Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского»

ИЗВЕСТИЯ САРАТОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
Новая серия

Серия Физика, выпуск 2

Продолжение «Известий Императорского Николаевского Университета» 1910–1918, «Ученых записок СГУ» 1923–1962, «Известий Саратовского университета. Новая серия» 2001–2004

Научный журнал
2020 Том 20
ISSN 1817-3020 (Print)
ISSN 2542-193X (Online)
Издается с 2005 года

СОДЕРЖАНИЕ

Научный отдел

Оптика и спектроскопия. Лазерная физика

Скрипаль Ан. В., Добдин С. Ю., Джафаров А. В., Садчикова К. А., Феклистов В. Б. Измерение расстояния при гармонической модуляции длины волны лазерного автодина с учетом внешней оптической обратной связи 84

Биофизика и медицинская физика

Зюрюкина О. А., Синичкин Ю. П. Дегидратация биотканей в процессе их компрессии 92

Сагайдачный А. А., Майсков Д. И., Залетов И. С., Фомин А. В., Скрипаль Ан. В. Детектирование активности единичных потовых желез методом макротермографии и ее взаимосвязь с температурой кожи и периферической гемодинамикой 103

Ermakov A. V., Lengert E. V., Venig S. B. Nanomedicine and Drug Delivery Strategies for Theranostics Applications [*Ермаков А. В., Ленгерт Е. В., Вениг С. Б.* Стратегии в области наномедицины и доставки лекарств для применения в тераностике] 116

Скрипаль Ан. В., Бахметьев А. С., Брилёнок Н. Б., Добдин С. Ю., Сагайдачный А. А., Баатыров Р. Т., Усанов А. Д., Тихонова А. С. Индекс отражения пульсовой волны у юных спортсменов 125

Твердотельная электроника, микро- и наноэлектроника

Яфаров Р. К., Шабунин Н. О., Шаныгин В. Я., Захаревич А. М. Наноуглеродные композиты для безнакальных магнетронов СВЧ и субтерагерцового диапазонов 134

Приложения

Из истории физики

Аникин В. М. Профессор астрономии Саратовского университета Иосиф Фёдорович Полак (1881–1954) 144

Журнал «Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия “Физика”» зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.
Запись о регистрации СМИ ПИ № ФС77-76653 от 26 августа 2019 г.

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (специальности: 01.04.02; 01.04.03; 01.04.04; 01.04.05; 01.04.10; 01.04.15; 01.04.16; 01.04.21; 03.01.02; 05.27.01).
Журнал входит в Международную базу данных Scopus

Индекс издания в объединенном каталоге «Пресса России» 36015, раздел 30 «Научно-технические издания. Известия РАН. Известия вузов».
Журнал выходит 4 раза в год

Директор издательства
Бучко Ирина Юрьевна

Редактор
Батищева Татьяна Федоровна

Художник
Соколов Дмитрий Валерьевич

Редактор-стилист
Кочкаева Инна Анатольевна

Верстка
Ковалева Наталья Владимировна

Технический редактор
Каргин Игорь Анатольевич

Корректор
Кочкаева Инна Анатольевна

Адрес учредителя, издателя и издательства (редакции):
410012, Саратов, ул. Астраханская, 83
Тел.: (845-2) 51-45-49, 52-26-89
E-mail: izvestiya@info.sgu.ru

Подписано в печать 25.05.2020.
Подписано в свет 01.06.2020.
Формат 60×84 1/8.
Усл. печ. л. 9.30 (10.0).
Тираж 500 экз. Заказ 39-Т.
Цена свободная

Отпечатано в типографии Саратовского университета.
Адрес типографии:
410012, Саратов, Б. Казачья, 112А

© Саратовский университет, 2020

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Журнал публикует на русском и английском языках научные статьи по физике, содержащие новые результаты исследований, статьи учебно-методического характера, содержащие инновационную компоненту, статьи по методологии разделов физической науки, статьи, отражающие хронику научных мероприятий и важных событий в жизни физического сообщества.

Материалы, ранее опубликованные или представленные для публикации в другие журналы, к рассмотрению не принимаются. Рекомендуемый объем статьи – до 25 страниц текста, 5 рисунков и 4 таблицы. На русском языке статья содержит: УДК, заглавие, инициалы и фамилии авторов, название их места работы, электронный адрес авторов, аннотацию (200–250 слов), ключевые слова, текст, благодарности и ссылки на гранты, список литературы.

На английском языке необходимо продублировать: заглавие, инициалы (имя – полностью) и фамилии авторов, структурированную аннотацию (250–600 слов), ключевые слова, список литературы (references). Для каждого автора указать ORCID.

Текст должен быть набран и напечатан через 1,5 интервала на бумаге формата А4 с полями 2,5 см, шрифт Times New Roman, размер шрифта текста – 14.

Текст статьи должен быть подписан всеми авторами.

Журнал публикует краткие сообщения – небольшие по объему статьи, которые имеют безусловную новизну и значимость. Эти статьи публикуются в короткие сроки. Объем краткого сообщения ограничен 10 машинописными страницами (14 кеглем через 1.5 интервала), включая рисунки, таблицы и список литературы. Язык статьи для краткого сообщения – английский.

Структура краткого сообщения на английском языке: заглавие, инициалы (имя – полностью) и фамилии авторов, электронный адрес авторов, аннотация (100–200 слов), ключевые слова, текст, благодарности и ссылки на гранты, список литературы. Для каждого автора нужно указать ORCID. На русском языке необходимо продублировать заглавие, инициалы и фамилии авторов, название их места работы, электронный адрес авторов, аннотацию, ключевые слова, УДК.

Все рукописи, поступившие в редколлегию и соответствующие профилю журнала, проходят рецензирование, а затем редколлегия принимает решение о возможности их опубликования.

Плата за публикацию рукописей не взимается.

Более подробно с правилами для авторов и порядком рецензирования можно ознакомиться на сайте журнала: http://fizika.sgu.ru

Адрес редколлегии серии: 410012, Саратов, ул. Астраханская, 83, СГУ имени Н. Г. Чернышевского, физический факультет

Тел. / факс: +7(845-2) 51-14-30

E-mail: fizika.sgu@bk.ru

Website: http://fizika.sgu.ru

CONTENTS

Scientific Part

Optics and Spectroscopy. Laser Physics

Skripal An. V., Dobdin S. Yu., Dzhafarov A. V., Sadchikova K. A., Feklistov V. B. Distance Measurement with Harmonic Modulation of Self-Mixing Laser Wavelength at External Optical Feedback 84

Biophysics and Medical Physics

Zyuryukina O. A., Sinichkin Yu. P. Dehydration of Biotissues During Their Compression 92

Sagaidachnyi A. A., Mayskov D. I., Zaletov I. S., Fomin A. V., Skripal An. V. Detection of the Single Sweat Glands Activity Via the Macro Thermography Techniques and Its Relation with Skin Temperature and Peripheral Hemodynamics 103

Ermakov A. V., Lengert E. V., Venig S. B. Nanomedicine and Drug Delivery Strategies for Theranostics Applications 116

Skripal An. V., Bakhmetyev A. S., Brilenok N. B., Dobdin S. Yu., Sagaidachnyi A. A., Baatyrov R. T., Usanov A. D., Tikhonova A. S. Reflection Index of the Pulse Wave for Young Athletes 125

Solid-State Electronics, Micro and Nanoelectronics

Yafarov R. K., Shabunin N. O., Shanygin V. Ya., Zakharevich A. M. Nanocarbon Composites for Non-Incandescent Microwave Magnetrons and Subterahertz Ranges 134

Appendices

From the History of Physics

Anikin V. M. Professor of Astronomy of Saratov State University Joseph Fedorovich Polak (1881–1954) 144

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА «ИЗВЕСТИЯ САРАТОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. НОВАЯ СЕРИЯ. СЕРИЯ: ФИЗИКА»

Главный редактор
Короновский Алексей Александрович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)
Заместители главного редактора
Анищенко Вадим Семенович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)
Тучин Валерий Викторович, доктор физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН (Саратов, Россия)
Ответственный секретарь
Скрипаль Анатолий Владимирович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Члены редакционной коллегии:

Аникин Валерий Михайлович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)
Бабков Лев Михайлович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)
Вадивасова Татьяна Евгеньевна, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)
Вениг Сергей Борисович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)
Виницкий Сергей Ильич, доктор физ.-мат. наук, профессор (Дубна, Россия)
Горохов Александр Викторович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Самара, Россия)
Грибов Лев Александрович, доктор физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН (Москва, Россия)
Давидович Михаил Владимирович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)
Дюбуа Арно, PhD, профессор Университета Париж-Сакле (Сент-Обен, Франция)
Кузнецов Сергей Петрович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)
Малышев Сергей Александрович, доктор физ.-мат. наук (Минск, Беларусь)
Мельников Леонид Аркадьевич, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)
Модельский Иосиф, PhD, профессор Варшавского Технологического университета (Варшава, Польша)
Нефёдов Игорь Сергеевич, доктор физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник Университета Аалто (Хельсинки, Финляндия)
Никитов Сергей Аполлонович, доктор физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН (Москва, Россия)
Пирогов Юрий Андреевич, доктор физ.-мат. наук, профессор (Москва, Россия)
Сербино Роберто, PhD, профессор Миланского университета (Милан, Италия)
Скрипаль Александр Владимирович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)
Сухоруков Глеб Борисович, кандидат физ.-мат. наук, профессор Университета Королевы Марии (Лондон, Великобритания)
Трубецков Дмитрий Иванович, доктор физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН (Саратов, Россия)
Филимонов Юрий Александрович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)
Хлебцов Николай Григорьевич, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)
Чигринов Владимир Григорьевич, доктор физ.-мат. наук, профессор Гонг Конгского университета науки и технологии (Гонг Конг, Китай)
Шараевский Юрий Павлович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)
Шиманский-Гайер Лутц, PhD, профессор Гумбольдтского университета (Берлин, Германия)

EDITORIAL BOARD OF THE JOURNAL «IZVESTIYA OF SARATOV UNIVERSITY. NEW SERIES. SERIES: PHYSICS»

Editor-in-Chief – Aleksey A. Koronovskii (Saratov, Russia)
Deputy Editors-in-Chief – Vadim S. Anishchenko (Saratov, Russia)
Valery V. Tuchin (Saratov, Russia)
Executive Secretary – Anatoly V. Skripal (Saratov, Russia)

Members of the Editorial Board:

Valery M. Anikin (Saratov, Russia)
Lev M. Babkov (Saratov, Russia)
Roberto Cerbino (Milan, Italy)
Vladimir G. Chigrinov (Hong Kong, China)
Michael V. Davidovich (Saratov, Russia)
Arnaud Dubois (Saint-Aubin, France)
Yuri A. Filimonov (Saratov, Russia)
Alexander V. Gorokhov (Samara, Russia)
Lev A. Gribov (Moscow, Russia)
Nikolai G. Khlebtsov (Saratov, Russia)
Sergey P. Kuznetsov (Saratov, Russia)
Igor S. Nefedov (Helsinki, Finland)
Sergey A. Nikitov (Moscow, Russia)
Sergey A. Malyshev (Minsk, Belarus)
Leonid A. Melnikov (Saratov, Russia)
Joseph Modelski (Warsaw, Poland)
Yuri A. Pirogov (Moscow, Russia)
Yuri P. Sharaevsky (Saratov, Russia)
Lutz Shimansky-Geier (Berlin, Germany)
Alexander V. Skripal (Saratov, Russia)
Gleb B. Sukhorukov (London, UK)
Dmitry I. Trubetskov ((Saratov, Russia)
Tatyana E. Vadivasova (Saratov, Russia)
Sergey I. Vinitsky (Dubna, Russia)
Sergey B. Venig (Saratov, Russia)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

НАУЧНЫЙ ОТДЕЛ

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ. ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

УДК 531.715.1

Измерение расстояния при гармонической модуляции длины волны лазерного автодина с учётом внешней оптической обратной связи

Ан. В. Скрипаль, С. Ю. Добдин, А. В. Джафаров, К. А. Садчикова, В. Б. Феклистов

Скрипаль Анатолий Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой медицинской физики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, skripalav@info.sgu.ru

Добдин Сергей Юрьевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твёрдого тела, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, dobdinsy@info.sgu.ru

Джафаров Алексей Владимирович, аспирант кафедры медицинской физики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, jafaralex@mail.ru

Садчикова Карина Арменаковна, аспирант кафедры медицинской физики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, karinam94@mail.ru

Феклистов Владимир Борисович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твёрдого тела, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, feklistovvb@mail.ru

Приведена методика измерения абсолютного расстояния при гармонической модуляции длины волны лазерного автодина с учётом внешней оптической обратной связи. Исследовано влияние девиации длины волны излучения полупроводникового лазерного диода на точность определения расстояния. Показано влияние внешней оптической обратной связи на форму сигнала лазерного автодина. Оценка уровня обратной связи проведена на основе методики разложения автодинного сигнала в ряды Фурье и Бесселя. Показана нелинейная зависимость погрешности определения расстояния по спектру автодинного сигнала от уровня обратной связи при низких и высоких уровнях обратной связи. Предложена методика определения уровня обратной связи, использующая расчет расстояния по различным наборам гармоник спектра автодинного сигнала.

Ключевые слова: лазерная интерферометрия, автодин, полупроводниковый лазер, модуляция излучения лазера, измерение расстояния, спектральный анализ.

Поступила в редакцию: 15.11.2019 / Принята: 20.12.2019 / Опубликована: 01.06.2020

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

DOI: https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-2-84-91

© Скрипаль Ан. В., Добдин С. Ю., Джафаров А. В., Садчикова К. А., Феклистов В. Б., 2020

Введение

Лазерная автодинная интерферометрия абсолютных расстояний в настоящее время хорошо представлена методом частотной модуляции тока питания лазерного диода (FMCW) [1–4]. В последние годы опубликованы работы, использующие гармоническую модуляцию тока питания лазера [5, 6].

Преимущество метода гармонической модуляции связано с отсутствием необходимости регулировки девиации длины волны излучения при изменении расстояния до отражателя. Однако это достигается за счет усложнения процедуры анализа автодинного сигнала, включающей регистрацию амплитуд спектральных составляющих и выбор пары таких составляющих, которые дают минимальную погрешность. Кроме того, достоинством метода гармонической модуляции является большая точность измерений при небольших расстояниях, когда недостаточная величина девиации длины волны лазерного излучения не позволяет обеспечить большое количество интерференционных максимумов, укладывающихся на линейном участке изменения тока лазерного диода [6].

Однако в автодинных системах при проведении интерференционных измерений важным параметром является уровень внешней оптической обратной связи [7–13]. В частности, для исключения перескоков мод и уменьшения сдвига частоты излучения лазерного диода, вызванного изменением концентрации носителей заряда в активной области, предложено уменьшать уровень обратной связи [14–17]. Уровень обратной связи будет также влиять и на вид автодинного сигнала, формируемого при модуляции длины волны лазерного излучения.

В ряде работ [18,19] предполагается, что влиянием внешней оптической обратной связи на форму и спектр автодинного сигнала, полученного при отражении лазерного излучения от вибрирующего объекта, при уровне обратной связи $C < 0.1$ можно пренебречь, поскольку функция автодинного сигнала $P(t)$ в этом случае будет близка к форме функции интерференционного сигнала в системе с развязкой от источника излучения.

Однако оценка влияния внешней оптической обратной связи на форму и спектр автодинного сигнала, полученного при токовой модуляции длины волны излучения лазера, ранее не проводилась. В связи с этим целью работы явилось исследование влияние уровня обратной связи на точность измерения абсолютного расстояния при гармонической частотной модуляции лазерного излучения.

1. Формирование автодинного сигнала

Для полупроводникового лазера с внешней оптической обратной связью уравнение для мощности излучения лазерного автодина следует из модели составного резонатора Лэнга и Кобаяши [19] и может быть сведено к виду

$$P(j(t)) = P_1(j(t)) + P_2\cos(\omega_c(j(t))\tau). \qquad (1)$$

Здесь $P_1(j(t))$ – составляющая мощности, независящая от расстояния до внешнего отражателя, P_2 – амплитудная составляющая мощности, зависящей от фазового набега волны $\omega(j(t))\tau$ в системе с внешним отражателем, τ – время обхода лазерным излучением расстояния до внешнего отражателя, $\omega_c(j(t))$– частота излучения полупроводникового лазера, зависящая от плотности тока накачки $j(t)$, изменяющегося во времени t, и уровня обратной связи C, определяемая фазовым уравнением [20, 21]:

$$\omega(j(t))\tau = \omega_c(j(t))\cdot\tau + C\cdot\sin(\omega_c(j(t))\tau + \psi), \qquad (2)$$

где

$$C = \tau\cdot z\cdot\sqrt{1+\alpha^2}, \qquad (3)$$

C – коэффициент, характеризующий уровень внешней оптической обратной связи, $\omega(j(t)) = 2\pi c / \lambda(j(t))$, $\lambda(j(t))$ – длина волны излучения лазера без обратной связи, c – скорость света, $\psi = arctg\ (\alpha)$, α – коэффициент уширения линии генерации, z – коэффициент обратной связи, зависящий от коэффициентов отражения от внешнего зеркала, обращенной к нему грани лазера и времени обхода излучением лазерного резонатора.

Уровень обратной связи влияет на форму автодинного сигнала и частоту излучения лазерного диода. При малом уровне обратной связи, характеризуемым величиной $C << 1$, зависимость фазы излучения лазерного диода от набега фазы волны во внешнем резонаторе лазера с обратной связью становится линейной [18]. То есть при $C << 1$ изменением частоты излучения полупроводникового лазера во времени можно пренебречь. При этом нормированная составляющая автодинного сигнала совпадает с нормированной составляющей интерференционного сигнала с развязкой от источника излучения.

При уровне обратной связи $0.1 < C < 1$ зависимость фазы излучения лазерного диода от набега фазы волны во внешнем резонаторе лазера с обратной связью становится нелинейной. При уровне обратной связи из этого интервала значений изменением частоты излучения полупроводникового лазера пренебречь нельзя. Такая зависимость приводит к искажению формы автодинного сигнала и не совпадению его с формой интерференционного сигнала.

Влияние уровня обратной связи на форму автодинного сигнала и частоту излучения лазерного автодина иллюстрируется рис. 1. Как следует из результатов, приведенных на рисунке, наблюдается появление участков с несимметричным относительно экстремальных значений P наклоном, которые можно охарактеризовать отношением интервала изменения фазы, когда происходит убывание P к интервалу изменения фазы, или его нарастание.

