

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСТИНЪЕКЦИОННОГО ЭПИДЕРМИСА
МОДИФИЦИРОВАННЫМ ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ МАЙКЕЛЬСОНА—ФИЗО**

А. В. АРЕФЬЕВ¹, В. В. КУРЛОВ², В. Б. КОЦКОВИЧ², Е. Е. МАЙОРОВ^{2*},
В. П. ПУШКИНА², С. В. УДАХИНА²

¹ Университет при Межпарламентской ассамблее ЕвразЭС,
Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия
majorov_ee@mail.ru

Аннотация. Модифицированным интерферометром Майкельсона—Физо исследован *in vivo* кожный покров пациентов до и после косметологических процедур. Показана актуальность работы, так как получение достоверных данных о геометрических параметрах поверхности кожи, ее состоянии важно для каждого человека. В качестве объекта исследования *in vivo* выбран рельеф поверхности кожи вокруг глаз у пациентов в возрасте 38—45 лет. Приведены оптическая и функциональная схемы измерительной системы, а также даны технико-эксплуатационные характеристики. Получены экспериментальные результаты для 10 пациентов. Выявлено, что после применения ботулотоксина кожа становится более гладкой и эластичной, практически отсутствует вариация высоты рельефа.

Ключевые слова: интерферометр, эпидермис, оптическая схема, длина когерентности, ботулотоксин, инъекция

Ссылка для цитирования: Арефьев А. В., Курлов В. В., Коцкович В. Б., Майоров Е. Е., Пушкина В. П., Удахина С. В. Исследование постинъекционного эпидермиса модифицированным интерферометром Майкельсона—Физо // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 4. С. 295—302. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-4-295-302.

**EXAMINATION OF THE POST-INJECTION EPIDERMIS WITH A MODIFIED
MICHELSON-FIZEAU INTERFEROMETER**

A. V. Arefiev¹, B. B. Kurlov², V. B. Kotskovich², E. E. Maiorov^{2*},
V. P. Pushkina², S. V. Udakhina²

¹ University under the Inter-Parliamentary Assembly of EurAsEC,
St. Petersburg, Russia

² St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, Russia
majorov_ee@mail.ru

Abstract. The skin of patients before and after cosmetic procedures is studied *in vivo* with a modified Michelson-Fizeau interferometer. The relevance of the work is shown, since obtaining reliable data on the geometric parameters of the skin surface, its condition is important for every person. The surface relief of the skin around the eyes in patients aged 38—45 years is chosen as the object of the *in vivo* study. Optical and functional diagrams of the measuring system are given, as well as technical and operational characteristics. Experimental results are obtained for 10 patients. It is revealed that after the application of botulinum toxin, the skin becomes smoother and more elastic, there is practically no variation in the height of the relief.

Keywords: interferometer, human skin, optical diagram, coherence length, botulinum toxin, injection

For citation: Arefiev A. V., Kurlov B. B., Kotskovich V. B., Maiorov E. E., Pushkina V. P., Udakhina S. V. Examination of the post-injection epidermis with a modified Michelson-Fizeau interferometer. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 4. P. 295—302 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-4-295-302.

Введение. На сегодняшний день получение качественного эффекта является важнейшей задачей эстетической медицины [1, 2]. Исследование *in vivo* поверхности кожи опико-электронными методами и средствами актуально и перспективно для косметологии. Получение достоверных данных о геометрических параметрах поверхности кожи всегда интересовало дерматологов и косметологов [3, 4]. Существует большой спектр контактных и бесконтактных приборов и систем для измерения рельефа эпидермиса. Контактные приборы и системы позволяют измерять рельеф поверхности кожи с погрешностью до 0,1 мкм. Ограничение возможности их применения продиктовано низкой производительностью, требованием высокого уровня виброзащиты, а также быстрым выходом из строя зондирующего элемента [5, 6].

Бесконтактные системы, к которым относятся опико-электронные приборы и комплексы, исключают указанные недостатки. Работа этих приборов и систем основана на сборе и обработке световых сигналов, отраженных от исследуемой поверхности. Наиболее перспективными в этом классе приборов являются интерферометрические, в частности, модифицированные системы с источником излучения, ограниченным временной когерентностью [7, 8]. Это новое в оптике направление активно развивается в последние годы.

