянный объектом свет формирует предметную голографическую волну.

Интерференционные полосы в голографической схеме Лейта и Упатниекса и цифровой спекл-интерферометрии промодулированы спекл-шумом. На рис. 3а приведена увеличенная голографическая интерферограмма, на которой хорошо видна спекл-структура, а на рис. 3б – картина полос, полученная методом цифровой спекл-интерферометрии.

Спеклы модулируют распределение интенсивности света в интерференционной картине, в результа-

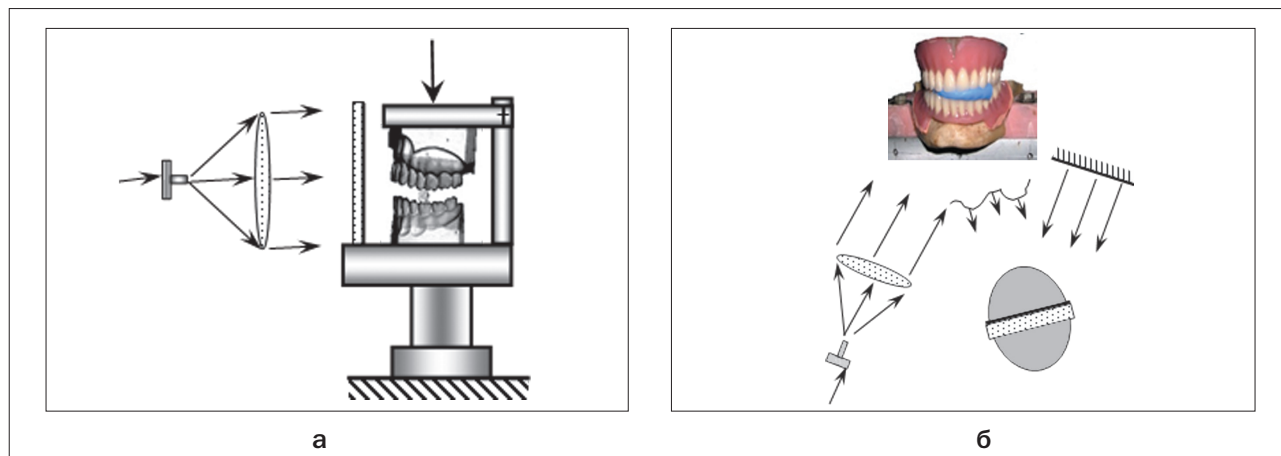
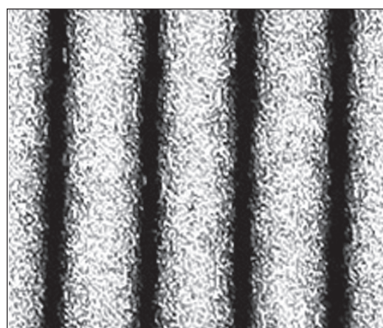
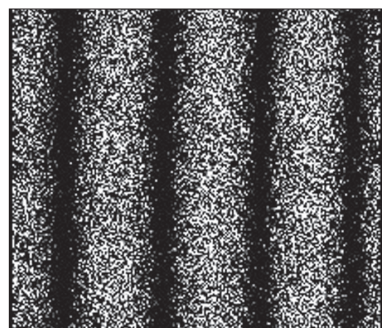


Рис. 2. Голографические схемы:
 а – регистратор закреплен на исследуемом объекте;
 б – регистратор закреплен отдельно от объекта

Fig. 2. The holographic schemes:
 а – with photographic plate fixed together with the studied object;
 б – with photographic plate fixed separately from the studied object



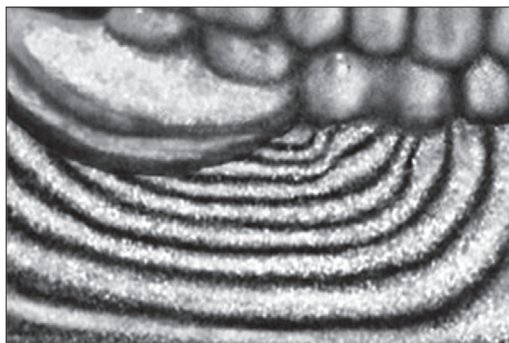
а



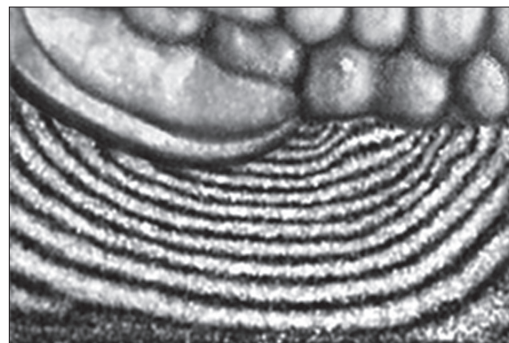
б

Рис. 3. Картина интерференционных полос:
 а – метод голографической интерферометрии;
 б – метод цифровой спекл-фотографии

Fig. 3. Fringe patterns obtained by:
 а – holographic interferometry method;
 б – digital speckle photography method