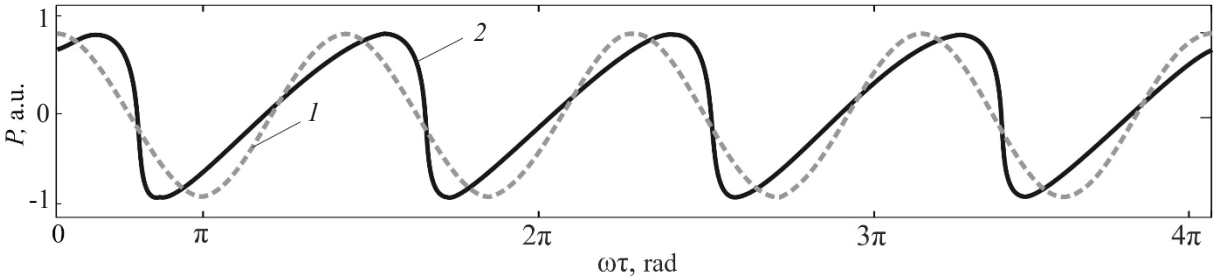


Рис. 1. Нормированные зависимости автодинного сигнала P от фазы излучения лазерного диода $\omega_c\tau$ при следующих параметрах: *1* – $C = 0.1$, *2* – $C = 0.9$

Fig. 1. Normalized dependences of the self-mixing signal P on the laser diode radiation phase at the following parameters: *1* – $C = 0.1$, 2 – $C = 0.9$

2. Частотная модуляция лазерного автодина

При модуляции длины волны излучения полупроводникового лазера частота $\omega(j(t))$ и амплитудная составляющая мощности излучения лазера $P_1(j(t))$ определяются соотношениями:

$$\omega(j(t)) = \omega_0 + \omega_A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \nu_1 \cdot t),$$
$$P_1(j(t)) = I_1 \sin(2 \cdot \pi \cdot \nu_1 \cdot t), \quad (4)$$

где ω_0 – частота излучения полупроводникового лазерного диода в начальный момент времени t, ω_A – девиация частоты излучения полупроводникового лазерного диода, ν_1 – частота модуляции тока питания лазерного диода, I_1 – амплитуда токовой модуляции составляющей $P_1(j(t))$.

Моделирование автодинного сигнала $P_1(j(t))$ проводилось при различных уровнях обратной связи и параметрах: $\lambda = 650$ нм, девиация длины волны излучения полупроводникового лазерного диода $\Delta\lambda = 0.01$ нм. На рис. 2 представлена зависимость мощности излучения лазерного автодина от времени при расстоянии до объекта 10 см.

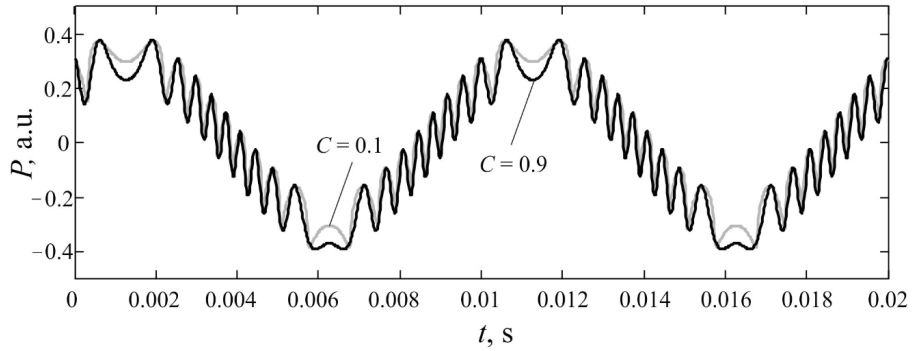


Рис. 2. Смоделированный автодинный сигнал при параметрах: $\lambda = 650$ нм, $\Delta\lambda = 0.01$ нм, и следующих параметрах обратной связи: *1* – $C = 0.1$, *2* – $C = 0.9$

Fig. 2. Modeled self-mixing signal with parameters: $\lambda = 650$ nm, $\Delta\lambda = 0.01$ nm and the following feedback parameters: *1* – $C = 0.1$, *2* – $C = 0.9$

Как видно из рисунка, для высоких значений уровня обратной связи (C = 0.9) интерференционные максимумы на зависимости приобретают дополнительный наклон, свидетельствующий о двойном изменении частоты излучения лазерного диода, связанном как с токовой модуляцией длины волны лазерного диода, так и с автодинным откликом частоты излучения лазера при различных фазах отраженного от объекта излучения лазера.

3. Определение абсолютного расстояния

Решение обратной задачи по определению расстояния до отражателя может быть получено в предположении равенства частоты излучения уединенного лазерного диода $\omega(j(t))$ частоте излучения лазерного автодина $\omega_c(j(t))$. В этом случае выражение для мощности излучения частотномодулированного полупроводникового лазера (1) запишется в виде:

$$P(j(t)) = I_1 \sin(2\pi\nu_1 t) + P_2 \cos(\omega_0\tau + \omega_A\tau\sin(\Omega t)). \quad (5)$$

Для описания низкочастотного спектра автодинного сигнала при гармонической частотной модуляции излучения лазерного диода мощность автодинного сигнала может быть представлена в виде разложения в ряд по функциям Бесселя первого рода J_n:

$$P(t) = I_1 \sin(\Omega t) + P_2 \cos(\theta) J_0(\sigma) + 2P_2 \cos(\theta) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\sigma) \cdot \cos(2n \cdot \Omega t)) - \\ - 2P_2 \sin(\theta) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(\sigma) \cdot \cos((2n-1)(\Omega t)), \quad (6)$$

и в ряд Фурье с коэффициентами разложения a_n и b_n:

$$P(t) = a_0/2 + \sum_{n=1}^{\infty}(a_{2n} c\cos(2n\Omega t) - b_{2n}\sin(2n\Omega t)) + \sum_{n=1}^{\infty}(a_{2n-1}\cos((2n-1)\Omega t) - b_{2n-1}\sin(2n-1)\Omega t)), \quad (7)$$

где стационарная фаза автодинного сигнала $\theta = \omega_0\tau$, $\sigma = \omega_A\tau$, $\Omega = 2\pi\nu_1$ – круговая частота модуляции тока питания лазерного диода.

Из равенства соотношений (6) и (7) можно записать выражения для амплитуд спектральных гармоник Фурье-спектра S_n, соответствующих амплитудам спектральных составляющих разложения в ряд по функциям Бесселя. Введем коэффициенты S_n, равные по модулю четным и нечетным спектральным составляющим разложения ряда Фурье, в виде:

$$S_{2n} = \sqrt{a_{2n}^2 + b_{2n}^2} \quad S_{2n+1} = \sqrt{a_{2n+1}^2 + b_{2n+1}^2}. \quad (8)$$

Выражения для амплитуд спектральных гармоник Фурье-спектра S_n и S_{2n+1} для n = 1,2,3… будут иметь вид

$$S_{2n} = 2\cos(\theta) \cdot P_2 \cdot J_{2n}(\sigma), \quad (9)$$

$$S_{2n+1} = -2\sin(\theta) \cdot P_2 \cdot J_{2n+1}(\sigma). \quad (10)$$

Моделирование спектра автодинного сигнала проводилось при параметрах: λ = 650 нм, девиация длины волны излучения полупроводникового лазерного диода $\Delta\lambda$ = 0.01 нм, расстояние до объекта 10 см. На рис. 3 представлен вычисленный спектр автодинного сигнала при уровне обратной связи C = 0.1.

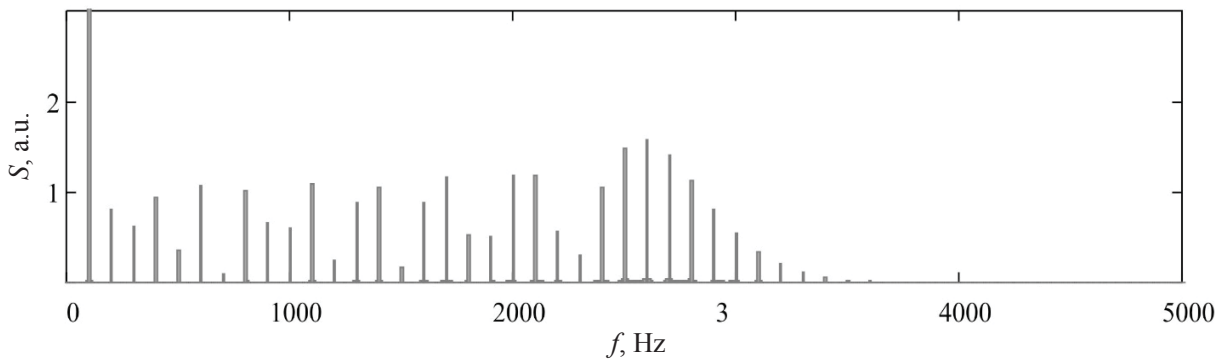


Рис. 3. Спектр автодинного сигнала, изображенного на рис. 1, при C = 0.1
Fig. 3. Spectrum of the self-mixing signal shown in Fig. 1 at C = 0.1

Для определения расстояния до объекта L, входящего в параметр σ, используем отношения для S_{2n} и S_{2n+2} и отношения для S_{2n+1} и S_{2n+3} спектральных гармоник Фурье-спектра автодинного сигнала:

$$S_{2n} / S_{2n+2} = (J_{2n}(\sigma)) / (J_{2n+2}(\sigma)), \quad (11)$$

$$S_{2n+1} / S_{2n+3} = (J_{2n+1}(\sigma)) / (J_{2n+3}(\sigma)), \quad (12)$$

Решение полученных уравнений (11) и (12) относительно неизвестного параметра $\sigma = \omega_A \tau$ требует знания параметров токовой модуляции лазерного автодина, в частности, девиации частоты излучения лазерного диода ω_A. Принимая во внимание, что $\tau = 2 \cdot L / c$, получаем соотношение для определения расстояния до объекта:

$$L = \frac{c}{2} \times \frac{\sigma}{\Delta\omega}. \quad (13)$$

4. Влияние уровня обратной связи

Задача нахождения изменения мощности автодинного сигнала $P(t)$ при известном расстоянии до отражателя L можно назвать прямой задачей, а задача нахождения L с использованием рассчитанного и измеренного $P(t)$ называется обратной. Для решения обратной задачи по определению расстояния до отражателя при токовой модуляции длины волны лазерного излучения по амплитудам спектральных составляющих S_{2n}, S_{2n+2}, S_{2n+1} и S_{2n+3} автодинного сигнала, используя уравнения (11) и (12), рассчитывается значение параметра σ. По измеренной величине девиации частоты излучения лазерного диода ω_A из соотношения (13) определяется расстояние до отражателя L.

Поскольку обратная связь изменяет форму и спектр автодинного сигнала, расчет расстояния с использованием соотношений (11) – (13) будет давать погрешность в определении исходного расстояния до отражателя. Для определения величины погрешности в определении расстояния до отражателя предлагается использовать расчет расстояния по различным наборам спектральных составляющих спектра автодинного сигнала.

С учетом обсуждавшейся ранее проблемы [22] необходимости учета знака функций Бесселя, входящих в уравнения (11) и (12), для расчета влияния уровня обратной связи выбирались наборы гармоник в области высоких частот вблизи гармоники с максимальной амплитудой.

Компьютерное моделирование автодинного сигнала влияния внешней оптической обратной связи на точность измерения расстояния до отражателя проводилось при следующих параметрах: длина волны лазерного излучения λ = 650 нм, расстояние от лазера до отражающей поверхности зонда L = 10 см, частота модуляции тока лазерного излучения ν = 100 Гц.

На рис. 4 (кривая *1*) приведена зависимость величины среднеквадратического отклонения (RMS deviation), рассчитанного по различным наборам гармоник спектра автодинного сигнала, от уровня обратной связи при девиации длины волны лазерного излучения Δλ = 0.01 нм.

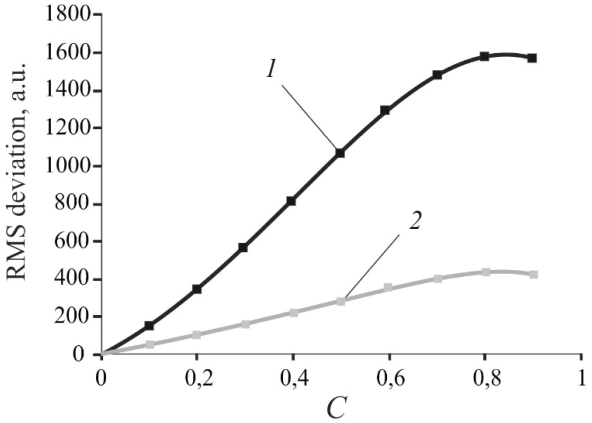


Рис. 4. Зависимость величины среднеквадратического отклонения от уровня обратной связи C: *1* – Δλ = 0.01 нм, *2* – Δλ = 0.04 нм

Fig. 4. Dependence of the RMS deviation on the feedback level C: *1* – Δλ = 0.01 nm, *2* – Δλ = 0.04 nm

Как видно из рис. 4, наблюдается нелинейная зависимость погрешности определения расстояния по спектру автодинного сигнала от уровня обратной связи при низких и высоких уровнях обратной связи. Для практики наибольший интерес представляет определение уровня обратной связи, при котором будет достигнута наибольшая точность измерений, реализуемая в автодинных измерителях.

5. Влияние девиации лазерного излучения

Для повышения уровня обратной связи было исследовано влияние девиации лазерного излучения при фиксированном расстоянии до отражателя. На рис. 5 приведен спектр автодинного сигнала при следующих параметрах: Δλ = 0.04 нм, C = 0.1.

Как видно из рис. 5, с ростом величины девиации происходит обогащение спектра автодинного сигнала гармониками высоких порядков. Результаты расчета зависимости величины среднеквадратического отклонения от

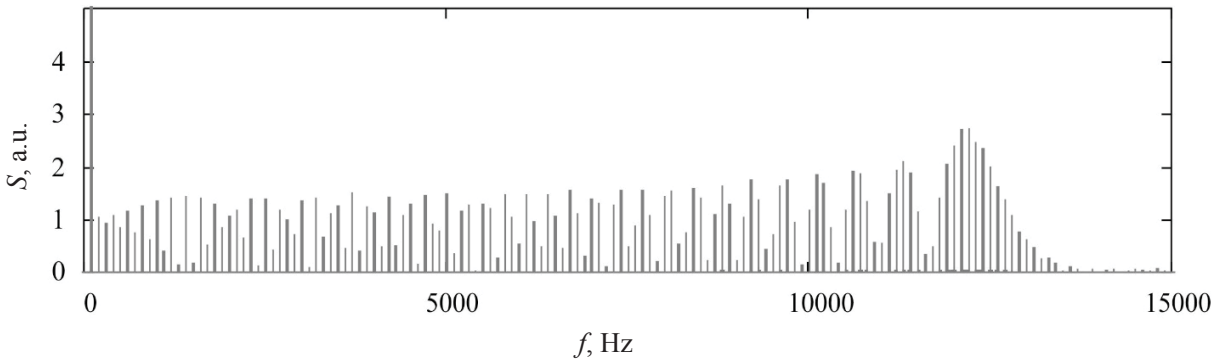


Рис. 5. Спектр автодинного сигнал при следующих параметрах: Δλ = 0.04 нм, L = 10 см, C = 0.1
Fig. 5. Spectrum of the self-mixing signal at the following parameters: Δλ = 0.04 nm, L = 10 cm, C = 0.1

уровня обратной связи при величине девиации Δλ = 0.04 нм приведены на рис. 4 (кривая *2*), из которого следует, что с ростом девиации лазерного излучения влияние уровня обратной связи уменьшается, а точность определения расстояния увеличивается. Обнаруженная закономерность косвенно подтверждается видом автодинного сигнала, приведенного на рис. 2 для разных уровней обратной связи. Наибольшее расхождение для разных уровней обратной связи кривые имеют в области медленного изменения частоты лазерного излучения, когда увеличение длины волны излучения сменяется на его уменьшение и наоборот.

Предложенная методика расчета расстояния по различным наборам гармоник спектра автодинного сигнала может быть использована для определения уровня обратной связи в автодинной системе. Необходимость такой оценки обусловлена трудностями в измерении параметров автодинной системы, входящих в выражение (3), для расчета уровня обратной связи C. Вычисляя среднеквадратическое отклонение по различным наборам гармоник спектра автодинного сигнала, по приведенной на рис. 4 зависимости определяется уровень обратной связи автодинной системы.

Заключение

При измерении абсолютного расстояния с помощью лазерных автодинов с токовой модуляцией длины волны излучения на точность измерения может оказывать влияние уровень внешней оптической обратной связи. Расчет уровня обратной связи для каждого конкретного случая использования лазерного автодина затруднителен и зависит не только от параметров самого автодина, но и системы фокусировки лазерного излучения, шероховатости поверхности, угла наклона поверхности к падающему лазерному лучу и др. Оценка уровня обратной связи может быть проведена на основе методики разложения автодинного сигнала в ряды Фурье и Бесселя и анализа спектра автодинного сигнала по наборам спектральных гармоник. Используя зависимость среднеквадратического отклонения, рассчитанного по различным наборам гармоник спектра автодинного сигнала, от девиации лазерного излучения, можно определить уровень обратной связи.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-00122).

Список литературы

1. *Amann M. C., Bosch T., Lescure M., Myllyla R., Rioux M.* Laser ranging : a critical review of usual technique for distance measurement // Opt. Eng. 2001. Vol. 40, iss. 1. P. 10–19.
2. *Donati S.* Developing self-mixing interferometry for instrumentation and measurements // Laser Photon. Rev. 2012. Vol. 6, № 3. P. 393–417.
3. *Berkovic G., Shafir E.* Optical methods for distance and displacement measurements // Adv. Opt. Photon. 2012. Vol. 4, № 4. P. 441–471.
4. *Norgia M., Giuliani G., Donati S.* Absolute distance measurement with improved accuracy using laser diode self-mixing interferometry in a closed loop // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2007. Vol. 56, iss. 5. P. 1894–1900.
5. *Zheng J.* Analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference // Appl. Opt. 2004. Vol. 43, iss. 21. P. 4189–4198.
6. *Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Добдин С. Ю., Астахов Е. И., Костюченко И. Ю., Джафаров А. В.* Методы автодинной интерферометрии расстояния при токовой частотной модуляции полупроводникового лазера // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2018. Т. 18, вып. 3. С. 189–201.