Врачи-косметологи с помощью химических препаратов (ботулотоксина) разглаживают морщины, восстанавливая поверхность кожи и обеспечивая максимальный эстетический эффект [9, 10]. Инъекционное введение ботулотоксина через определенное время (несколько суток) устраняет выраженность морщин и улучшает тонус и текстуру кожи. В эстетической косметологии используется комплексная коррекция инволюционного изменения кожи для каждого пациента в отдельности. Индивидуальный подход позволяет подобрать оптимальные пути решения проблем [11, 12].

Поэтому целью работы явилось исследование *in vivo* модифицированным интерферометром Майкельсона—Физо эпидермиса пациентов до и после косметологических процедур.

Метод и объекты исследования. В работе исследовался рельеф поверхности кожи вокруг глаз у пациентов в возрасте 38—45 лет до и после косметологических процедур. Все пациенты имели белый оттенок кожи и проживали в Санкт-Петербурге.

При косметологических процедурах пациентам вводился ботулотоксин [13, 14]. Измерения поверхности кожи были проведены модифицированным интерферометром Майкельсона—Физо через семь суток после процедуры.

Исследование микрорельефа биологических объектов без применения инъекций и с их применением проводилось разработанным модифицированным интерферометром Майкельсона—Физо, оптическая схема которого представлена на рис. 1 (*a* — блок, состоящий из интерферометра Майкельсона: *S* — источник излучения, 1, 5, 7 — объективы, 2 — светоделитель, 3 — контролируемая поверхность, 4 — опорное зеркало, 6 — диафрагма, 8 — камера, Gl — стеклянная пластина, P_0 — P_1 — изменение рельефа; *b* — интерферометр Физо: *P* — поверхность биологического объекта).

В качестве источника излучения использовался диод белого света с длиной когерентности $l_c \approx 2$ —3 мкм. Система построена на основе интерферометра Майкельсона, в котором одно из зеркал заменено стеклянной пластинкой и контролируемым объектом. Изображения плоскостей опорного зеркала *R* и объекта Gl проецируются в цифровую камеру. Камера сфокусирована на плоскость Gl. Плоскости *R* и Gl находятся на одинаковом расстоянии от источника *S*.

Поскольку интерференционное поле имеет вид картины спеклов, фаза которых меняется случайным образом, расчет фазовых характеристик теряет смысл. Поэтому вместо изменения фазы регистрируется лишь факт появления интерференционной картины [15, 16]. Вследствие малой длины когерентности интерференция проявляется только для тех элементов поверхности объекта, которые близки к плоскости Gl. Эта область изображения детектируется и запоминается в процессе перемещения объекта вдоль оси *Z*.