а



б

Рис. 4. Спекл-интерферограмма малого седловидного протеза:
 а – с жестким креплением;
 б – с полулабильным креплением

Fig. 4. Speckle interferogram of a small saddle prosthesis:
 а – with a rigid denture;
 б – with a semi-fixed denture

те чего усложняется задача идентификации центров полос, которые используются непосредственно при определении перемещений. Задача устранения спекл-шума является одной из основных при автоматизации измерений методами голографической и цифровой спекл-интерферометрии. Распределение интенсивности света в интерференционной картине носит случайный характер, что позволяет предложить следующий алгоритм, ограничивающий влияние спекл-шума на картину интерференционных полос:

- картина интерференционных полос, полученная описанными методами фотоники, с помощью цифровой камеры оцифровывается и вводится в компьютер;
- на картине полос, промодулированных спекл-шумом, выбирается определенное направле-

ние и осуществляется сканирование интерференционной картины;

- параллельно выбранному исходному сечению производится сканирование интенсивности в нескольких сечениях, расстояние между которыми превышает средний размер спекла;
- распределения интенсивностей, полученные по этим сечениям, усредняются, в результате спекл-шум устраняется и представляется возможным определить центры интерференционных полос.

В результате этот алгоритм обработки позволяет описать перемещения при исследовании деформирования костной ткани челюсти при вкручивании в него импланта.

В наших экспериментах использовался аргоновый лазер, позволяющий при мощности непрерывного

излучения около 100 мВт и временной когерентности порядка 10 см, реализовывать чувствительность измерений до 0,2 мкм. В настоящее время разработаны полупроводниковые лазеры, имеющие такие же мощностные и когерентные параметры, что открывает возможность получения аналогичных медицинских результатов при использовании более компактной и дешевой аппаратуры. В качестве приемников излучения использовались стандартные видеокамеры.

Экспериментальные исследования были проведены на мини-имплантах диаметром 1,8 мм цилиндрической и конической формы, изготовленных из титана. Длина мини-имплантов выбиралась исходя из размеров подбородочного отдела нижней челюсти и равнялась 10 мм для монокортикальной фиксации.

Результаты и обсуждение

Следующие иллюстрации демонстрируют вид результирующих интерферограмм для конкретных медицинских ситуаций.

На рис. 4 изображены спекл-интерферограммы, полученные при исследовании характера и степени деформирования кости нижней челюсти под малым седловидным протезом с жесткой (рис. 4а) или полулабильной (рис. 4б) фиксацией. Исследованы несколько вариантов клинических ситуаций, в том числе, при различном состоянии парадонта опорных зубов, при различном состоянии податливости слизистой оболочки протезного ложа, при различных типах альвеолярного гребня.

На рис. 5. изображена спекл-фотография исследования пластиночных зубных протезов на предмет выявления микротрещин. Сравнительный эксперимент позволил выявить достоинства и недостатки двух конструкций протеза, а также сформулировать показания к их применению и разработать оригинальную

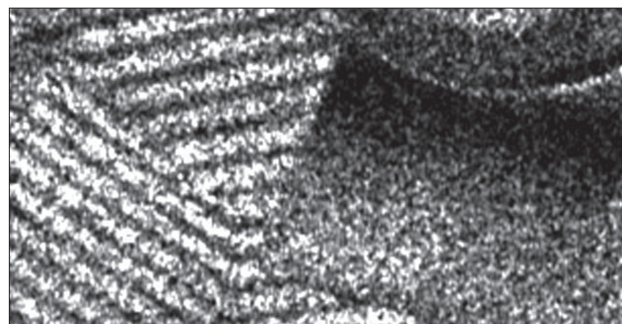


Рис. 5. Спекл-интерферограмма обнаружения трещин в пластиночном протезе

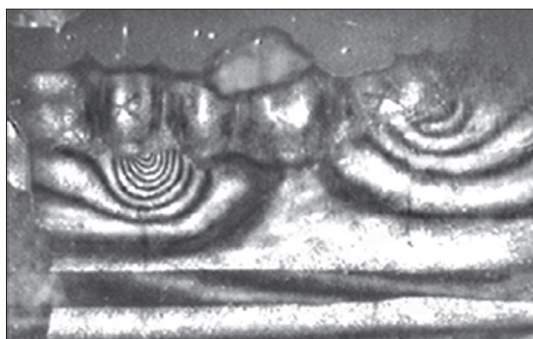
Fig. 5. Speckle interferogram detection of cracks in the plate prosthesis

методику для оценки срока службы пластиночных протезов.

Далее приведены интерферограммы, полученные при исследовании методом голографической интерферометрии характера и степени деформирования кости нижней челюсти под мостовидным зубным протезом с жесткой (рис. 6а) и шарнирной фиксацией (рис. 6б). Сравнительный эксперимент позволил выявить достоинства и недостатки двух конструкций протеза.

При изучении релаксации деформаций при установке в костную ткань мини-имплантов регистрировались двухэкспозиционные голограммы [5] костной ткани с одинаковым интервалом времени между экспозициями (рис. 7). Эти результаты показывают, что предпочтительными оказываются мини-импланты цилиндрической формы.