7. *Сухарев А. Г., Напартович А. П.* Режим гармонической модуляции излучения полупроводникового лазера с внешней обратной связью // Квантовая электроника. 2007. Т. 37, вып. 2. С. 149–153.
8. *Карих Е. Д.* Полупроводниковый лазер с комбинированной внешней оптической обратной связью // Вестн. БГУ. 2015. Т. 1, вып. 2. С. 35–39.
9. *Носков В. Я., Смольский С. М., Игнатков К. А., Чупахин А. П.* Расчет параметров автодинов с жесткой характеристикой проводимости активного элемента // Уральск. радиотехн. журн. 2019. Т. 3, вып. 1. С. 7–29.
10. *Ju R., Spencer P. S.* Dynamic regimes in semiconductor lasers subject to incoherent optical feedback // J. of Lightwave Technology. 2005. Vol. 23, № 8. P. 2513–2523.
11. *Ma J. S., Gu W. H.* Simulation of chaotic synchronization system based on optical feedback and injection // Optoelectron. Lett. 2006. Vol. 2, № 3. P. 0192–0194.
12. *Takeuchi Y., Shogenji R., Ohtsubo J.* Chaotic dynamics in semiconductor lasers subjected to polarization-rotated optical feedback // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 93. P. 181105-1–181105-3.
13. *Карих Е. Д.* Определение параметров микровибраций слабоотражающих объектов по кепстру сигнала самосмешения в полупроводниковом лазере // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. 2017. Вып. 3. С. 57–64
14. *Olesen H., Osmundsen J. H., Tromborg B.* Nonlinear dynamics and spectral behavior for an external cavity laser // IEEE J. Quantum Electron. 1986. Vol. 22, № 6. P. 762–773.
15. *Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Авдеев К. С.* Изменение спектра сигнала лазерного полупроводникового автодина при фокусировке излучения // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17, вып. 2. С. 54–65.
16. *Schunk N., Petermann K.* Numerical analysis of the feedback regimes for a single-mode semiconductor lasers with external feedback // IEEE J. Quantum Electron. 1988. Vol. 24, № 7. P. 1242–1247.
17. *Scalise L., Yu Y., Giuliani G., Plantier G., Bosch T.* Self-mixing laser diode velocimetry: Application to vibration and velocity measurement // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2004. Vol. 53, iss. 1. P. 223.
18. *Giuliani G., Norgia M., Donati S., Bosch T.* Laser diode self-mixing technique for sensing application // J. Opt. A : Pure Appl. Opt. 2002. Vol. 4. P. S283–S294.
19. *Lang R., Kobayashi K.* External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties // IEEE J. Quantum Electron. 1980. Vol. 16, № 3. P. 347.
20. *Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Кащавцев Е. О., Добдин С. Ю.* Определение ускорения при микро- и наносмещениях объекта по автодинному сигналу полупроводникового лазера с учетом влияния внешней оптической обратной связи // ЖТФ. 2013. Т. 83, вып. 7. С. 156–158.
21. *Tromborg B., Osmundsen J. H., Olesen H.* Stability analysis for a semi- conductor laser in an external cavity // IEEE J. Quantum Electron. 1984. Vol. 20. P. 1023–1032.
22. *Усанов Д. А., Скрипаль А. В.* Полупроводниковые лазерные автодины для измерения параметров движения при микро- и наносмещениях. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2014. 136 с.

Образец для цитирования:

Скрипаль Ан. В., Добдин С. Ю., Джафаров А. В., Садчикова К. А., Феклистов В. Б. Измерение расстояния при гармонической модуляции длины волны лазерного автодина с учётом внешней оптической обратной связи // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2020. Т. 20, вып. 2. С. 84–91. DOI: https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-2-84-91

Distance Measurement with Harmonic Modulation of Self-Mixing Laser Wavelength at External Optical Feedback

An. V. Skripal, S. Yu. Dobdin, A. V. Dzhafarov, K. A. Sadchikova, V. B. Feklistov

Anatoly V. Skripal, https://orcid.org/0000-0002-9080-0057, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, skripalav@info.sgu.ru

Sergey Yu. Dobdin, https://orcid.org/0000-0002-0801-4664, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, dobdinsy@info.sgu.ru

Aleksey V. Dzhafarov, https://orcid.org/0000-0002-0588-3151, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, jafaralex@mail.ru

Karina A. Sadchikova, https://orcid.org/0000-0002-3153-1301, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, karinam94@mail.ru

Vladimir B. Feklistov, https://orcid.org/0000-0001-8800-7706, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, feklistovvb@mail.ru

Background and Objectives: Self-mixing interferometry of absolute distances is currently well represented by the method of frequency modulation of the laser diode supply current (FMCW). In recent years a harmonic modulation of the power current of a self-mixing laser began to be used. The advantage of the harmonic modulation method is due to the absence of the need to adjust the deviation of the radiation wavelength when changing the distance to the reflector. In the laser systems, the level of external optical feedback is an important parameter during interference measurements. The feedback level also affects the type of the self-mixing signal generated by modulation of the wavelength of laser radiation. The aim of this work was to study the effect of the feedback level on the accuracy of absolute distance measurements at the harmonic frequency modulation of laser radiation.
Materials and Methods: The article presents a method of measuring distances using a semiconductor laser with a harmonic modulation of the radiation wavelength. The technique allows taking into account the influence of the feedback level to improve the accuracy of the measurements. In particular, it is proposed to reduce the feedback

level in order to eliminate mode jumps and reduce the frequency shift of the laser diode radiation caused by a change in the concentration of charge carriers in the active region. **Results:** The results of the influence of the feedback level on the shape of the self-mixing signal and on the accuracy of distance measurements have been described. **Conclusion:** Evaluation of the feedback level can be carried out on the basis of the method of decomposition of the self-mixing signal in the Fourier and Bessel series and analysis of sets of spectral harmonics. The feedback level is determined using the values of the RMS deviation calculated from sets of spectral harmonics of the self-mixing signal.

Keywords: laser interferometry, self-mixing laser, laser radiation modulation, distance measurement, spectral analysis.

Received: 15.11.2019 / Accepted: 20.12.2019 / Published: 01.06.2020

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

Acknowledgements: *This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 19-79-00122).*

References

1. Amann M. C., Bosch T., Lescure M., Myllyla R., Rioux M. Laser ranging: a critical review of usual technique for distance measurement. *Optical Engineering,* 2001, vol. 40, iss. 1, pp. 10–19.
2. Donati S. Developing self-mixing interferometry for instrumentation and measurements. *Laser Photonics Rev.*, 2012, vol. 6, no. 3, pp. 393–417.
3. Berkovic G., Shafir E. Optical methods for distance and displacement measurements. *Adv. Opt. Photonics,* 2012, vol. 4, no. 4, pp. 441–471.
4. Norgia M., Giuliani G., Donati S. Absolute distance measurement with improved accuracy using laser diode self-mixing interferometry in a closed loop. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2007, vol. 56, iss. 5, pp. 1894–1900.
5. Zheng J. Analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference. *Appl. Opt.*, 2004, vol. 43, iss. 21, pp. 4189–4198.
6. Usanov D. A., Skripal An. V., Dobdin S. Yu., Astahov E. I., Kostuchenko I. S., Dzhafarov A. V. Methods of Autodyne Interferometry of the Distance by Injected Current Modulation of a Semiconductor Laser. *Izv. Saratov Univ. (N. S.)*, *Ser. Physics*, 2018, vol. 18, iss. 3, pp. 189–201 (in Russian). DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-3-189-201
7. Sukharev A. G., Napartovich A. P. Harmonic modulation of radiation of an external-feedback semiconductor laser. *Quant. Electron.*, 2007, vol. 37, iss. 2, pp. 149–153.
8. Karikh E. D. Semiconductor laser with combined external optical feedback. *Vestnik BGU,* 2015, vol. 1, no. 2, pp. 35–39.
9. Noskov V. Ya., Smolskiy S. M., Ignatkov K. A., Chupahin A. P. Calculation of autodyne parameters with the rigid characteristic of the active element conductance. *Ural Radio Eng. J.*, 2019, vol. 3, no. 1, pp. 7–29. DOI: 10.15826/urej.2019.3.1.001
10. Ju R., Spencer P. S. Dynamic regimes in semiconductor lasers subject to incoherent optical feedback. *J. Lightwave Technol.*, 2005, vol. 23, no. 8, pp. 2513–2523.
11. Ma J. S., Gu W. H. Simulation of chaotic synchronization system based on optical feedback and injection. *Optoelectron. Lett.*, 2006, vol. 2, no. 3, pp. 0192–0194.
12. Takeuchi Y., Shogenji R., Ohtsubo J. Chaotic dynamics in semiconductor lasers subjected to polarization-rotated optical feedback. *Appl. Phys. Lett.,* 2008, vol. 93, pp. 181105-1–181105-3.
13. Karikh E. D. Determination of the parameters of low-reflecting object microvibrations by cepstrum of self-mixing signal in semiconductor laser. *J. Belarus. State Univ. Phys.,* 2017, no. 3, pp. 57–64.
14. Olesen H., Osmundsen J. H., Tromborg B. Nonlinear dynamics and spectral behavior for an external cavity laser. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1986, vol. 22, no. 6, pp. 762–773.
15. Usanov D. A., Skripal An. V., Avdeev K. S. Spectrum of semicondactor laser autodyne at focusing radiation. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2009, vol. 17, no. 2, pp. 54–65.
16. Schunk N., Petermann K. Numerical analysis of the feedback regimes for a single-mode semiconductor laser with external feedback. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1988, vol. 24, no. 7, pp. 1242–1247.
17. Scalise L., Yu Y., Giuliani G., Plantier G., Bosch T. Self-mixing laser diode velocimetry: Application to vibration and velocity measurement. *IEEE Trans. Instrum. Meas.,* 2004, vol. 53, iss. 1, pp. 223.
18. Giuliani G., Norgia M., Donati S., Bosch T. Laser diode self-mixing technique for sensing application. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2002, vol. 4, pp. S283–S294.
19. Lang R., Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1980, vol. 16, no. 3, pp. 347.
20. Usanov D. A., Skripal A. V., Kashchavtsev E. O., Dobdin S. Y. Acceleration measurements upon micro- and nano-displacements of an object using the autodyne signal of a semiconductor laser with allowance for the external optical feedback. *Tech. Phys*., 2013, vol. 58, no. 7, pp. 1083–1085.
21. Tromborg B., Osmundsen J. H., Olesen H. Stability analysis for a semi- conductor laser in an external cavity. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1984, vol. 20, pp. 1023–1032.
22. Usanov D. A., Skripal An. V. *Poluprovodnikovye lazernye avtodiny dlya izmereniya parametrov dvizheniya pri mikro- i nanosmeshcheniyah* [Semiconductor laser autodynes for measurement of motion parameters at micro-and nanoscale displacements]. Saratov, Izdatel'stvo Saratovskogo universiteta, 2014. 136 p. (in Russian).

Cite this article as:

Skripal An. V., Dobdin S. Yu., Dzhafarov A. V., Sadchikova K. A., Feklistov V. B. Distance Measurement with Harmonic Modulation of Self-Mixing Laser Wavelength at External Optical Feedback. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2020, vol. 20, iss. 2, pp. 84–91 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-2-84-91

НАУЧНЫЙ ОТДЕЛ

БИОФИЗИКА И МЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА

УДК 535.2:535.8

Дегидратация биотканей в процессе их компрессии

О. А. Зюрюкина, Ю. П. Синичкин

Зюрюкина Ольга Анатольевна, аспирант кафедры оптики и биофотоники, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, oazyuryukina@yandex.ru

Синичкин Юрий Петрович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры оптики и биофотоники, заведующий лабораторией оптической медицинской диагностики Научно-образовательного института оптики и биофотоники, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, yusin49@gmail.com

Представлены результаты мониторинга изменения оптических свойств и геометрических параметров образцов *ex vivo* мышечной ткани коровы в процессе дегидратации, вызванной их компрессией. Степень дегидратации образцов оценивалась по изменению их массы в процессе сушки или по массе вытесненной воды из образцов, подверженных компрессии. Приведены результаты сравнения динамики степени дегидратации образцов со спектральными изменениями в их диффузном отражении. Отмечено, что временное изменение коэффициентов диффузного отражения высушенных образцов и образцов, подверженных компрессии, носят противоположный характер: при наложении компрессии диффузное отражение уменьшается, а в процессе сушки увеличивается, что объясняется разными изменениями в физической структуре образцов. Рассматривается возможность оценки изменения дегидратации образцов ткани в условиях компрессии по спектрам их диффузного отражения.

Ключевые слова: мышечная ткань, дегидратация, компрессия, диффузное отражение, оптическое просветление.

Поступила в редакцию: 12.02.2020 / Принята: 05.03.2020 / Опубликована: 01.06.2020

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

DOI: https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-2-92-102

Введение

«Оптическое просветление биотканей», основанное на уменьшении их рассеивающих и поглощающих свойств, увеличивает как глубину проникновения света в ткань, так и интенсивность света в более глубоких областях ткани, потенциально улучшая возможности различных оптических диагностических и терапевтических методик. В настоящее время широко используется метод иммерсионного просветления биотканей, когда в биоткань вводятся гиперосмотические иммерсионные агенты, вызывающие диффузию воды из внутритканевого пространства и частично замещающие собой внутритканевую жидкость. К потенциальным механизмам уменьшения рассеяния света в тканях относят водный транспорт из компонентов тканей, перемещения воды внутри ткани, замена

© Зюрюкина О. А., Синичкин Ю. П., 2020

межклеточной воды химическим агентом с более высоким показателем преломления, структурная модификация или диссоциация коллагеновых волокон [1]. Альтернативным методом оптического просветления биотканей является компрессионный метод просветления [2–22], основными механизмами которого предполагаются дегидратация ткани из-за транспорта воды из области приложения внешней компрессии и структурные изменения ткани. Ключевыми процессами, определяющими механизмы иммерсионного и компрессионного просветления биоткани, являются осмотическая дегидратация ткани под действием иммерсионного агента или дегидратация биоткани из-за транспорта воды из области приложения внешней компрессии.

В публикациях по компрессионному методу просветления биотканей в основном рассматриваются: 1) влияние внешнего механического давления на спектры пропускания и диффузного отражения образцов тканей [3–10, 14, 15, 18–20]; 2) изменения в оптических параметрах (коэффициентах поглощения и рассеяния) тканей [3, 5, 11, 12, 15, 18]; 3) физические механизмы, приводящие к изменениям оптических параметров [2, 11–13, 16–19, 21, 22].

Вопросы влияния компрессии на оптические свойства мягких тканей и возможные механизмы изменений оптических свойств биотканей в условиях компрессии рассматривались в работах [3, 5]. В общем отмечается, что при компрессии уменьшается диффузное отражение, уменьшение отражения обусловлено уменьшением толщины образцов тканей (до 72%) и уменьшением веса образцов тканей (до 40%); коэффициенты поглощения и рассеяния увеличиваются с ростом давления; эффекты компрессии на оптические свойства тканей необратимы.

Возможные механизмы, отвечающие за изменение оптических свойств, связываются авторами с изменением толщины или веса тканей и непосредственно связаны с их дегидратацией. Компрессия уменьшает толщину образца и вызывает вытекание жидкости из образцов, при этом изменения в толщине тканей и содержании воды влияют на оптические свойства образцов разными путями.

В условиях компрессии увеличивается плотность поглощающих или рассеивающих центров, что является результатом уменьшения пространства между клеточными компонентами. Так как сечения рассеяния или поглощения остаются постоянными или слегка уменьшаются, то в результате воздействия компрессии коэффициенты поглощения и рассеяния увеличиваются. Увеличение объемной концентрации воды из-за уменьшения толщины ткани может также быть причиной увеличения коэффициента поглощения при наложении компрессии.

Коэффициенты поглощения для сжатых образцов имеют большую величину, даже если они имеют схожие толщины с образцами без компрессии. Это является следствием того, что физические структуры несжатых образцов (даже если они дегидратированы) более рыхлые по сравнению со структурами сжатых образцов, которые более плотные и компактные [4].

Изменения в физической структуре мягкой ткани являются одной из причин изменения оптических свойств ткани под действием компрессии. Изменения будут необратимыми, если структура не возвращается в исходное состояние после компрессии. Если толщина ткани не возвращается в свое начальное состояние после снятия компрессии, то это может быть объяснением того, что изменения оптических свойств в результате компрессии необратимы.

Динамика объемной фракции воды в процессе компрессии образцов ткани анализировалась авторами работы [13] на основе экспериментов с *ex vivo* кожей свиньи, проведенных методом ОКТ. Анализ проводился в предположении, что кожа может быть представлена как двухкомпонентная смесь воды и белка. Результаты сравнивалась с результатами весовых измерений образцов в процессе компрессии и в процессе сушки образцов. Получено, что локализованная механическая компрессия образцов кожи уменьшает толщину ткани (более чем в два раза), уменьшает содержание воды в образцах (объемная доля уменьшалась более чем в три раза) и увеличивает величину показателя преломления образцов (от 1.39 до 1.50). При этом отмечается, что компрессия приводит к тем же эффектам, что и в случае дегидратации образцов при их воздушной иммерсии (сушке). Локальная механическая компрессия не только уменьшает рассеяние в коже благодаря уменьшению содержания в дермальной коллагеновой матрице не связанной воды, в результате чего белковая структура становится более плотно упакованной, что приводит к лучшему согласованию показателей преломления компонентов биоткани, но и уменьшает поглощение образцов.

Корреляция увеличения локального механического давления с уменьшением приведенного коэффициента преломления в течение времени

компрессии отмечается авторами работы [15]. Вдавливание источника освещения в биоткань увеличивало пропускание света через ткань, при этом величина относительного пропускания увеличивается как функция деформации сдавливания (относительного изменения толщины). Приведенный коэффициент рассеяния уменьшался на 12.0% при относительном уменьшении толщины на 0.44 и на 35.6% при деформации 0.71. Увеличение деформации до 0.45 уменьшало приведенный коэффициент рассеяния на ~15%.