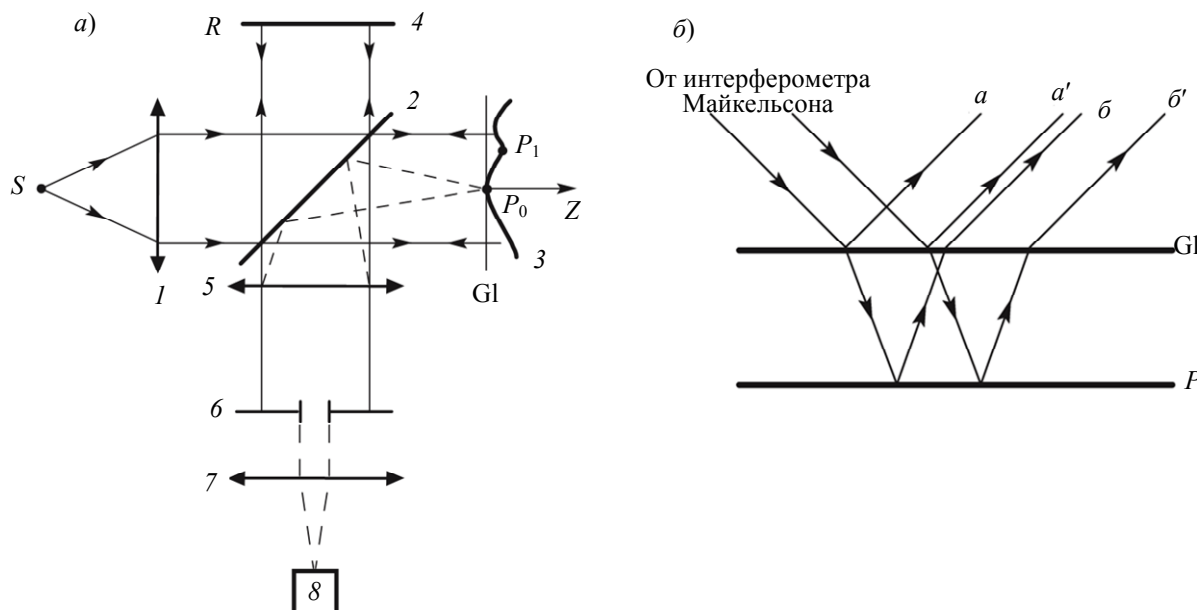


Рис. 1

Итак, в работе рассмотрена возможность использования разработанного интерферометра для контроля качества поверхности. Используется методика измерения толщины воздушного зазора между контролируемой биологической поверхностью и поверхностью стеклянной пластинки по схеме интерферометра Физо [17, 18].

Разработанный интерферометр исключает флуктуацию показателя преломления и неконтролируемые смещения относительно измеряемой поверхности. Часть излучения из двух каналов интерферометра Майкельсона направляется в виде двух потоков излучения с определенной оптической разностью хода к измеряемому воздушному зазору, образующему интерферометр Физо. В результате смещения в интерферометре Майкельсона появляется максимум контраста результирующих интерференционных полос, что соответствует толщине контролируемого зазора. Световые потоки из двух каналов интерферометра Майкельсона объединяются на светоделителе и направляются к измеряемому воздушному зазору — интерферометру Физо. Отраженные от передней и задней поверхностей воздушного зазора лучи могут интерферировать лишь в малой области разностей оптических путей, определяемой длиной когерентности источника излучения. Поэтому максимальный контраст интерференционного поля, регистрируемый цифровой камерой, будет достигнут при равенстве длин оптических путей двух отраженных световых волн.

При отражении двух лучей от границ воздушного промежутка (рис. 1, б) образуются лучи света a , a' , b , b' , отраженные от измеряемой поверхности и от опорной поверхности стеклянной пластины. Интерферируя попарно между собой, они образуют сложную интерференционную картину. Как только оси световых лучей a' и b совпадут, оптическая разность их хода станет равной нулю и будет сформирован интерференционный сигнал при ограниченной когерентности освещения.

Измерительная система состоит из двух блоков, один из которых является интерферометром Майкельсона, а второй — интерферометром Физо. В системе нулевая разность хода регистрируется по критерию максимума корреляции интерференционных сигналов. В процессе обработки сигналов используется метод вычитания фоновой составляющей на основе модифицированного метода управляемого фазового сдвига.

Технико-эксплуатационные характеристики измерительной системы:

- погрешность измерений $\sigma_z = 0,03—0,1l_c$ для $\theta = 0—30^\circ$;
- диапазон измерений рельефа поверхности 0—4 мм;
- частота измерений 46 точек в секунду;

- расстояние от оптического зрачка до поверхности 120 мм;
- габаритные размеры 250×250×180 мм.

Экспериментальные результаты. Функциональная схема исследования *in vivo* микро-рельефа поверхности кожи представлена на рис. 2 (1, 11 — диоды белого света, 2 — микро-объектив, 3 — светоделитель, 4 — объект; 5, 7, 8 — зеркала; 6, 12 — фотоприемные устройства, 9 — модулятор, 10 — дифракционные решетки, 13 — датчик скорости, 14 — блок электронной обработки сигналов, 15 — плоскопараллельная пластина, РС — компьютер, M_1-O_1 — длина опорного плеча).