Общая картина деформирования костной ткани при установке мини-импланта получается в результате суммирования результатов измерения деформаций. Полу-



а



б

Рис. 6. Голографическая интерферограмма мостовидного протеза:

а – с жестким креплением;
 б – с шарнирным креплением

Fig. 6. Holographic interferogram of a bridge:

а – with a rigid denture;
 б – with a hinged denture

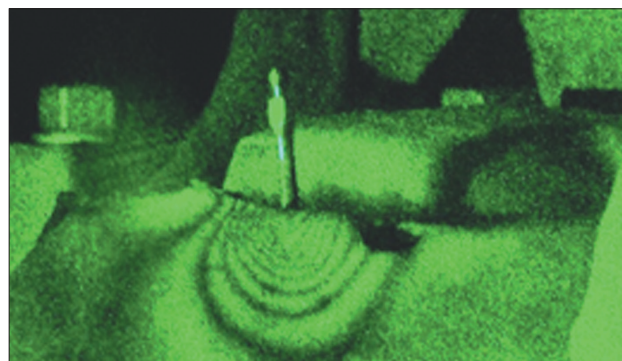


Рис. 7. Интерферограммы, характеризующие релаксацию деформаций костной ткани, интервал между экспозициями – 2 мин
Fig. 7. Interferograms characterizing the relaxation of bone tissue deformations, the interval between exposures is 2 min

ченные интерферограммы показывают, что на всех этапах установки цилиндрического мини-импланта максимальная деформация наблюдается в области вершины и распространяется по поверхности челюсти. При этом на начальном этапе установки деформация незначительна, а на остальных этапах наблюдается последовательное увеличение деформации. При установке конического мини-импланта максимальная деформация на всех этапах его установки наблюдается на вершине альвеолярного гребня, что связано с его конусообразной формой.

Характерная зависимость величины деформирования костной ткани в вершине кости от глубины вкручивания подтверждает сделанный на основании качественного анализа картины интерференционных полос вывод о том, что зона деформаций распространяется по костной ткани по мере углубления импланта.

Заключение

Полученные результаты обосновывают возможность и целесообразность применения методов лазерной фотоники в ортопедической стоматологии

для неинвазивного бесконтактного исследования объемных микродеформаций костной ткани. Приведенные в статье примеры исследований позволяют дать некоторые практические рекомендации.

При установке цилиндрического мини-импланта деформация костной ткани на вершине альвеолярного гребня возникает только при первых оборотах. При установке конического мини-импланта деформация костной ткани возникает на вершине альвеолярного гребня и действует на протяжении всего процесса погружения. Это может привести к расщеплению костной ткани и, как осложнение, к трещине или перелому кости. Процесс релаксации костной ткани идет быстрее в случае цилиндрического мини-импланта. Полученные результаты дают основание утверждать, что установка мини-имплантов цилиндрической формы является более предпочтительной.

Полученные результаты обосновывают возможность и целесообразность применения методов лазерной фотоники в ортопедической стоматологии для неинвазивного бесконтактного исследования объемных микродеформаций костной ткани.

ЛИТЕРАТУРА

1. Von Bally G. *Holography in Medicine and Biology*. – Berlin: Springer-Verlag, 1979. – P. 240–265.
2. Ostrovsky Yu.I., Shchepinov V.P., Yakovlev V.V. *Holographic Interferometry in Experimental Mechanics*. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1991. – P. 182–320.
3. Goodman J.W. *Speckle Phenomena in Optics: theory and applications*. – Englewood: Roberts and Company Publishers, 2007. – P. 162–248.
4. Ларкин А.И., Юу Ф.Т.С. Когерентная фотоника. – М.: Бином, Лаборатория знаний, 2007. – P. 182–320.
5. Grosman M.A., Kyrushin M.A., Larkin A.I., Lebedenko A.I., Lebedenko I.Yu., Lopatina N.A., Osincev A.V., Shchepinov V.P., Shchepinova I.V. Application of laser photonics for denture design optimization // *Laser Phys.* – 2010. – No. 6. – P. 1–5.

REFERENCES

1. Von Bally G. *Holography in Medicine and Biology*. Berlin, Springer-Verlag Publ., 1979. pp. 240–265.
2. Ostrovsky Yu.I., Shchepinov V.P., Yakovlev V.V. *Holographic Interferometry in Experimental Mechanics*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag Publ., 1991. pp. 182–320.
3. Goodman J.W. *Speckle Phenomena in Optics: theory and applications*. Englewood, Roberts and Company Publishers, 2007. pp. 162–248.
4. Larkin A.I., Yuu F.T.S. *Kogerentnaja fotonika* [Coherent Photonics]. Moscow, BINOM, Laboratoriya znaniy Publ. 2007. pp. 182–320.
5. Grosman M.A., Kyrushin M.A., Larkin A.I., Lebedenko A.I., Lebedenko I.Yu., Lopatina N.A., Osincev A.V., Shchepinov V.P., Shchepinova I.V. Application of laser photonics for denture design optimization, *Laser Phys.*, 2010, No. 6, pp. 1–5.