Подробные исследования влияния давления волоконно-оптического датчика на оптические свойства биоткани приведены в [17], при этом акцент сделан на изменениях в содержании воды. Объектами исследований являлись образцы *in vitro* кожи свиньи и *in vivo* кожи человека. Результаты проведенных исследований показали, что контактное давление датчика при достижении определенного порога и длительности может значительно повлиять на спектр отражения. Так как биоткань с высоким содержанием воды в значительной степени не сжимаема, то авторами предлагается механизм изменения оптических характеристик биоткани при ее компрессии, связанный с деформацией биоткани и вытеснением воды из области сжатой ткани. Количество воды, вытесненной из области локализованного давления, является основным фактором вариаций спектров отражения. Моделирование таких вариаций проводилось на основе двухфазной модели кожи, согласно которой кожа представляет собой совокупность несжимаемой эластичной твердой матрицы, образованной главным образом из эластичных волокон и клеток, которые играют главную роль в нелинейном механическом отклике биоткани на внешние воздействия, и заполняющей твердую матрицу жидкости. Результаты показали, что изменения свободной и связанной воды в ткани связаны с давлением нелинейным образом. В случае кожи свиньи *in vitro* наложение компрессии ведет к вытеснению свободной воды из области компрессии, в то время как перемещение связанной воды затруднено. При давлении около 400 кПа содержание связанной воды уменьшается на 30%, что, по мнению авторов, связано с деформацией ткани. Показано, что временные изменения содержания свободной и связанной воды в коже свиньи *ex vivo* происходят в течение времени порядка 6 мин после наложения компрессии, после чего процесс стабилизируется, при этом время стабилизации зависело от величины прикладываемого давления. На ранних стадиях деформации ткани при определенном давлении основная вода выходит из области компрессии с высокой скоростью из-за большого напряжения внутри ткани. Из-за релаксации напряжения биотканей деформация и скорость миграции основной воды постепенно уменьшается. По истечении определенного времени, зависящего от величины компрессии, деформация ткани и транспорт основной воды становятся постоянными.

Несмотря на то, что деформация ткани под действием компрессии дает значительный вклад в эффект оптического просветления, этого вклада недостаточно для экспериментально отмеченного увеличения пропускания света сжатыми средами. В результате проведенных исследований [12] получено, что увеличение пропускания продолжается увеличиваться даже при условии, что толщина ткани сохраняется постоянной. Механическое просветление может быть функцией относительного изменения толщины ткани (деформации сдавливания), а не просто абсолютного уменьшения толщины ткани из-за приложенного давления.

Это говорит о том, что механизмов оптического просветления может быть больше, чем простое уменьшение толщины. Авторы [2] отмечают, что дегидратация является важным механизмом оптического просветления с использованием химических агентов, и проводят анализ, каким образом дегидратация может давать вклад в уменьшение рассеяния света. Объяснение механизма оптического просветления дает выражение, связывающее приведенный коэффициент рассеяния с объемной фракцией рассеивающих частиц. Параболическая зависимость приведенного коэффициента рассеяния от плотности упаковки рассеивающих частиц показывает, что эффекты дегидратации модифицируют плотность упаковки рассеивающих частиц. Связь показателей преломления и изменения в форме или структуре рассеивающих частиц влияют на поперечное сечение рассеяния. По мнению авторов, просветление биоткани обратно пропорционально ее состоянию гидратации. Эти результаты хорошо согласуются с отмеченной авторами [21, 22] корреляцией между водными потерями и просветляющей способностью химических агентов для образцов мышечной ткани и желудка свиньи.

Дегидратация может уменьшить рассеяние света путем увеличения объемной фракции рассеивающих частиц. Обезвоживание биоткани

делает коллагеновые фибриллы и органеллы более тесно упакованными, но не вызывает значительных изменений в их размерах. Так как естественная плотность коллагеновых фибрилл составляет величину порядка 65% и возрастает из-за дегидратации до 90%, то такие структурные изменения могут дать 60%-ное уменьшение приведенного коэффициента рассеяния в предположении, что показатель преломления базовой субстанции не меняется. Вклад в оптическое просветление может также дать уменьшение рассогласования показателей преломления между фибриллами и межфибриллярного пространства, вызванное увеличением концентрации протеогликанов (или экзогенных иммерсионных субстанций) [23].

Количественные измерения дегидратации биотканей в результате внешней компрессии весьма затруднительны, особенно если исследуется *in vivo* биоткань. Если дегидратацию *ex vivo* образцов биотканей можно оценить путем их весовых измерений в процессах высушивания или компрессии, то в условиях *in vivo* такие измерения невозможны, и единственным измеряемым параметром в спектральных экспериментах является коэффициент диффузного отражения биоткани. Вода вносит существенный вклад в формирование спектра диффузного отражения биологической ткани. Изменение содержания воды в биоткани отчетливо проявляется в спектрах диффузного отражения как результат изменения поглощающих и рассеивающих свойств ткани. Дегидратация ткани уменьшает ее поглощение в инфракрасной области и изменяет рассеяние ткани в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн. Влияние внешней механической компрессии на содержание воды в кожной ткани человека *in vivo* рассматривается в работах [19, 20]. В данной работе представлены результаты исследования влияния дегидратации образцов *ex vivo* мышечной ткани коровы в процессе их высушивания и наложения компрессии на спектры их диффузного отражения с целью выявления корреляции между спектрами диффузного отражения биотканей и их дегидратацией.

Экспериментальная установка, материалы и методы

Измерения спектров диффузного отражения образцов биоткани осуществлялись с помощью установки, состоящей из осветительного устройства HL-2000 (Ocean Optics, США), волоконно-оптического датчика и двух волоконно-оптических спектрометров USB4000 (Ocean Optics, США) и NIRQuest512-2.2 (Ocean Optics, США), сопряженных с персональными компьютерами. Установка обеспечивала регистрацию спектров в диапазоне от 400 до 2000 нм и подробно описана в работе [20].

В работе использовался волоконно-оптический датчик R400-7-VIS/NIR (Ocean Optics, США). Для исследования поведения жидкостей в образцах мышечной ткани под влиянием внешнего механического давления была изготовлена специальная насадка на датчик с кюветой цилиндрической формы (рис. 1). Прорези в дне и стенках кюветы служили для отведения жидкости, выдавливаемой из ткани под действием внешней механической компрессии. Насадка и кювета были смоделированы с помощью программы Autodesk Fusion 360 и распечатаны на 3D-принтере из черного пластика PLA.

Используемые в экспериментах образцы мышечной ткани коровы вырезались из одного объема биоткани, при этом в измерениях с высушиванием образцы имели прямоугольную

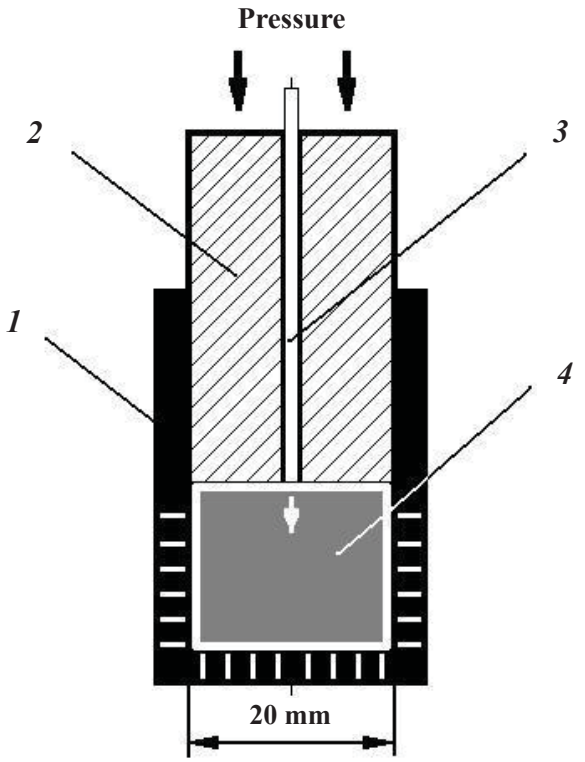


Рис. 1. Схема насадки для выдавливания жидкости из образцов мышечной ткани: *1* – кювета, *2* – насадка, *3* – волоконно-оптический датчик, *4* – образец биоткани

Fig. 1. Scheme of nozzles for squeezing fluid from muscle tissue samples: *1* – cuvette, *2* – nozzle, *3* – fiber-optic sensor, *4* – tissue sample

форму размером 20 × 20 × 25 мм^3. Были проведены шесть экспериментов, в которых 8 образцов высушивались в течение нескольких часов при температуре порядка 60°, при этом каждый час образцы взвешивались и регистрировались их спектры диффузного отражения. Результаты усреднялись.

В случае экспериментов с компрессией образцы мышечной ткани вырезались в форме цилиндров диаметром ~ 20 мм и толщиной ~ 25 мм, которые помещались в кювету и подвергались внешнему давлению с помощью насадки. После приложения давления в течение времени порядка 6 мин регистрировались спектры отражения с временным шагом, равным 2 с, по истечении которого внешний цилиндр с образцом биоткани взвешивался. В результате сдавливания образца из него (и из внешнего цилиндра, соответственно) выходила вода, которая в весовых измерениях участия не принимала. Результаты измерений усреднялись.

Результаты и их обсуждение

Динамика содержания воды в образцах ткани в процессе их высушивания может быть определена с помощью временных измерений веса образца, $W(t)$. Образцы взвешивались каждый час. В предположении, что уменьшение веса образца происходит благодаря только испарению воды, можно считать, что весом полностью обезвоженного образца может служить вес полностью сухого образца, W_0. Для оценки степени дегидратации биоткани в процессе высушивания можно рассмотреть схожий процесс дегидратации кожи под действием осмотических оптических просветляющих агентов [24]. Следуя авторам [24], степень дегидратации биоткани можно определить как

$$H_D(t) = \frac{W(t=0) - W_0}{W(t=0)}\left(1 - \exp\left(-t/\tau_D\right)\right), \quad (1)$$

где $W(t = 0)$ – начальный вес образца, разность $W(t = 0) - W_0$) показывает количество воды, покинувшее биоткань в результате дегидратации, при этом временную зависимость степени дегидратации H_D можно записать в следующем виде:

$$H_D(t) = A_D\left(1 - \exp\left(-t/\tau_D\right)\right), \quad (2)$$

где A_D– безразмерный параметр, характеризует максимальную степень дегидратации, τ_D – постоянная времени дегидратации, характеризующая скорость процесса.

Зависимость веса образцов от времени сушки представлена на рис. 2. Видно, что по истечении 17 ч сушки вес образцов уменьшился в среднем на 70%, т.е. масса ушедшей воды составляла около 70%. Эта цифра соответствует степени гидратации образцов перед экспериментами. По мере высушивания образцов степень гидратации уменьшалась, что отмечено на рис. 2.

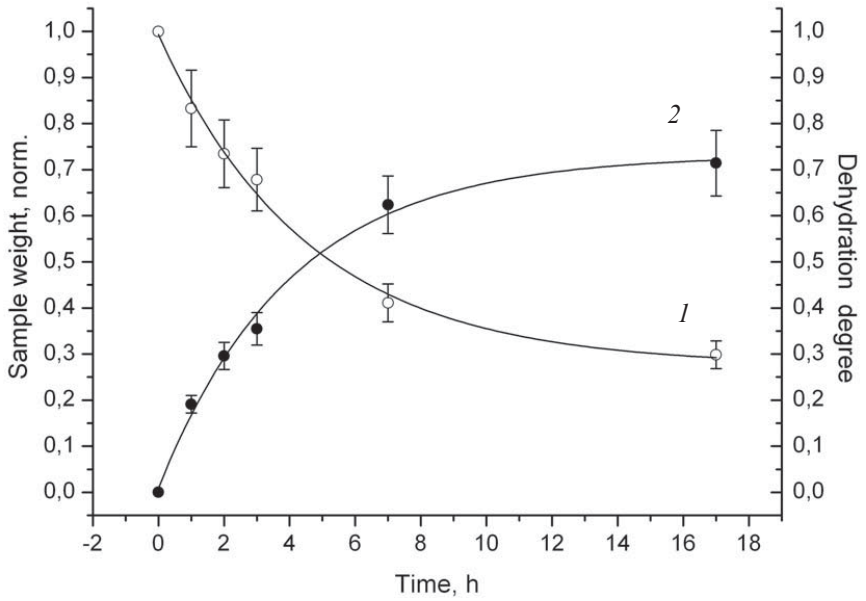


Рис. 2. Временные изменения нормированного веса (*1*) и степени дегидратации (*2*) образцов мышечной ткани в процессе их сушки

Fig. 2. Temporary changes in weight (*1*) and dehydration degree (*2*) of muscle samples during their drying

Дегидратация образцов в процессе их сушки сопровождалась увеличением их диффузного отражения. Динамика коэффициента отражения образцов в процессе их сушки на отдельных длинах волн показана на рис. 3. После 3 ч сушки образцов их шероховатость затвердевших поверхностей приводила к значительным ошибкам при регистрации отраженного света, величина которого, как известно [25], сильно зависит от промежутка между торцом датчика и поверхностью образца.

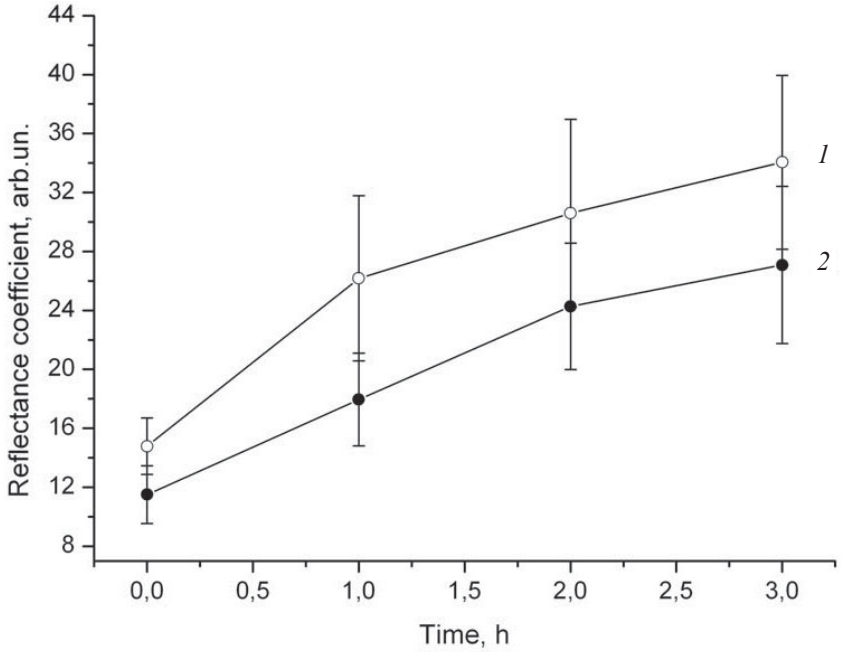


Рис. 3. Временные изменения диффузного отражения образцов в процессе их сушки: *1* – λ = 800 нм, *2* – λ = 1070 нм

Fig. 3. Temporary changes in diffuse reflectance of samples during their drying: *1* – λ = 800 nm, *2* – λ = 1070 nm

Сдавливание образцов биоткани должно приводить к изменению их физических, в том числе оптических, параметров, которые обусловлены рядом причин, среди которых деформация образцов, изменение их плотности, количество содержащейся в них воды. Информация о весе образцов и степени их дегидратации в результате компрессии, полученная с учетом соотношений (1) и (2), приведена на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что при давлении на образцы порядка 110 кПа вес образцов уменьшается на 45%. Это уменьшение веса образцов обусловлено вытеснением воды из образцов и их дегидратацией. Максимальная степень дегидратации образцов при их компрессии, как видно из рис. 4, составляла величину порядка 50%.

Отличительной особенностью поведения спектра диффузного отражения образцов после наложения компрессии является его монотонное уменьшение по двухэкспоненциальному закону [20]. В первоначальный момент приложения давления происходит резкая деформация и сжатие коллагеновой матрицы ткани (согласно двухфазной модели). Этот процесс происходит в течение нескольких секунд. В дальнейшем на спектр диффузного отражения начинает влиять дегидратация биоткани в области приложения внешнего давления, что в эксперименте отражается в появлении воды, вытекающей из кюветы датчика. Характерные времена экспоненциального уменьшения коэффициентов отражения в спектральной области 600–900 нм после наложения компрессии являются не чем иными, как временами дегидратации образца ткани.

На рис. 5 приведены временные изменения коэффициента диффузного отражения образца ткани на длине волны λ = 900 нм при последовательном увеличении приложенной компрессии (времена изменения компрессии показаны стрелками), которая хорошо аппроксимируется экспоненциальной зависимостью (рис. 6). На рис. 6 приведена также информация о состоянии

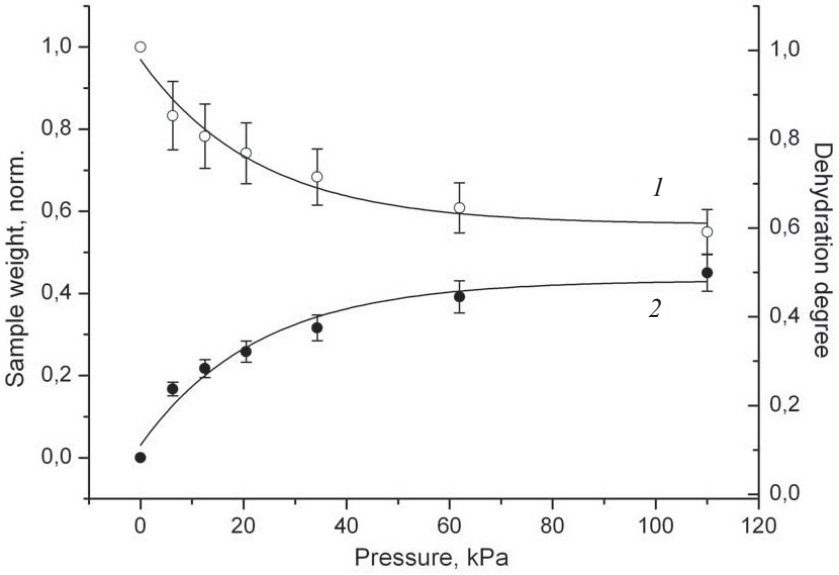


Рис. 4. Временные изменения веса (*1*) и степени дегидратации (*2*) образцов мышечной ткани в процессе их сжатия

Fig. 4. Temporary changes in weight (*1*) and dehydration degree (*2*) of muscle samples during their compression

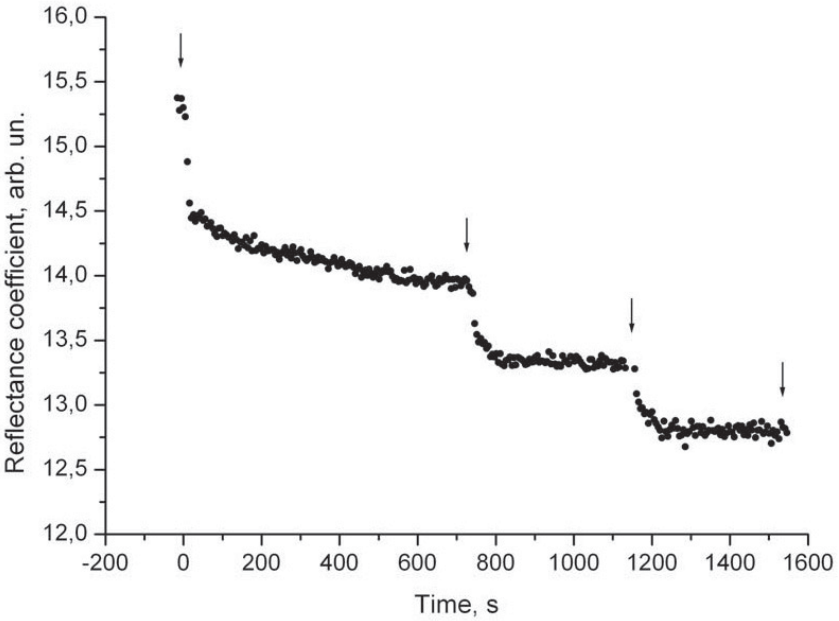


Рис. 5. Временные изменения коэффициента диффузного отражения образца ткани при наложении компрессии разной величины. λ = 900 нм. Стрелками показаны времена изменения компрессии

Fig. 5. Temporary changes in diffuse reflectance of a tissue sample under compression of different values. λ = 900 nm. The arrows indicate the times of compression changes

дегидратации образцов ткани в условиях компрессии в виде зависимости веса образцов от величины приложенной компрессии.