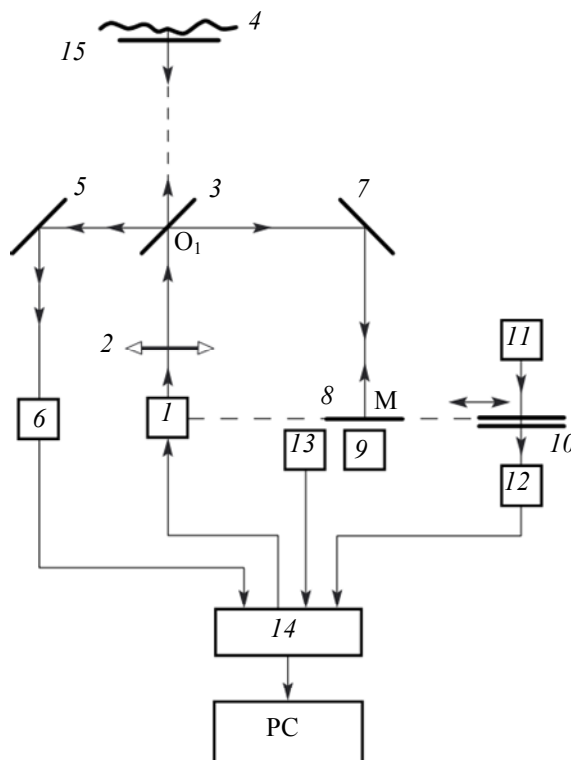
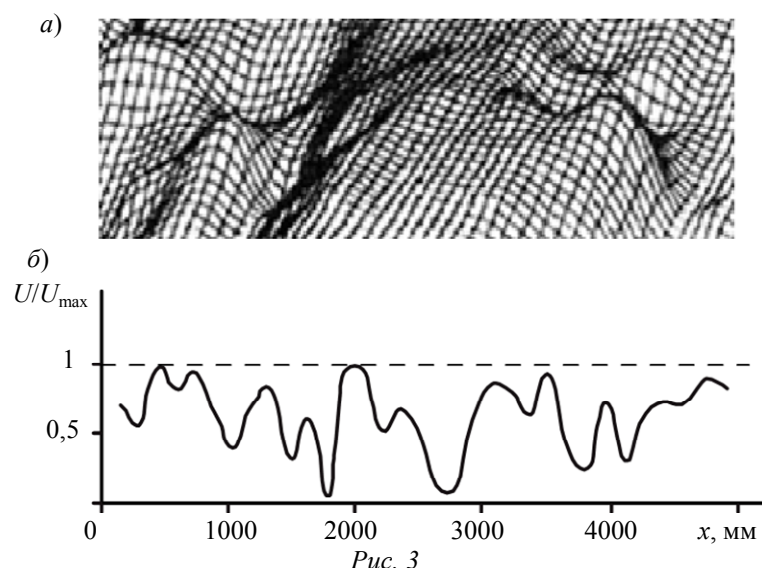


Рис. 2

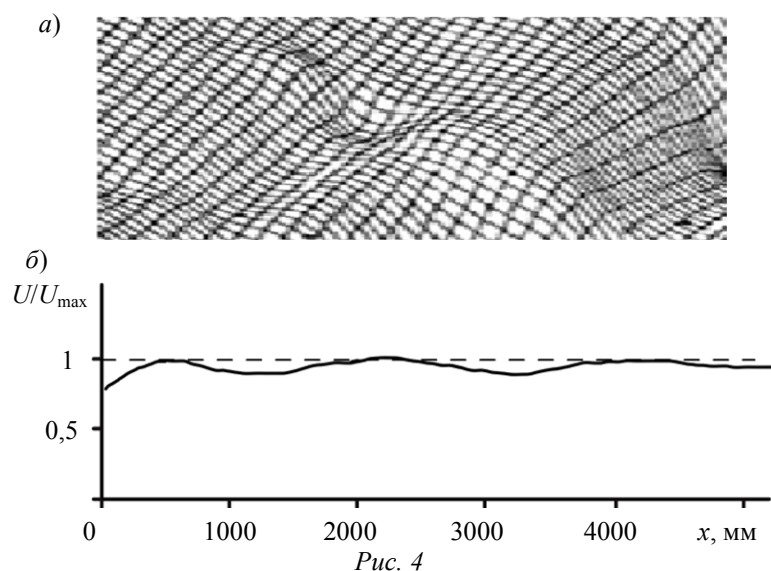
При динамических исследованиях, к которым относятся измерения *in vivo*, необходимо обеспечить независимость результатов от возможных смещений контролируемой поверхности за время сканирования. Проще всего это осуществить, если в качестве базовой плоскости отсчета использовать плоскопараллельную пластину, которая жестко прикреплена к контролируемой поверхности. В этом случае измеряемой величиной является зазор между двумя указанными поверхностями.

В эксперименте площадь анализируемого участка поверхности кожи равна 4×8 мм. Измерения производились поточно с частотой 46 Гц. Для обеспечения съема информации с такого участка было изготовлено специальное устройство механического сканирования измерительной головки: линейно — по одной координате, по синусоидальному закону — по другой. Для графической визуализации результатов измерений была разработана программа Special InterferometerR.

На рис. 3 приведены результаты экспериментального исследования *in vivo* рельефа до проведения косметологических процедур у 10 пациентов в возрасте 38—45 лет. На рис. 3, а представлен обработанный программой Special InterferometerR фрагмент поверхности кожи вокруг глаз до инъекции. На рис. 3, б показано изменение амплитуды сигнала при перемещении зондирующего пятна по поверхности кожи до косметологических процедур.



На рис. 4, *а* показан фрагмент эпидермиса после введения ботулотоксина. На рис. 4, *б* приведена зависимость амплитуды сигнала при контроле места инъекции.



Проведя сравнительный анализ графических зависимостей, можно сделать следующий вывод: ботулотоксин изменяет геометрические параметры поверхности кожи. Кожа становится более гладкой, и вариация высоты рельефа не наблюдается, то есть морщины „расправляются“.

Заключение. Проведенные исследования представляют значимый интерес как для дерматологии, косметологии, так и для оптического приборостроения. Данные по микрорельефу поверхности биологического объекта могут быть полезны при разработке методов и средств для корректирования инволюционных проявлений старения кожи. Результаты работы целесообразно применять для сравнительного анализа *in vivo* при использовании других взаимодополняемых техник на эпидермисе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tordjman M. Rajeunissement cutane du decollete par mesotherapie // J. Med. Esth. Chir. Dermatol. 2003. Vol. 118. P. 111—118.