Нужно отметить различие во временном поведении спектров диффузного отражения образцов ткани в процессе ее дегидратации в результате сушки и компрессии. В отличие от дегидратации образцов биоткани в процессе сушки при сжатии образцов коэффициент диффузного отражения уменьшается. Этот факт можно объ-

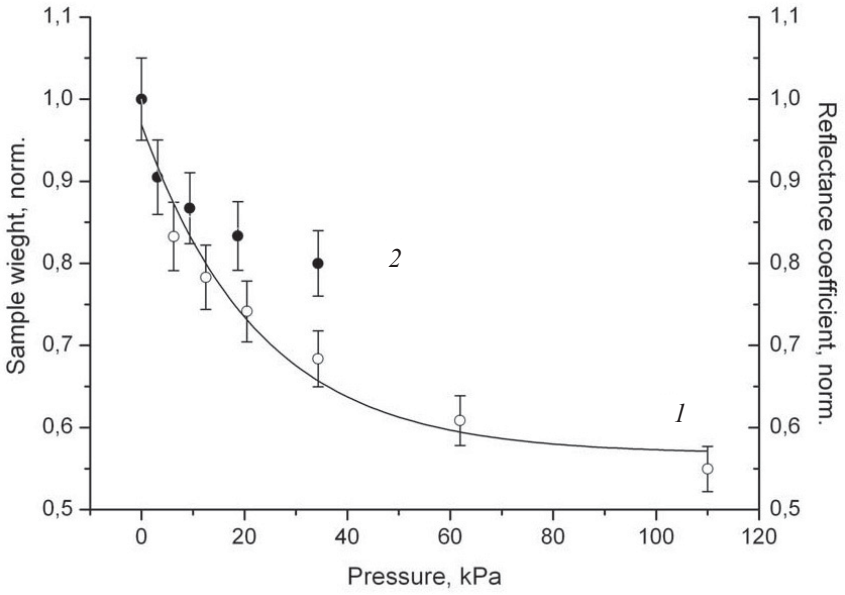


Рис. 6. Временные изменения веса (*1*) и коэффициента диффузного отражения (*2*) образцов мышечной ткани в зависимости от приложенной компрессии. λ = 900 нм

Fig. 6. Temporal changes in weight (*1*) and diffuse reflectance coefficient (*2*) of muscle tissue samples depending on applied compression. λ = 900 nm

яснить отличием в физических структурах образцов при дегидратации [2]. Сжатые образцы очень плотные и компактные, при этом уплотнение рассеивающих частиц приводит к изменению объемной фракции рассеивающих частиц φ_S и, как следствие, к изменению приведенного коэффициента рассеяния $\mu_S^{'}$, которые связаны между собой соотношением [2, 23]:

$$\mu_S^{'} = \frac{\varphi_S(1-\varphi_S)}{V_P}\sigma_S^{'}, \qquad (3)$$

где V_P – объем рассеивающей частицы, $\sigma_S^{'}$ – поперечное сечение приведенного рассеяния, зависящее от длины волны света, радиуса рассеивающей частицы и показателей преломления рассеивающей частицы и окружающей среды. Эта зависимость имеет вид параболы с максимумом $\mu_S^{'}$ при φ_S = 0.5 и обращением в ноль при φ_S = 0 и φ_S = 1, т.е. когда среда становится однофазной.

В случае компрессии образцов увеличение фракции рассеивателей происходит в области φ_S < 0.5 и ведет к уменьшению приведенного коэффициента рассеяния и, как следствие, к уменьшению коэффициента диффузного отражения. В отличие от сжатых образов физические структуры несжатых образцов под микроскопом выглядят как «рыхлые» [2]. Удаление воды путем выпаривания (сушки) уплотняет ткань в меньшей степени, компоненты ткани могут оставаться рыхлыми даже после дегидратации, так что сухой образец остается менее плотный по сравнению с сжатым. Увеличение фракции рассеивателей происходит в области φ_S > 0.5 и ведет к увеличению приведенного коэффициента рассеяния и, соответственно, диффузного отражения [23, 26]. Более того, в объеме сухого образца могут образовываться воздушные полости, что в результате может привести к увеличению рассогласования показателей преломления компонентов биоткани (путем замены показателя преломления воды на меньший по величине показатель преломления воздуха), увеличению рассеяния и коэффициента диффузного отражения [2, 27].

Данные, приведенные на рис. 6, показывают, что поведение коэффициента диффузного отражения образца ткани коррелирует с процессом уменьшения веса образца при его компрессии. Оба процесса носят экспоненциальный характер, при этом уменьшение коэффициента отражения обусловлено дегидратацией образца. Относительное уменьшение коэффициента отражения по величине отличается от относительного уменьшения веса образца, что связано с тем, что диффузное отражение образца зависит от его рассеивающих и поглощающих свойств [28], т.е. зависит от длины волны зондирующего света. Увеличение

поглощения образца приводит к увеличению относительного уменьшения коэффициента отражения по величине, поэтому выбор длины волны зондирующего света (где поглощение больше) может дать и количественно совпадение между зависимостями, приведенными на рис. 6.

Заключение

Дегидратация *ex vivo* образцов мышечной ткани коровы в процессе их сушки или компрессии сопровождается разным характером временного поведения диффузного отражения образцов: в первом случае диффузное отражение увеличивается, а во втором – уменьшается. Этот результат обусловлен разными физическими структурами высушенного и сдавленного образца, которые приводят к разной плотности рассеивателей в образце и, как следствие, двухкомпонентной модели, к разной величине фракции рассеивателей в среде и разному поведению приведенного коэффициента рассеяния.

Оценить степень дегидратации образцов ткани в результате их компрессии можно на основе анализа изменений диффузного отражения образцов. Процессы уменьшения диффузного отражения образца ткани и уменьшения их веса в результате компрессии коррелируют. Оба процесса носят экспоненциальный характер, при этом уменьшение коэффициента отражения обусловлено дегидратацией образца. Выбор длины волны зондирующего света может дать не только качественное, но и количественное совпадение между двумя процессами.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-32-90177).

Список литературы

1. *Tuchin V. V.* Optical clearing of tissues and blood. Bellingham, WA, USA : SPIE Press, 2005. Vol. PM 154. 254 p.
2. *Rylander C. G., Stumpp O. F., Milner T. E., Kemp N. J., Mendenhall J. M., Diller K. R., Welch A. J.* Dehydration mechanism of optical clearing in tissue // J. Biomed. Opt. 2006. Vol. 11, № 4. P. 041117.
3. *Chan E. K., Sorg B., Protsenko D., O'Neil M., Motamedi M., Welch A. J.* Effects of compression on soft tissue optical properties // IEEE J. Select. Top. Quant. Electron. 1996. Vol. 2, № 4. P. 943–950.
4. *Синичкин Ю. П., Утц С. Р., Пилипенко Е. А.* Спектроскопия кожи человека *in vivo*: 1. Спектры отражения // Опт. и спектр. 1996. Т. 80, № 2. С. 260–267.
5. *Shangguan H., Prahl S. A., Jacques S. L., Casperson L. W. Gregory K. W.* Pressure effects on soft tissues monitored by changes in tissue optical properties // Proc. SPIE. 1998. Vol. 3254. P. 366–371.
6. *Chen W., Liu R., Xu K., Wang R. K.* Influence of contact state on NIR diffuse reflectance spectroscopy *in vivo* // J. Phys. D. 2005. Vol. 38. P. 26913695.
7. *Reif R., Amorosino M. S., Calabro K. W., A'Amar O., Singh K. S., Bigio I. J.* Analysis of change in reflectance measurements on biological tissues subjected to different probe pressures // J. Biomed. Opt. 2008. Vol. 13, № 1. P. 010502.
8. *Ti Y., Lin W. C.* Effects of probe contact pressure on *in vivo* optical spectroscopy // Opt. Express. 2008. Vol. 16, № 6. P. 4250–4262.
9. *Rylander C. G., Milner T. E., Baranov S. A., Nelson J. S.* Mechanical tissue optical clearing devices: Enhancement of light penetration in *ex vivo* porcine skin and adipose tissue // Laser Surg. Med. 2008. Vol. 40, № 10. P. 688–694.
10. *Delgado Atencio J. A., Orozco Guillen E. E., Vazquezy Montiel S., Cunill Rodríguez M., Castro Ramos J., Gutiérrez J. L., Martínez F.* Influence of probe pressure on human skin diffuse reflectance spectroscopy measurements // Opt. Mem. Neur. Networks (Information Optics). 2009. Vol. 18, № 1. P. 6–14.
11. *Vogt W. C., Shen H., Wang G., Rylander C. G.* Parametric study of tissue optical clearing by localized mechanical compression using combined finite element and Monte Carlo simulation // J. Innov. Opt. Health Sci. 2010. Vol. 3, № 3. P. 203–211.
12. *Izquierdo Roman A., Vogt W. C., Hyacinth L., Rylander C. G.* Mechanical tissue optical clearing technique increases imaging resolution and contrast through *ex vivo* porcine skin // Laser Surg. Med. 2011. Vol. 43. P. 814–823.
13. *Gurjarpadhye A., Vogt W. C., Liu Y., Rylander C. G.* Effect of localized mechanical indentation on skin water content evaluated using OCT // Int. J. Biomed. Imaging. 2011. Vol. 2011. P. 817250.
14. *Lim L. A., Nichols B., Rajaram N., Tunnell J. W.* Probe pressure effects on human skin diffuse reflectance and fluorescence spectroscopy measurements // J. Biomed. Opt. 2011. Vol. 16, № 1. P. 011012.
15. *Vogt W. C., Izquierdo-Roman A., Nichols B., Lim L., Tunnell J. W., Rylander C. G.* Effects of mechanical indentation on diffuse reflectance spectra, light transmission, and intrinsic optical properties in *ex vivo* porcine skin // Laser Surg. Med. 2012. Vol. 44. P. 303–309.
16. *Cugmas B., Bürmena M., Bregar V., Pernuša F., Likar B.* Pressure-induced near infrared spectra response as a valuable source of information for soft tissue classification // J. Biomed. Opt. 2013. Vol. 18, № 4. P. 047002.
17. *Li C., Jiang J., Xu K.* The variations of water in human tissue under certain compression : studied with diffuse reflectance spectroscopy // J. Innov. Opt. Health Sci. 2013. Vol. 6, № 1. P. 1350005.
18. *Нахаева И. А., Мохаммед М. Р., Зюрюкина О. А., Синичкин Ю. П.* Влияние внешней механической компрессии на оптические свойства кожной ткани *in vivo* // Опт. и спектр. 2014. Т. 117, № 3. С. 522.

19. *Нахаева И. А., Зюрюкина О. А., Мохаммед М. Р., Синичкин Ю. П.* Влияние внешней механической компрессии на содержание воды в кожной ткани человека *in vivo* // Опт. и спектр. 2015. Т. 118, № 5. С. 152–159.
20. *Зюрюкина О. А., Синичкин Ю. П.* Динамика оптических и физиологических свойств кожи человека in vivo в процессе ее компрессии // Опт. и спектр. 2019. Т. 127, № 3. С. 498–506.
21. *Xu X., Wang R. K.* The role of water desorption on optical clearing of biotissue: Studied with near infrared reflectance spectroscopy // Med. Phys. 2003. Vol. 30, № 6. P. 1246–1253.
22. *Xu X., Wang R. K.* Synergistic effect of hyperosmotic agents of dimethyl sulfoxide and glycerol on optical clearing of gastric tissue studied with near infrared spectroscopy // Phys. Med. Biol. 2004. Vol. 49. P. 457–468.
23. *Hardisty M. R., Kienle D. F., Kuhl T. L., Stover S. M., Fyhrie D. P*. Strain-induced optical changes in demineralized bone // J. Biomed. Opt. 2014. Vol. 19, № 3. P. 035001.
24. *Genina E. A., Bashkatov A. N., Korobko A. A., Zubkova E. A., Tuchin V. V., Yaroslavsky I., Altshuler G. B.* Optical clearing of human skin: comparative study of permeability and dehydration of intact and photothermally perforated skin // J. Biomed. Opt. 2008. Vol. 13, № 2. P. 021102.
25. *Долотов Л. Е., Синичкин Ю. П.* Особенности применения волоконно-оптических датчиков в спектральных измерениях биологических тканей // Опт. и спектр. 2013. Т. 15, № 2. С. 40–46.
26. *Schmitt J. M., Kumar G.* Optical scattering properties of soft tissue : a discrete particle model // Appl. Opt. 1998. Vol. 37, № 13. P. 2788–2797.
27. *Швачкина М. Е., Яковлев Д. Д., Лазарева Е. Н., Правдин А. Б., Яковлев Д. А.* Мониторинг процесса иммерсионного оптического просветления коллагеновых волокон с помощью оптической когерентной томографии // Опт. и спектр. 2019. Т. 127, № 2. С. 337–346.
28. *Farrell T. J., Patterson M. S., Wilson B.* A diffuse theory model of spatially resolved, steady-state diffuse reflectance for the noninvasive determination of tissue optical properties *in vivo* // Med. Phys. 1992. Vol. 19. P. 879–888.

Образец для цитирования:

Зюрюкина О. А., Синичкин Ю. П. Дегидратация биотканей в процессе их компрессии // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2020. Т. 20, вып. 2. С. 92–102. DOI: https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-2-92-102

Dehydration of Biotissues During Their Compression

O. A. Zyuryukina, Yu. P. Sinichkin

Ol'ga A. Zyuryukina, https://orcid.org/0000-0003-0780-555X, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, oazyuryukina@yandex.ru

Yury P. Sinichkin, https://orcid.org/0000-0001-7554-5038, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, yusin49@gmail.com

Background and Objectives: Dehydration of tissue is one of the possible mechanisms of mechanical tissue optical clearing. In this study we investigated the effects of dehydration of *ex vivo* cow muscle tissue samples during their compression on diffuse reflectance spectra of the tissue. The purpose of research was to identify the correlation between the diffuse reflectance of the tissue and its dehydration. **Materials and Methods**: The dehydration of tissue samples of 20×20×20 mm^3 in size was carried out by drying the samples for 17 hours and the dehydration of cylindrical tissue samples with diameter 20 mm and thickness of 25 mm was carried by compressing the samples in a specially designed cell with a nozzle on a fiber optic sensor. In the first case the samples were weighed every hour and the diffuse reflectance spectrum was recorded. In the second case the compression value changed every 6 minutes, before which the samples were weighed and the diffuse reflectance spectrum was also recorded. **Results**: The dynamics of the reduced weight of the samples both in the dying process and in the compression process were determined. At the end of the drying process, the weights of the samples decreased by 70%. This value corresponded to the degree of hydration of the samples before the experiments. When the pressure on the sample was about 110 kPa, the weights of the samples decreased by 45%. The maximum degree of dehydration of the samples during compression was about 50%. The dehydration of the samples during their drying was accompanied by an increase in their diffuse reflectance. On the contrary, the application of compression led to a decrease in the diffuse reflectance according to a two-exponential law, which is may be explained by the difference in the physical structures of the dehydrated samples. **Conclusion**: The processes of reducing the diffuse reflectance of the sample and its weight during compression correlate well. As a result, the analysis of changes in the diffuse reflectance of the tissue sample as a result of its compression allows us to evaluate changes in the hydration of the sample. The choice of the wavelength of the probe light can give not only a qualitative, but also quantitative agreement between the two processes.

Keywords: muscul tissue, dehydration, compression, diffuse reflection, optical clearing.

Received: 12.02.2020 / Accepted: 05.03.2020 / Published: 01.06.2020

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

Acknowledgements*: *This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 19-32-90177).

References

1. Tuchin V. V. *Optical clearing of tissues and blood*. Bellingham, WA, USA, SPIE Press, 2005, vol. PM 154. 254 p.
2. Rylander C. G., Stumpp O. F., Milner T. E., Kemp N. J., Mendenhall J. M., Diller K. R., Welch A. J. Dehydration mechanism of optical clearing in tissue. *J. Biomed. Opt.*, 2006, vol. 11, no. 4, pp. 041117.