2. Baumann L. Cosmetic Dermatology: principles and practice. Medpress-inform, 2013. P. 288—325 [Электронный ресурс]: <<https://online.fliphtml5.com/xzqr/jtph/#p=1>>.
3. Бакина Е. В. Современные методы омоложения в эстетической косметологии // Междунар. науч.-исслед. журн. 2016. № 4(46). С. 74—76. DOI: 10.18454/IRJ.2016.46.225.
4. Antoniou C., Kosmadaki M. G., Stratiges A. J., Katsambas A. D. Photoaging: prevention and topical treatments // Am. J. Clin. Dermatol. 2010. Vol. 11. P. 95—102.
5. Майоров Е. Е., Черняк Т. А., Цыганкова Г. А., Машек А. Ч., Константинова А. А. Разработка оптической системы обработки голографических интерферограмм // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2020. № 7. С. 25—32. DOI: 10.25791/pribor.07.2020.1190.
6. Курлов В. В., Коцкович В. Б., Майоров Е. Е., Пушкина В. П., Таюрская И. С. Экспериментальное исследование разработанной интерференционной системы для измерений поверхности объектов сложной формы // Изв. Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2020. № 8. С. 179—189.
7. Арефьев А. В., Бородинский Ю. М., Гулиев Р. Б., Дагаев А. В., Майоров Е. Е., Хохлова М. В. Измерение микрорельефа негладких поверхностей автоматизированным интерферометром в низкокогерентном свете // Изв. Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2020. № 8. С. 211—219.
8. Цыганкова Г. А., Майоров Е. Е., Черняк Т. А., Константинова А. А., Машек А. Ч., Писарева Е. А. Исследование разработанного интерферометра поперечного сдвига для настройки интерференционных полос при обработке интерферограмм // Приборы. 2021. № 2. С. 20—25.
9. Шарова А. А., Чайковская Е. А. Распространение, диффузия, диссоциация ботулотоксинов: есть ли предмет для споров? // Инъекционные методы в косметологии. 2013. № 1. С. 46—54.
10. Fournier N., Kerscher M., Ruiz-Avila J. The convergence of medicine and neurotoxins: a focus on botulinum toxin type A and its application in aesthetic medicine—a global, evidence-based botulinum toxin consensus education initiative: part II: incorporating botulinum toxin into aesthetic clinical practice // Dermatol. Surg. 2013. Vol. 39, N 3. Pt. 2. P. 510—525.
11. Машек А. Ч., Цыганкова Г. А., Константинова А. А., Майоров Е. Е., Писарева Е. А., Громов О. В. Расчет основных параметров оптико-электронной системы наблюдения и изучения интерференционных структур на голограммах // Изв. Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2021. № 2. С. 184—192.
12. Майоров Е. Е., Громов О. В., Курлов В. В., Коцкович В. Б., Петрова Е. А., Пушкина В. П., Таюрская И. С. Исследование рельефа поверхности биологических объектов методом контроля, анализирующим расходимость // Изв. Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2021. № 2. С. 383—388.
13. Lin K. H., Chen S. P., Fuh J. L. Efficacy, safety, and predictors of response to botulinum toxin type A in refractory chronic migraine: a retrospective study // J. Chin. Med. Assoc. 2014. Vol. 77, N 1. P. 10—15.
14. Uyesugi B., Lippincott B., Dave S. Treatment of apainful keloid with botulinum toxin type A // Am. J. Phys. Med. Rehabil. 2010. Vol. 89, N 2. P. 153—155.
15. Громов О. В., Майоров Е. Е., Черняк Т. А., Удахина С. В., Писарева Е. А., Константинова А. А. Измерения оптических свойств кожного покрова *in vivo* под воздействием современных увлажняющих средств // Междунар. науч.-исслед. журн. 2021. № 3(105). С. 38—43. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.105.3.006>.
16. Хохлова М. В., Арефьев А. В., Майоров Е. Е., Гулиев Р. Б., Дагаев А. В., Громов О. В. Экспериментальное исследование метрологических характеристик разработанного оптического щупа триггерного типа // Приборы. 2021. № 5. С. 8—16.
17. Хохлова М. В., Дагаев А. В., Майоров Е. Е., Арефьев А. В., Гулиев Р. Б., Громов О. В. Исследование оптико-электронной системы при обработке голографических пластин // Междунар. науч.-исслед. журн. 2021. № 8(110). С. 103—108. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.110.8.015>.
18. Хохлова М. В., Пушкина В. П., Коцкович В. Б., Майоров Е. Е., Гулиев Р. Б. Исследование биологических объектов методом геометрической оптики // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 8. С. 667—673. DOI 10.17586/0021-3454-2021-64-8-667-673.

Сведения об авторах

Александр Владимирович Арефьев

— канд физ.-мат. наук, доцент; Университет при Межпарламентской ассамблее ЕврАзЭС, кафедра математики и информационных технологий; E-mail: aaref@yandex.ru

- Виктор Валентинович Курлов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра инноватики и интегрированных систем качества; E-mail: vitek543@rambler.ru
- Владимир Богданович Коцкович** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра высшей математики и механики; E-mail: kotskovich_vb@mail.ru
- Евгений Евгеньевич Майоров** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра прикладной математики; E-mail: majorov_ee@mail.ru
- Вера Павловна Пушкина** — канд. экон. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра высшей математики и механики; E-mail: vera150465@yandex.ru
- Светлана Вячеславовна Удахина** — канд. эконом. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра прикладной математики; E-mail: udahina@mail.ru

Поступила в редакцию 15.12.21; одобрена после рецензирования 23.12.21; принята к публикации 28.02.22.

REFERENCES

1. Tordjman M. *J. Med. Esth. Chir. Dermatol.*, 2003, vol. 118, pp. 111–118.
2. Baumann L. *Medpress-inform.*, 2013, pp. 288–325, <https://online.fliphtml5.com/xzqr/jtph/#p=1>.
3. Bakina E.V. *Meždunarodnyj naučno-issledovatel'skij žurnal* (International Research Journal), 2016, no. 4(46), pp. 74–76, DOI: 10.18454/IRJ.2016.46.225. (in Russ.)
4. Antoniou C., Kosmadaki M.G., Stratiges A.J., Katsambas A.D. *Am. J. Clin. Dermatol.*, 2010, vol. 11, pp. 95–102.
5. Majorov E.E., Chernyak T.A., Tsygankova G.A., Mashek A.Ch., Konstantinova A.A. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2020, no. 7, pp. 25–32, DOI: 10.25791/pribor.07.2020.1190. (in Russ.)
6. Kurlov V.V., Kotskovich V.B., Majorov E.E., Pushkina V.P., Tayurskaya I.S. *News of the Tula State University. Technical sciences*, 2020, no. 8, pp. 179–189. (in Russ.)
7. Arefiev A.V., Borodyansky Yu.M., Guliev R.B., Dagaev A.V., Majorov E.E., Khokhlova M.V. *News of the Tula State University. Technical sciences*, 2020, no. 8, pp. 211–219. (in Russ.)
8. Tsygankova G.A., Majorov E.E., Chernyak T.A., Konstantinova A.A., Mashek A.Ch., Pisareva E.A. *Pribory*, 2021, no. 2, pp. 20–25. (in Russ.)
9. Sharova A.A., Chaykovskaya E.A. *In'yektsionnyye metody v kosmetologii*, 2013, no. 1, pp. 46–54. (in Russ.)
10. Fournier N., Kersch M., Ruiz-Avila J. *Dermatol. Surg.*, 2013, no. 3(39), pp. 510–525.
11. Mashek A.Ch., Tsygankova G.A., Konstantinova A.A., Mayorov E.E., Pisareva E.A., Gromov O.V. *News of the Tula State University. Technical sciences*, 2021, no. 2, pp. 184–192. (in Russ.)
12. Majorov E.E., Gromov O.V., Kurlov V.V., Kotskovich V.B., Petrova E.A., Pushkina V.P., Tayurskaya I.S. *News of the Tula State University. Technical sciences*, 2021, no. 2, pp. 383–388. (in Russ.)
13. Lin K.H. Chen S.P., Fuh J.L. *J. Chin. Med. Assoc.*, 2014, no. 1(77), pp. 10–15.
14. Uyesugi B., Lippincott B., Dave S. *Am. J. Phys. Med. Rehabil.*, 2010, no. 2(89), pp. 153–155.
15. Gromov O.V., Mayorov E.E., Chernyak T.A., Udakhina S.V., Pisareva E.A., Konstantinova A.A. *Meždunarodnyj naučno-issledovatel'skij žurnal* (International Research Journal), 2021, no. 3(105), pp. 38–43, DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.105.3.006>. (in Russ.)
16. Khokhlova M.V., Arefiev A.V., Majorov E.E., Guliev R.B., Dagaev A.V., Gromov O.V. *Pribory*, 2021, no. 5, pp. 8–16. (in Russ.)
17. Khokhlova M.V., Dagaev A.V., Mayorov E.E., Arefiev A.V., Guliev R.B., Gromov O.V. *Meždunarodnyj naučno-issledovatel'skij žurnal* (International Research Journal), 2021, no. 8(110), pp. 103–108, DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.110.8.015> (in Russ.)
18. Khokhlova M.V., Pushkina V.P., Kotskovich V.B., Majorov E.E., Guliev R.B., Arefiev A.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, no. 8(64), pp. 667–673, DOI 10.17586/0021-3454-2021-64-8-667-673. (in Russ.)

Data on authors

- Alexander V. Arefiev** — PhD, Associate Professor; University under the Inter-Parliamentary Assembly of EurAsEC, Department of Mathematics and Information Technologies; E-mail: aaref@yandex.ru
- Viktor V. Kurlov** — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Innovation and Integrated Quality Systems; E-mail: vitek543@rambler.ru
- Vladimir B. Kotskovich** — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Higher Mathematics and Mechanics; E-mail: kotskovich_vb@mail.ru

- | | | |
|-----------------------------|---|---|
| Evgeny E. Maigorov | — | PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Mathematics; E-mail: majorov_ee@mail.ru |
| Vera P. Pushkina | — | PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Higher Mathematics and Mechanics;
E-mail: vera150465@yandex.ru |
| Svetlana V. Udakhina | — | PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Mathematics; E-mail: udakhina@mail.ru |

Received 15.12.21; approved after reviewing 23.12.21; accepted for publication 28.02.22.