3. Chan E. K., Sorg B., Protsenko D., O'Neil M., Motamedi M., Welch A. J. Effects of compression on soft tissue optical properties. *IEEE J. Select. Top. Quant. Electron*., 1996, vol. 2, no. 4, pp. 943–950.
4. Sinichkin Yu. P., Utz S. R., Pilipenko H. A. Spectroscopy of the human sin *in vivo*: 1. Reflectance spectra. *Opt. and Spect*., 1996, vol. 80, no. 2, pp. 260–267.
5. Shangguan H., Prahl S. A., Jacques S. L., Casperson L. W., Gregory K.W. Pressure effects on soft tissues monitored by changes in tissue optical properties. *Proc. SPIE*., 1998, vol. 3254, pp. 366–371.
6. Chen W., Liu R., Xu K., Wang R. K Influence of contact state on NIR diffuse reflectance spectroscopy *in vivo*. *J. Phys. D*, 2005, vol. 38, pp. 26913695.
7. Reif R., Amorosino M. S., Calabro K. W., A'Amar O., Singh K. S., Bigio I. J. Analysis of change in reflectance measurements on biological tissues subjected to different probe pressures. *J. Biomed. Opt*., 2008, vol. 13, no. 1, pp. 010502.
8. Ti Y., Lin W.C. Effects of probe contact pressure on *in vivo* optical spectroscopy. *Opt. Express*, 2008, vol. 16, no. 6, pp. 4250–4262.
9. Rylander C. G., Milner T. E., Baranov S. A., Nelson J. S. Mechanical tissue optical clearing devices: Enhancement of light penetration in ex vivo porcine skin and adipose tissue. *Laser Surg. Med*., 2008, vol. 40, no. 10, pp. 688–694.
10. Delgado Atencio J. A., Orozco Guillen E. E., Vazquezy Montiel S., Cunill Rodríguez M., Castro Ramos J., Gutiérrez J. L., Martínez F. Influence of probe pressure on human skin diffuse reflectance spectroscopy measurements. *Opt. Mem. Neur. Networks (Information Optics)*, 2009, vol. 18, no. 1, pp. 6–14.
11. Vogt W. C., Shen H., Wang G., Rylander C. G. Parametric study of tissue optical clearing by localized mechanical compression using combined finite element and Monte Carlo simulation. *J. Innov. Opt. Health Sci*., 2010, vol. 3, no. 3, pp. 203–211.
12. Izquierdo Roman A., Vogt W. C., Hyacinth L., Rylander C. G. Mechanical tissue optical clearing technique increases imaging resolution and contrast through *ex vivo* porcine skin. *Laser Surg. Med*., 2011, vol. 43, pp. 814–823.
13. Gurjarpadhye A., Vogt W. C., Liu Y., Rylander C. G. Effect of localized mechanical indentation on skin water content evaluated using OCT. *Int. J. Biomed. Imaging*, 2011, vol. 2011, pp. 817250.
14. Lim L. A., Nichols B., Rajaram N., Tunnell J. W. Probe pressure effects on human skin diffuse reflectance and fluorescence spectroscopy measurements. *J. Biomed. Opt*., 2011, vol. 16, no. 1, pp. 011012.
15. Vogt W. C., Izquierdo-Roman A., Nichols B., Lim L., Tunnell J. W., Rylander C. G. Effects of mechanical indentation on diffuse reflectance spectra, light transmission, and intrinsic optical properties in *ex vivo* porcine skin. *Laser Surg. Med*., 2012, vol. 44, pp. 303–309.
16. Cugmas B., Bürmena M., Bregar V., Pernuša F., Likar B. Pressure-induced near infrared spectra response as a valuable source of information for soft tissue classification. *J. Biomed. Opt*., 2013, vol. 18, no. 4, pp. 047002.
17. Li C., Jiang J., Xu K. The variations of water in human tissue under certain compression: studied with diffuse reflectance spectroscopy. *Journal of Innovative Optical Health Sciences*, 2013, vol. 6, no. 1, pp. 1350005.
18. Nakhaeva I. A., Mohammed R. M., Zyuryukina O. A., Sinichkin Yu. P. Effect of external mechanical pressure on optical properties of the human skin *in vivo. Opt. and Spectrosc*., 2014, vol. 117, no. 3, pp. 506–512.
19. Nakhaeva I. A., Zyuryukina O. A., Mohammed R. M., Sinichkin Yu. P. The effect of external mechanical compression on *in vivo* water content in human skin. *Opt. and Spectr*., 2015, vol. 118, no. 5, pp. 834–840.
20. Zyuryukina O. A., Sinichkin Yu. P. The dynamics of optical and physiological characteristics of human skin *in vivo* during its compression. *Opt. and Spectr*., 2019, vol. 127, no. 3, pp. 555–561.
21. Xu X., Wang R. K. The role of water desorption on optical clearing of biotissue: Studied with near infrared reflectance spectroscopy. *Med. Phys*., 2003, vol. 30, no. 6, pp. 1246–1253.
22. Xu X., Wang R. K. Synergistic effect of hyperosmotic agents of dimethyl sulfoxide and glycerol on optical clearing of gastric tissue studied with near infrared spectroscopy. *Phys. Med. Biol*., 2004, vol. 49, pp. 457–468.
23. Hardisty M. R., Kienle D. F., Kuhl T. L., Stover S. M., Fyhrie D. P. Strain-induced optical changes in demineralized bone. *Journal of Biomedical Optics*, 2014, vol. 19, no. 3, pp. 035001.
24. Genina E. A., Bashkatov A. N., Korobko A. A., Zubkova E. A., Tuchin V. V., Yaroslavsky I., Altshuler G. B. Optical clearing of human skin: comparative study of permeability and dehydration of intact and photothermally perforated skin. *J. Biomed. Opt*., 2008, vol. 13, no. 2, pp. 021102.
25. Dolotov L. E., Sinichkin Yu. P. Features of fiber optic probes applications in tissues spectral measurements. *Optics and Spectroscopy*, 2013, vol. 115, no. 2, pp. 40–46.
26. Schmitt J. M., Kumar G. Optical scattering properties of soft tissue: a discrete particle model. *Appl. Opt*., 1998, vol. 37, no. 13, pp. 2788–2797.
27. Shvachkina M. E., Yakovlev D. D., Lazareva E. N., Pravlin A. B., Yakovlev D. A. Monitoring of the process of immersion optical clearing of collagen bundles using optical coherence tomography. *Opt. and Spectr*., 2019, vol. 127, no. 2, pp. 359–367.
28. Farrell T. J., Patterson M. S., Wilson B. A diffuse theory model of spatially resolved, steady-state diffuse reflectance for the noninvasive determination of tissue optical properties *in vivo*. *Med. Phys*., 1992, vol. 19, pp. 879–888.

Cite this article as:

Zyuryukina O. A., Sinichkin Yu. P. Dehydration of Biotissues During Their Compression. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2020, vol. 20, iss. 2, pp. 92–102 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-2-92-102

УДК 621.384.3:61

Детектирование активности единичных потовых желез методом макротермографии и ее взаимосвязь с температурой кожи и периферической гемодинамикой

А. А. Сагайдачный, Д. И. Майсков, И. С. Залетов, А. В. Фомин, Ан. В. Скрипаль

Сагайдачный Андрей Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры медицинской физики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, andsag@yandex.ru

Майсков Дмитрий Игоревич, аспирант кафедры медицинской физики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, dmayskov@gmail.com

Залетов Иван Сергеевич, аспирант кафедры медицинской физики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, izaletov25@gmail.com

Фомин Андрей Владимирович, кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры медицинской физики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, 89050344175@bk.ru

Скрипаль Анатолий Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой медицинской физики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, skripalav@info.sgu.ru

Описан способ термографического анализа реакции потовых желез пальцев рук, основанный на подсчете количества открытых потовых пор как функции времени. Показана возможность одновременного анализа количества потовых желез, активизирующихся на левой и правой руках в ответ на дыхательную пробу. Проведено сопоставление динамики температуры, количества открытых потовых пор и колебаний объемного кровотока. Активность выводных протоков потовой железы приводит к появлению низкоамплитудных высокочастотных колебаний температуры кожи (частота более 0.1 Гц), колебание кровотока – напротив, к появлению высокоамплитудных, низкочастотных колебаний температуры кожи, возникающих с некоторым запаздыванием. Диагностический потенциал описанного метода обусловлен тем, что динамика активности потовых желез связана с деятельностью симпатической нервной системы, поэтому снижение количества открытых потовых пор в ответ на функциональную нагрузку может свидетельствовать о поражении малых нервных волокон и периферической нейропатии, развивающейся уже на ранних стадиях ряда эндокринологических и метаболические патологий, например сахарного диабета.

Ключевые слова: термография, потовые железы, потовые поры, кровоток, нейропатия, асинхронность, фильтрация, сахарный диабет.

Поступила в редакцию: 19.02.2020 / Принята: 25.03.2020 / Опубликована: 01.06.2020

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

DOI: https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-2-103-115

Введение

Интерес к изучению потовых желез человека обусловлен тесной взаимосвязью их активности с симпатической иннервацией периферических областей тела человека [1, 2]. Повышение активности потовых желез и выделение секрета происходит не только вследствие терморегуляции, но также является ответом на психоэмоциональную нагрузку и ряд физиологических и медикаментозных проб [3]. Известна тесная взаимосвязь активности потовых желез и кожно-гальванической реакции, используемой в полиграфических исследованиях как показатель психического напряжения [4–9].

Нарушение деятельности потовых желез проявляется при таких патологиях, как сахарный диабет, хроническая сердечная недостаточность, гипергидроз, тиреотоксикоз, и болезнь Паркинсона [10–13]. В настоящее время для оценки функции потовых желез в реальном времени наиболее широко используется метод регистрации кожно-гальванической реакции при различных воздействиях [5, 14]. Среди оптических методов известен способ анализа потоотделения единичных потовых желез методом оптической когерентной томографии [15], а также метод флуоресцентной микроскопии потовых пор с использованием гидрохромной пленки полидиацетилена [16]. Данные методы обеспечивают либо интегральную оценку продукции секрета потовых желез во времени без

© Сагайдачный А. А., Майсков Д. И., Залетов И. С., Фомин А. В., Скрипаль Ан. В., 2020

привязки к пространственным координатам (кожно-гальваническая реакция), либо локальные измерения, площадь которых ограничена подушечкой фаланги пальца (метод флуоресцентной микроскопии) или единичной потовой железой (метод оптической когерентной томографии). Поэтому поиск новых способов количественного оценивания активности потовых желез и симпатической реакции организма, как во времени, так и в пространстве, представляет интерес для биомедицинской диагностики.

Активизация потовой железы сопровождается выделением пота на поверхность кожи, его испарением в окружающую среду с локальным охлаждением кожи. При этом одним из эффективных способов детектирования активности потовых желез может быть инфракрасная термография. Использование инфракрасных изображений для визуализации открытых потовых пор стало возможным только с середины 1980-х гг. вместе с повышением амплитудного и пространственного разрешений термограмм [17]. Цифровая обработка инфракрасных изображений позволила открыть ряд новых физиологических эффектов и описать регуляторные реакции во время физических, тепловых и психических нагрузок [13, 18–20].

Применение автоматического метода подсчета количества открытых потовых пор на основе согласованной фильтрации термограмм с использованием квази-гауссиана [21] приводило к пропуску открытых потовых пор. Поэтому задача разработки альтернативных способов цифровой обработки термограмм с целью определения количества открытых потовых пор на поверхности тела человека представляется актуальной.

Целью данной работы является разработка метода детектирования и подсчета количества потовых пор, основанного на построении карты локальных минимумов термограммы с применением адаптивной бинаризации, а также демонстрация гемодинамических эффектов, сопровождающих активацию потовых желез.

1. Материалы и методы

1.1. Регистрация данных

Группу испытуемых составили 10 добровольцев (7 мужчин и 3 женщины в возрасте 20–35 лет) без диагностированных нарушений потоотделения и патологий сердечнососудистой системы. Все измерения проводились одновременно на волярной поверхности дистальных фаланг указательных пальцев левой и правой руки. Первичные термографические данные (рис. 1) записывались с помощью тепловизионной камеры ThermaCam SC 3000, FLIR Systems (Швеция) с макролинзой 34/100, в спектральном диапазоне 8–9 мкм с температурной чувствительностью 0.02°C, разрешением изображения 320 × 240 пикселей с частотой дискретизации 5 кадров/с. Площадь анализируемой поверхности фаланг пальцев оставалась постоянной и имела значение 4 см^2, что обеспечивало пространственное разрешение около 80 мкм/пиксель. Измерения выполнялись в лабораторных условиях при стабильной температуре окружающей среды 23±0.2°C и отсутствии форсированной конвекции. Одновременно с температурными измерениями выполнялся контроль объемного кровотока на дистальной фаланге среднего пальца правой руки с помощью фотоплетизмографического датчика KL-72001 (Тайвань) на длине волны 800 нм.

1.2. Функциональная нагрузка

В качестве нагрузочной пробы применяли дыхательную пробу, заключающуюся в кратковременной задержке дыхания на максимальной высоте вдоха [22, 23]. Проба состояла из 5 вдохов, до и после очередного вдоха выдерживался интервал 30 с при общей длительности теста 180 с.

1.3. Алгоритм подсчета количества активированных потовых желез

Задачами алгоритма являются: обработка последовательности термографических изображений посредством детектирования каждой поры; подсчет их общего количества на термограмме; построение зависимости количества активных потовых пор от времени. Область выхода на поверхность выводных протоков потовых желез (потовые поры) отличается пониженной температурой по отношению к фону, т.е. пониженной яркостью изображения. Выделению отдельных потовых пор с помощью выбора одного и того же порога яркости препятствует наличие низкочастотных и высокочастотных пространственных помех на термограмме (см. профиль на рис. 1, *в*). Низкочастотная пространственная помеха образуется за счет неоднородного распределения температуры кожи, высокочастотная помеха – преимущественно за счет рельефа кожи и пространственного шума матрицы.

В процессе реализации алгоритма детектирования потовых пор на поверхности термограмм

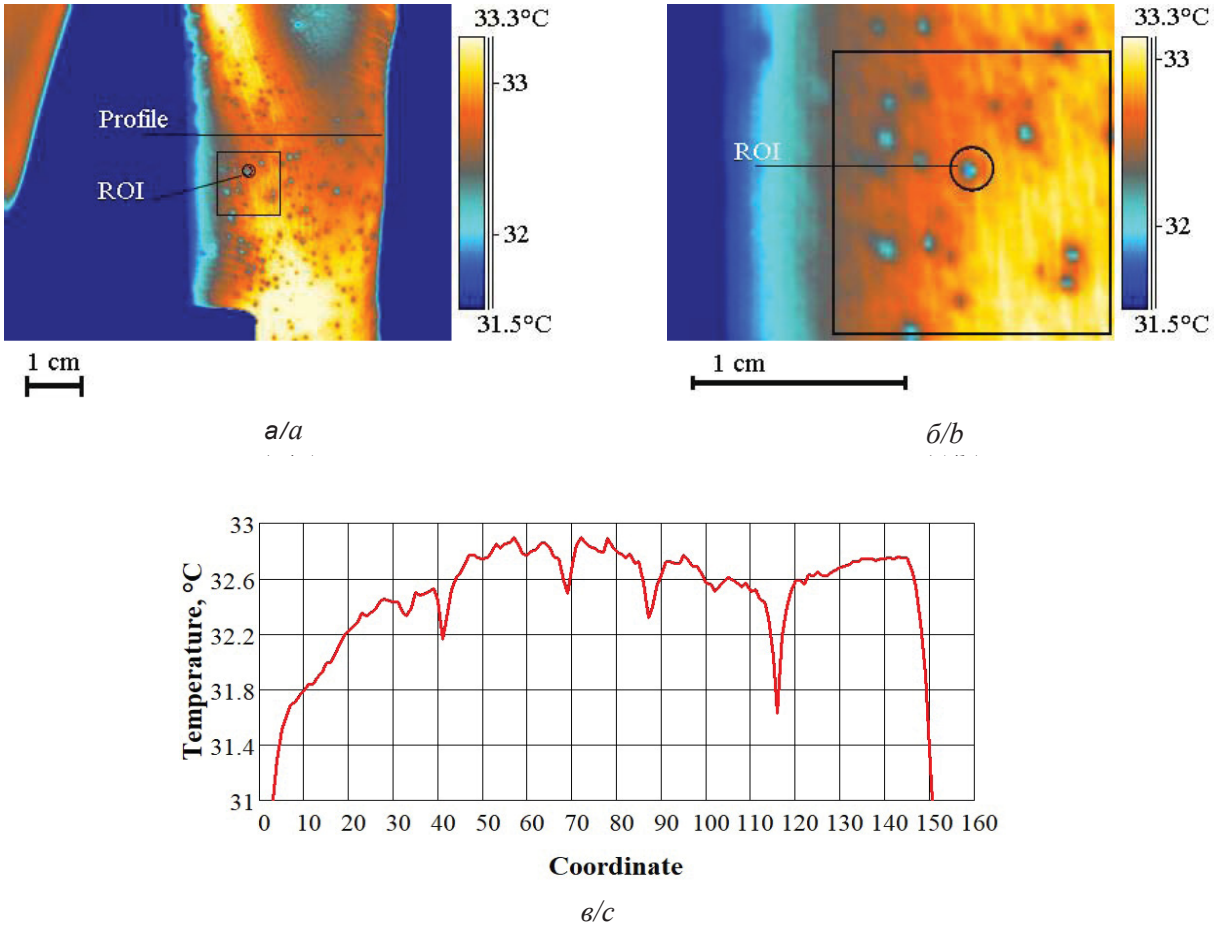


Рис. 1. Визуализация открытых потовых пор методом термографии: *а* – термограмма средней фаланги пальца; *б* – увеличенный участок термограммы на рисунке *а*; *в* – температурный профиль, изображенный на термограмме (*а*)

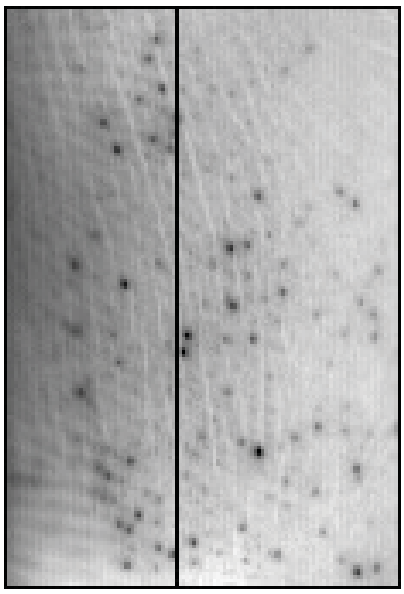
Fig. 1. Visualization of open sweat pores via thermography techniques: *a* – thermogram of the middle phalanx of a finger; *b* – enlarged fragment of the thermogram in figure *a*; *c* – temperature profile shown on the thermogram (*a*)

необходимо подавить низко- и высокочастотную составляющие температуры и определить координаты локальных минимумов, соответствующих потовым порам. Таким образом, используемый алгоритм детектирования потовых пор реализуется посредством выполнения трех этапов.

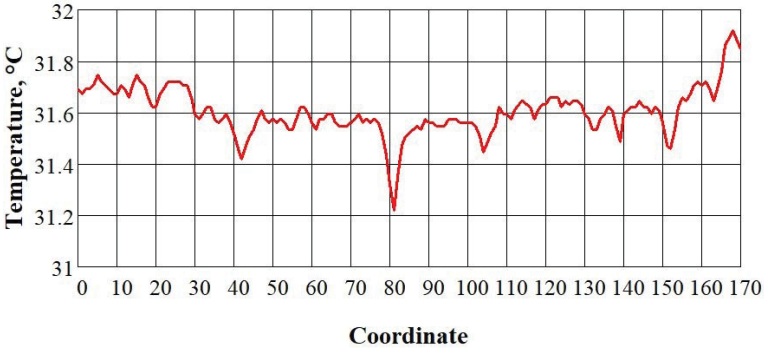
1. Подавление низкочастотной составляющей выполнялось посредством сглаживания исходного изображения методом Гаусса (рис. 2, *а*) и вычитания сглаженного изображения из исходного. Полученное изображение линейно масштабировалось в диапазоне значений [0, 255] (рис. 2, *г*). В результате преобразований гистограмма изображения принимала вид нормального распределения (рис. 2, *е*).

2. Подавление высокочастотной составляющей. Амплитудная фильтрация. Порог амплитудной фильтрации выбирался с помощью построения гистограммы и определения уровня яркости, располагающегося левее максимума гистограммы, на высоте, равной половине максимального значения гистограммы (рис. 2, *и*). Изображение разбивалось на ячейки 5×5 пикселей. Если среднее значение пикселей в ячейке выше порогового, то интенсивность всех пикселей данной ячейки приравнивалась порогу. Ячейки со средним значением интенсивности меньшим или равным порогу оставлялись без изменений. Тем самым устранялись пиксели с температурой выше средней по анализируемой области и пиксели, температура которых близка к средней. В результате формировалось изображение (рис. 2, *ж*), на котором выделялись ячейки с высокой вероятностью содержащие локальные минимумы.

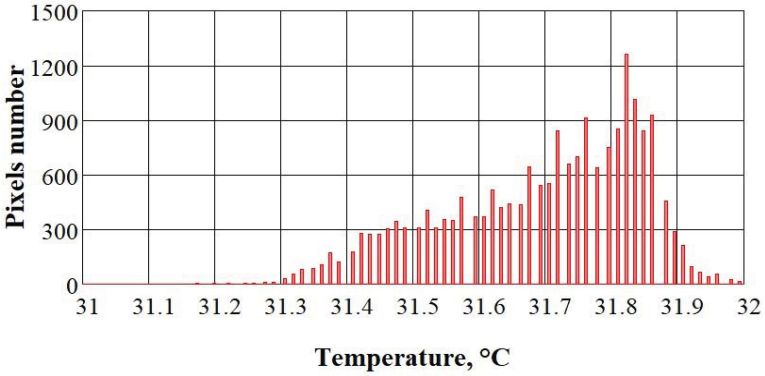
3. Построение карты локальных минимумов. В каждой ячейке проводился поиск минимумов, соответствующих условию: $I_{i-1} \geq I_i < I_{i-1}$, $I_{i-1} > I_i \leq I_{i-1}$, $I_{i-1} > I_i < I_{i-1}$, где I_i – значение интен-



а/a

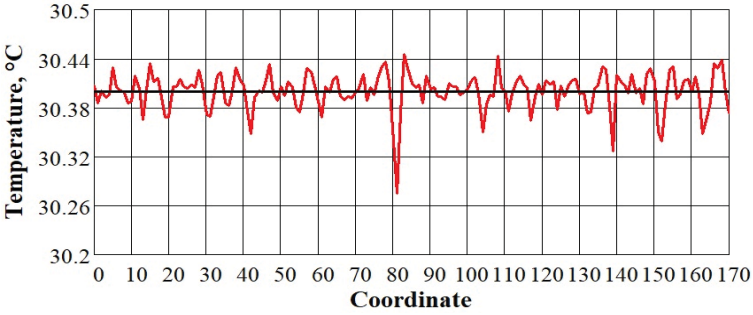


б/b

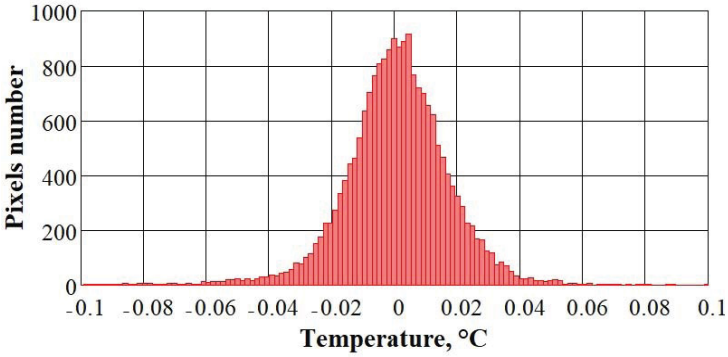


в/c

г/d



д/e



e/f

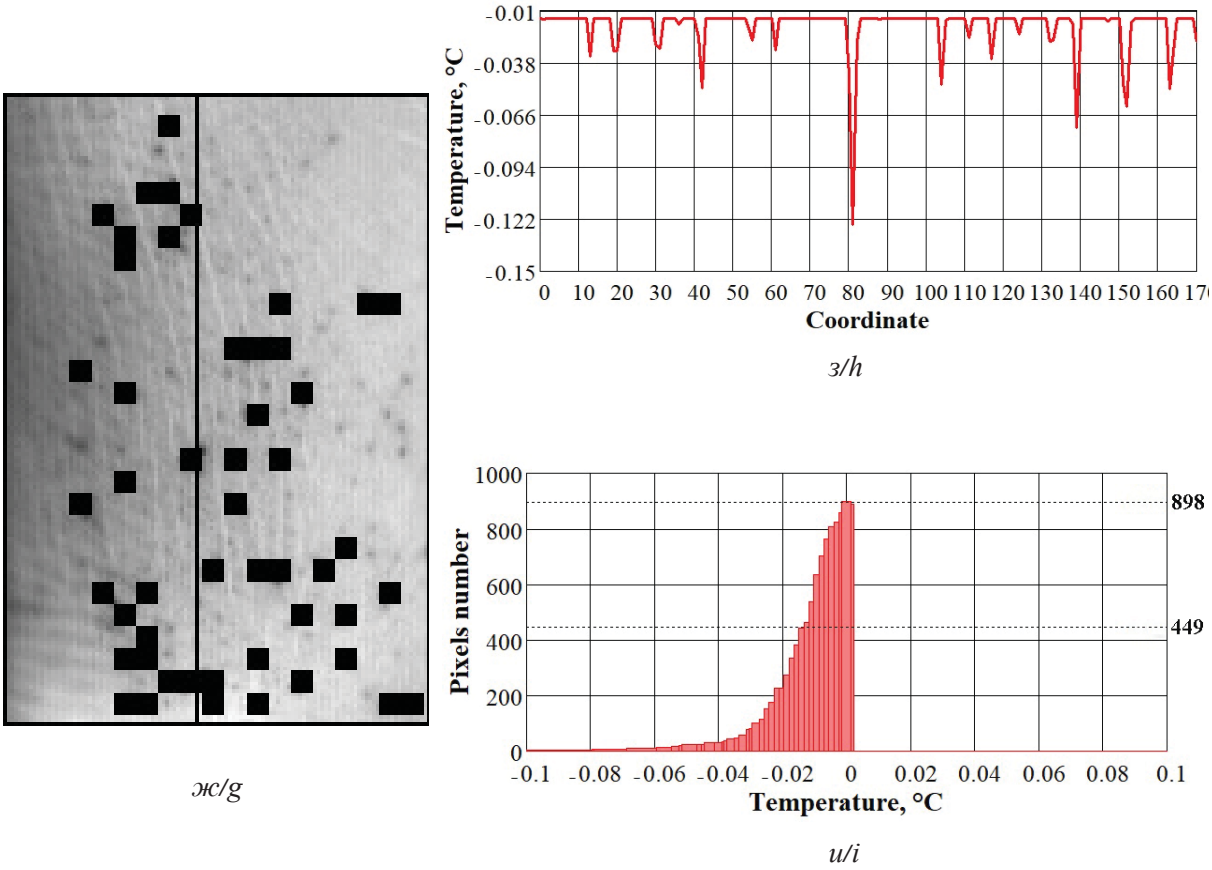


Рис. 2. Иллюстрация этапов алгоритма детектирования потовых пор на термограмме. Слева представлены термограммы, полученные на различных этапах обработки, справа – соответствующие профиль и гистограмма распределения температуры на термограмме, а именно: *а* – исходная термограмма потовых пор; *б* – профиль изменения температуры, отмеченный на рисунке *а* вертикальной линией; *в* – гистограмма распределения температуры на рисунке *а*; *г* – термограмма с удаленной низкочастотной составляющей изменения температуры; *д* – профиль изменения температуры, отмеченный на рисунке *г* вертикальной линией; *е* – гистограмма распределения температуры на рисунке *г*; *ж* – термограмма с выделенными черными областями, которые с высокой вероятностью содержат открытые потовые поры; *з* – профиль изменения температуры, отмеченный на рисунке *ж* вертикальной линией; *и* – гистограмма распределения температуры на рисунке *ж*

Fig. 2. Illustration of the steps of the algorithm for detecting sweat pores on a thermogram. To the left are images obtained at different processing steps, to the right are the corresponding profile and histogram of the temperature distribution on the thermogram, namely: *a* – original thermogram of sweat pores; *b* – temperature change profile marked in figure *a* as a vertical line; *c* – histogram of the temperature distribution in figure *a*; *d* – thermogram without a low-frequency component of the temperature change; *e* – temperature change profile shown in figure *d* as a vertical line; *f* – histogram of the temperature distribution in figure *d*; *g* – thermogram with highlighted black areas that are highly likely to contain open sweat pores; *h* – temperature change profile marked with a vertical line in figure *g*; *i* – histogram of the temperature distribution in figure *g*

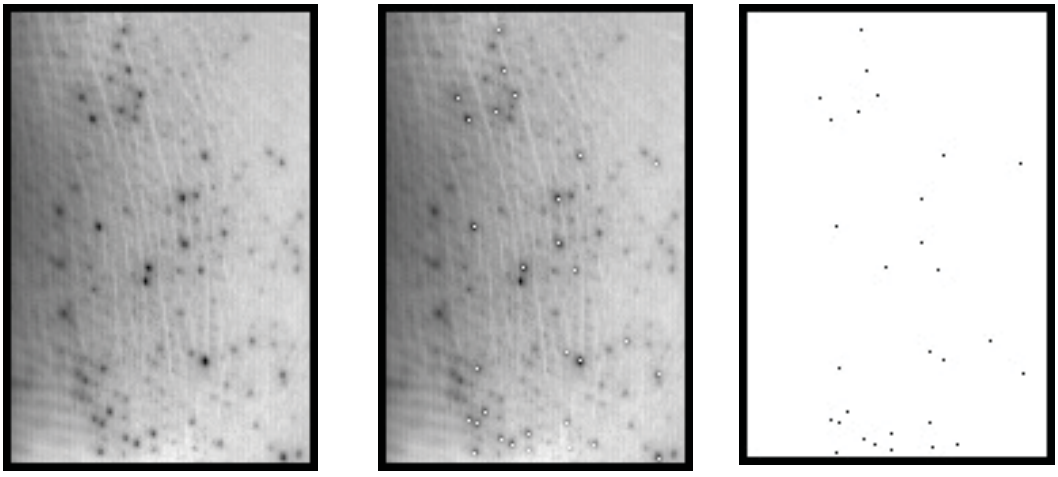
сивности текущего i-того пикселя, I_{i-1} – значение интенсивности предыдущего i - первого пикселя, I_{i+1} – значение интенсивности последующего i + первого пикселя. Строилась карта локальных минимумов (рис. 3) и подсчитывалось их количество на анализируемом кадре. Таким образом, дополнительно к кривой температуры строилась кривая количества открытых потовых пор от времени.

2. Результаты

2.1. Динамика активности потовых желез, контралатеральная асимметрия

Применение описанного выше алгоритма позволило детектировать открытые потовые поры на инфракрасных термограммах (рис. 3).

Пример типичной зависимости количества открытых потовых пор от времени на контрала-



а/a *б/b* *в/c*

Рис. 3. Пример термограммы с найденными открытыми потовыми порами: *а* – исходная термограмма; *б* – обнаруженные открытые потовые поры; *в* – карта локальных минимумов, соответствующая обнаруженным потовым порам

Fig. 3. Example of a thermogram with detected sweat pores: *a* – origin thermogram; *b* – detected open sweat pores; *c* – local minima map corresponding to the detected sweat pores

теральных конечностях при проведении дыхательной пробы приведен на рис. 4. Зависимости демонстрируют резкое увеличение количества открытых потовых пор после совершения каждого дыхательного маневра с восстановлением исходного состояния в течение 30 с. В группе нормальных испытуемых не наблюдалось синхронности изменения количества активных потовых пор на пальцах левой и правой руки. При этом реакция в виде повышения количества открытых потовых пор проявлялась на обеих конечностях.

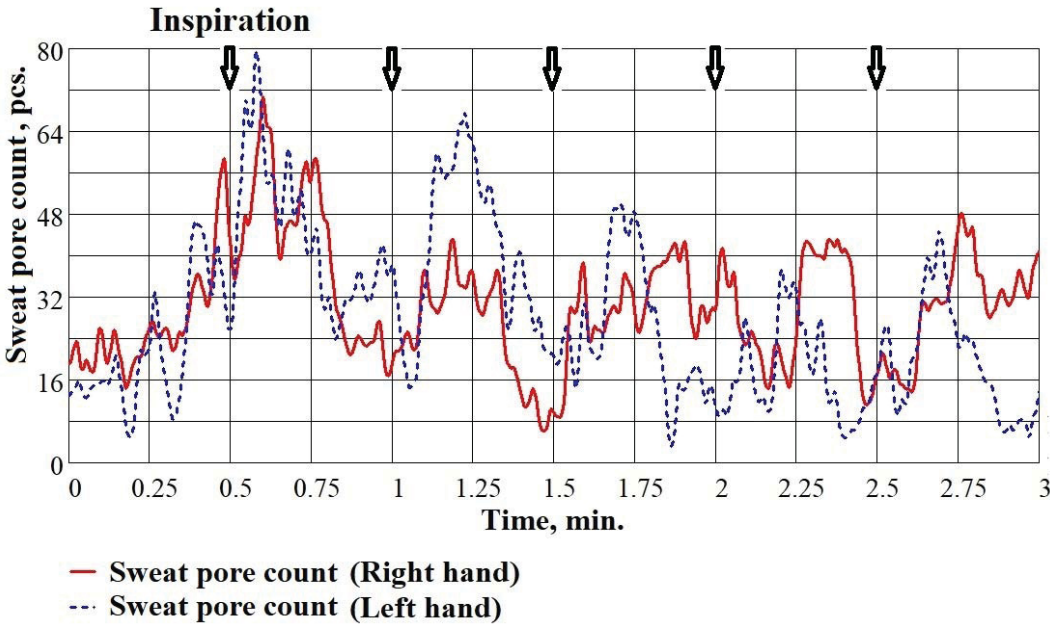


Рис. 4. Зависимость количества активных потовых пор от времени проведения дыхательной пробы в пальцах левой и правой руки

Fig. 4. Dependence of the active sweat pore count on the respiratory test time in the fingers of the left and right hands

2.2. Динамика температуры кожи и количества активных потовых пор

Во время проведения дыхательной пробы после каждого глубокого вдоха происходит плавное уменьшение температуры кожи с образованием локальных минимумов (рис. 5). Локальные минимумы появлялись с некоторым запаздыванием около 15 с относительно момента совершения каждого вдоха. Минимумы температуры кожи отставали по времени относительно положения максимумов количества открытых потовых пор несмотря на то, что выделение и испарение пота должно было приводить к одновременному понижению температуры. По всей видимости, динамика средней температуры кожи рук в большей степени подвержена влиянию объемного кровотока, чем испарению пота. Вклад локального охлаждающего воздействия открытых потовых пор на кожу недостаточен для заметного понижения средней температуры фаланги пальца синхронно с увеличение количества открытых потовых пор.

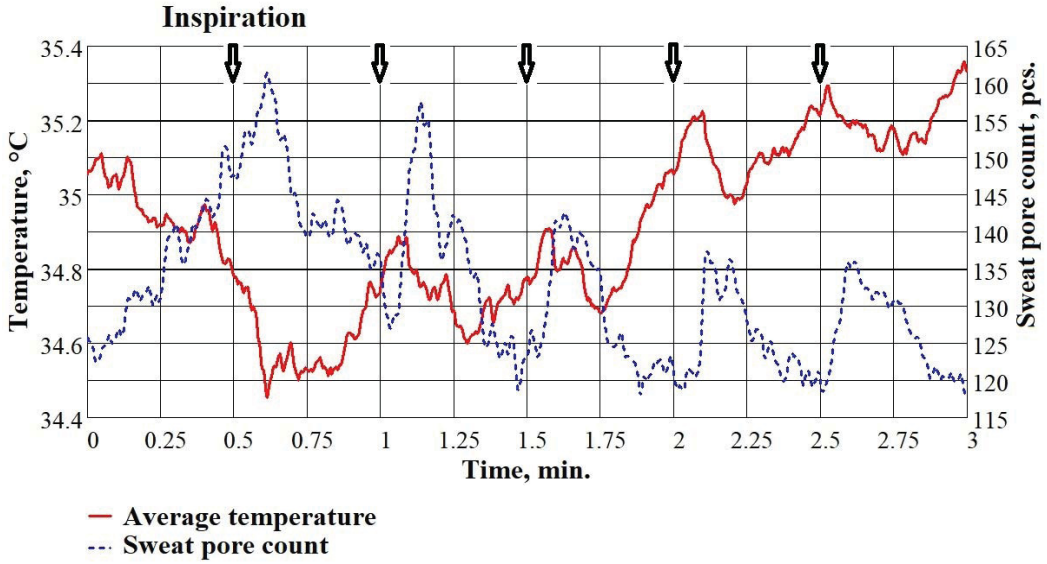


Рис. 5. Динамика количества потовых пор и температуры фаланг пальцев при совершении вдохов в моменты времени 0.5, 1, 1.5, 2 и 2.5 мин

Fig. 5. Dynamics of the sweat pore count and of the temperature of the fingers phalanges during inspiration at the times 0.5, 1, 1.5, 2, and 2.5 min

2.3. Соотношение между активацией потовых желез и динамикой объемного кровенаполнения биоткани

После каждого глубокого вдоха происходило резкое уменьшение объемного кровенаполнения пальцев с образованием локальных минимумов (рис. 6). При этом время появления локальных минимумов объемного кровотока приблизительно совпадало с временем появления локальных максимумов количества открытых потовых пор. Локальные минимумы температуры после каждого вдоха запаздывали относительно колебаний объемного кровенаполнения сосудов кожи (рис. 7).

3. Обсуждение

Использование алгоритма обработки термограмм, реализующего подавление низкочастотных и высокочастотных пространственных составляющих колебаний температуры, и последующее обнаружение локальных минимумов дают возможность с помощью метода инфракрасной термографии исследовать не только динамику температуры, обусловленную гемодинамикой, но и активность потовых желез.

3.1. Контралатеральная динамика активности потовых желез

Анализ термограмм противоположных конечностей во время проведения дыхательных маневров (см. рис. 4) демонстрирует отсутствие синхронности в изменении количества открытых потовых пор. Последнее может найти объяснение, например, в индивидуальном характере иннервации пальцев левой и правой конечности одного и того же испытуемого; в контралатераль-

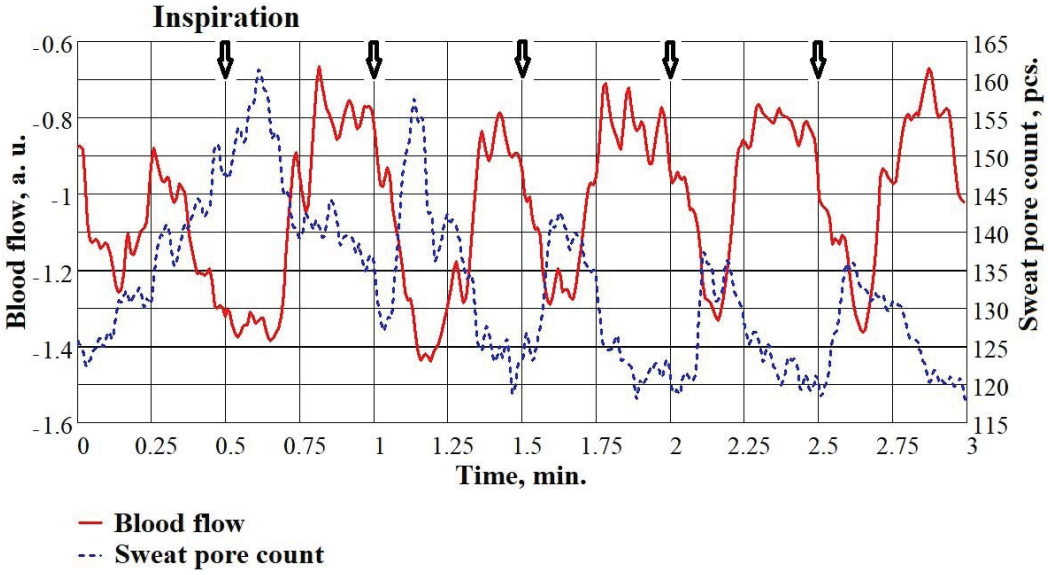


Рис. 6. Зависимость количества открытых потовых пор и объемного кровотока в пальцах от времени дыхательной пробы

Fig. 6. Dependences of the open sweat pore count and of the volumetric blood flow in the fingers on the respiratory test time

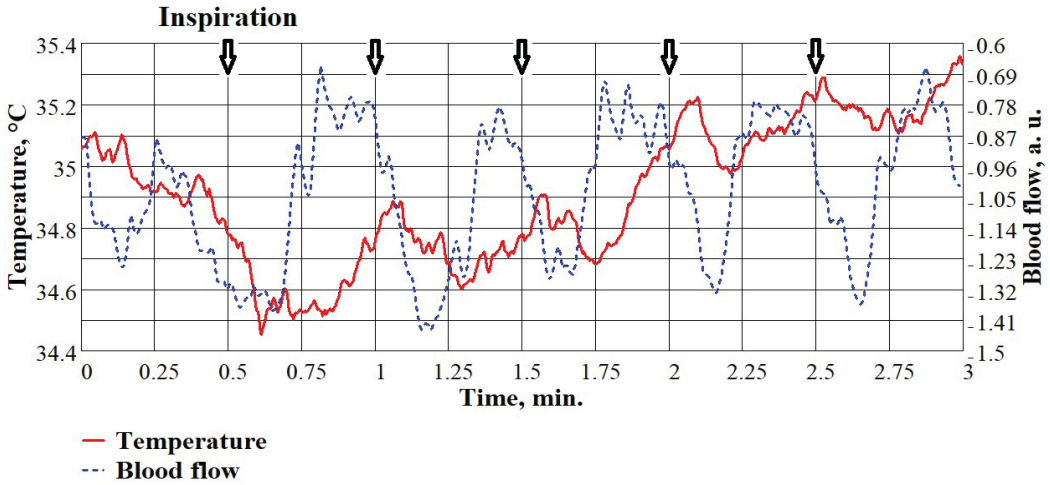


Рис. 7. Зависимость температуры и объемного кровотока в пальцах от времени дыхательной пробы

Fig. 7. The temperature and volumetric blood flow in the fingers vs. the respiratory test time

ном различии скорости реализации центрального рефлекса за счет местных нейро- и биохимических реакций; в отличие функциональной восприимчивости холинергических нервных волокон, иннервирующих потовые железы, в области правой и левой конечности. Обнаружение значительной асимметрии в активности потовых желез на левой и правой конечности, а также в областях иннервации медиального, лучевого и локтевого нервов можно будет рассматривать как признак нарушения симпатической иннервации конечности, которая характерна, например, для диабетической нейропатии. При диабетической нейропатии происходит демиелинизация нервных волокон под воздействием повышенной концентрации сахара в крови, нарушается функциональная активность нервных волокон различного типа, в том числе иннервирующих потовые железы [24]. При этом нарушение функциональной активности малых нервных волокон проявляется уже на ранних стадиях диабетической нейропатии [25, 26]. Таким образом, проведенный анализ показывает, что выявление нарушения активности потовых желез с помо-

щью обработки динамических инфракрасных термограмм в перспективе можно рассматривать в качестве способа диагностики нейропатии на ранних стадиях, а также в качестве способа мониторинга восстановления иннервации в процессе терапии или в послеоперационном периоде нейрохирургических операций.

3.2. Динамика температуры кожи и количества активных потовых пор

Кардинальное различие формы колебаний температуры и количества потовых пор при проведении дыхательной пробы (см. рис. 5) свидетельствует о том, что данные сигналы можно рассматривать в качестве независимых каналов получения физиологической информации. Максимумы количества открытых потовых пор после каждого дыхательного маневра опережают минимумы температуры.

В данном исследовании не изучались спектральные характеристики колебаний температуры под воздействием процесса открытия/закрытия потовых пор и испарения потовой жидкости с поверхности кожи. Из предварительного анализа сигналов следует, что колебания температуры вследствие симпатической активации потовых желез и открытия/закрытия потовых пор могут происходить с достаточно высокой частотой до 0.5 Гц при амплитуде колебаний не ниже чувствительности температурных измерений (0.02°C в данном случае). Указанное значение частоты превышает максимальную частоту детектируемых тепловизором колебаний температуры кожи, обусловленных гемодинамикой.

Как обсуждалось ранее, детектируемые колебания температуры кожи, обусловленные периферической гемодинамикой, имеют частоту не более 0.1 Гц [27–29]. Для регистрации колебаний температуры, обусловленных гемодинамикой, с большими частотами требуется разрешение температурных измерений более 0.01°C, которое в настоящее время недоступно для тепловизионной техники [30].

3.3. Соотношение между активацией потовых желез и динамикой объемного кровенаполнения биоткани

Рост количества открытых потовых пор и падение объемного кровотока при проведении каждого вдоха (см. рис. 6), свидетельствует об одновременной реакции анализируемых физиологических подсистем вследствие передачи импульсов по симпатическим волокнам, иннервирующим как потовые железы, так и кровеносные сосуды [24]. Как было показано ранее, колебания температуры кожи запаздывают относительно колебаний кожного кровотока на величину, зависящую от частоты анализируемого процесса [29, 31]. Эффект запаздывания температуры относительно кровотока после каждого вдоха демонстрирует рис. 7.

Таким образом, влияние дыхательной пробы на температуру кожи оказывается в следующей последовательности: после вдоха повышается количество открытых потовых пор, одновременно понижается амплитуда объемного кровотока; оба этих воздействия приводят к понижению температуры кожи; при этом уменьшение кровотока вносит более существенный, макроскопический вклад в понижение температуры с наличием запаздывания температурной динамики относительно кровотока, увеличение количества потовых пор вносит менее существенный вклад в понижение температуры (см. рис. 5), но без выраженного эффекта запаздывания температурной динамики. Влияние активности потовых пор на среднюю температуру кожи проявляется изолированно лишь в областях выхода на поверхность потовых пор.

Заключение

Использование предложенного алгоритма обработки динамических термограмм конечностей продемонстрировало возможность обнаружения и подсчета количества открытых потовых пор, соответствующее количеству активных потовых желез на исследуемой поверхности кожи испытуемого. Полученные пространственно-временные данные обеспечивают возможность сравнения реакции потовых желез и периферических сосудов на дыхательную пробу, причем одновременно для левой и правой руки. Практическое применение описанного метода продемонстрировало наличие ряда эффектов: асимметрия реакции потовых пор на левой и правой руке; наличие детектируемых колебаний температуры кожи с частотой выше 0.1 Гц, обусловленных активацией потовой железы; симпатическая реакция уменьшения объемного кровотока в пальцах в ответ на дыхательную пробу и, с некоторым запаздыванием, формирование низкочастотных минимумов температуры кожи.

Таким образом, термографическая регистрация реакции конечностей на дыхательную пробу с применением алгоритма детектирования количества потовых пор может позиционироваться в качестве инструмента для получения физиологи-

ческого сигнала, связанного с симпатической реакцией организма на функциональную нагрузку. Метод представляет интерес для превентивного выявления различных форм нейропатии мелких сосудов, например, при сахарном диабете, нарушениях работы щитовидной железы и синдроме Рейно.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-32-90072).

Список литературы

1. *Krishnamurthy N., Mubarak A. S., Sri V. G., Balakumarr B., Srinivasan V.* Influence of respiration on human sympathetic skin response // Indian Journal of Physiology and Pharmacology. 1996. Vol. 40. P. 350–354.
2. *Familoni B. O., Gregor K. L., Dodson T. S., Krzywicki A. T., Lowery Jr B. N., Orr S. P., Rasmusson A. M.* Sweat pore reactivity as a surrogate measure of sympathetic nervous system activity in trauma-exposed individuals with and without posttraumatic stress disorder // Psychophysiology. 2016. Vol. 53, № 9. P. 1417–1428. DOI: 10.1111/psyp.12681
3. *Shibasaki M., Kondo N., Crandall C. G.* Non-thermoregulatory modulation of sweating in humans // Exercise and Sport Sciences Reviews. 2003. Vol. 31, № 1. P. 34–39.
4. *Freedman L. W., Scerbo A. S., Dawson M. E., Raine A., McClure W. O., Venables P. H.* The relationship of sweat gland count to electrodermal activity // Psychophysiology. 1994. Vol. 31, № 2. P. 196–200. DOI: 10.1111/j.1469-8986.1994.tb01040.x
5. *Juniper Jr. K., Blanton D. E., Dykman R. A.* Palmar skin resistance and sweat-gland counts in drug and non-drug states // Psychophysiology. 1967. Vol. 4, № 2. P. 231–243. DOI: 10.1111/j.1469-8986.1967.tb02762.x
6. *Znamenskaya I. A., Koroteyeva E. Y., Khakhalin A. V., Shishakov V. V., Isaichev S. A., Chernorizov A. M.* Infrared Thermography and Image Analysis of Dynamic Processes around the Facial Area // Moscow University Physics Bulletin. 2017. Vol. 72, № 6. P. 595–600.
7. *Znamenskaya I., Koroteeva E., Isaychev A., Chernorizov A.* Thermography-based remote detection of psychoemotional states // QIRT 2018 Proceedings. Vol. 1. P. 51–56. DOI: 10.21611/qirt.2018.p13
8. *Знаменская И. А., Коротеева Е. Ю., Шишаков В. В., Хахалин А. В., Кузьмичева Е. А., Исайчев С. А., Черноризов А. М.* Анализ видеопоследовательностей и термограмм лица для дистантного съема физиологических индикаторов психоэмоциональных состояний человека // Материалы 27-й Междунар. конф. по компьютерной графике и машинному зрению, GraphiCon 2017 (Пермь, 24–28 сентября 2017 г.). Пермь, 2017. С. 121–124.
9. *Знаменская И. А., Коротеева Е. Ю., Хахалин А. В., Шишаков В. В.* Термографическая визуализация и дистанционный анализ динамических процессов в области лица // Научная визуализация. 2016. Т. 8, № 5. С. 122–131.
10. *Sato K., Kang W. H., Saga K., Sato K. T.* Biology of sweat glands and their disorders. II. Disorders of sweat gland function // Journal of the American Academy of Dermatology. 1989. Vol. 20, № 5. P. 713–726. DOI:10.1016/S0190-9622(89)70081-5
11. *Вайнер Б. Г.* Матричное тепловидение в физиологии. Новосибирск : Сиб. отд-ние РАН, 2004. 95 с.
12. *Вайнер Б. Г.* Коротковолновые матричные тепловизоры – оптимальное средство медицинской диагностики и контроля // Больничный лист. 2002. № 9. С. 14–21.
13. *Vainer B. G.* FPA-based infrared thermography as applied to the study of cutaneous perspiration and stimulated vascular response in humans // Physics in Medicine & Biology. 2005. Vol. 50, № 23. P. 63–94.
14. *Vetrugno R., Liguori R., Cortelli P., Montagna P.* Sympathetic skin response // Clinical Autonomic Research. 2003. Vol. 13, № 4. P. 256–270. DOI: 10.1007/s10286-003-0107-5
15. *Ohmi M., Tanigawa M., Yamada A., Ueda Y., Haruna M.* Dynamic analysis of internal and external mental sweating by optical coherence tomography // J. Biomed. Opt. 2009. Vol. 14, № 1. 014026. DOI: 10.1117/1.3079808
16. *Lee J., Pyo M., Lee S. H., Kim J., Ra M., Kim W. Y., Park B. J., Lee Ch. W., Kim J. M.* Hydrochromic conjugated polymers for human sweat pore mapping // Nature Communications. 2014. Vol. 5, № 1. 3736. DOI: 10.1038/ncomms4736
17. *Ring E. F. J.* The historical development of temperature measurement in medicine // Infrared Physics & Technology. 2007. Vol. 49, № 3. P. 297–301 DOI: 10.1016/j.infrared.2006.06.029
18. *Shastri D., Merla A., Tsiamyrtzis P., Pavlidis I.* Imaging facial signs of neurophysiological responses // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2009. Vol. 56, № 2. P. 477–484. DOI: 10.1109/TBME.2008.2003265
19. *Cardone D., Pinti P., Merla A.* Thermal infrared imaging-based computational psychophysiology for psychometrics // Computational and Mathematical Methods in Medicine. 2015. ID 984353. DOI: 10.1155/2015/984353
20. *Ivanitsky G. R.* Modern matrix thermovision in biomedicine // Advances in Physical Sciences. 2006. Vol. 49, № 12. P. 1263–1288. DOI: 10.1070/PU2006v049n12ABEH006163
21. *Krzywicki A. T., Berntson G. G., O'Kane B. L. A.* Non-contact technique for measuring eccrine sweat gland activity using passive thermal imaging // International Journal of Psychophysiology. 2014. Vol. 94, № 1. P. 25–34. DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2014.06.011
22. *Allen J., Frame J. R., Murray A.* Microvascular blood flow and skin temperature changes in the fingers following a deep inspiratory gasp // Physiological Measurement. 2002. Vol. 23, № 2. P. 365–373. DOI: 10.1088/0967-3334/23/2/312
23. *Allen J., Di Maria C., Mizeva I., Podtaev S.* Finger microvascular responses to deep inspiratory gasp assessed and quantified using wavelet analysis // Physiological Measurement. 2013. Vol. 34, № 7. P. 769–779.

24. *Illigens B. M. W., Gibbons C. H.* Sweat testing to evaluate autonomic function // Clinical Autonomic Research. 2009. Vol. 19, № 2. P. 79–87. DOI: 10.1007/s10286-008-0506-8
25. *Low V. A., Sandroni P., Fealey R. D., Low P. A.* Detection of small-fiber neuropathy by sudomotor testing // Muscle & Nerve. 2006. Vol. 34, № 1. P. 57–61. DOI: 10.1002/mus.20551
26. *Gibbons C. H., Illigens B. M. W., Wang N., Freeman R.* Quantification of sweat gland innervation: a clinical-pathologic correlation // Neurology. 2009. Vol. 72, № 17. P. 1479–1486. DOI: 10.1212/WNL.0b013e3181a2e8b8
27. *Podtaev S., Morozov M., Frick P.* Wavelet-based correlations of skin temperature and blood flow oscillations // Cardiovas. Eng. 2008. Vol. 8. P. 185–189. DOI: 10.1007/s10558-008-9055-y
28. *Frick P., Mizeva I., Podtaev S.* Skin temperature variations as a tracer of microvessel tone // Biomedical Signal Processing and Control. 2015. Vol. 21. P. 1–7. DOI: 10.1016/j.bspc.2015.04.014
29. *Sagaidachnyi A., Fomin A., Usanov D., Skripal A.* Real-time technique for conversion of skin temperature into skin blood flow : human skin as a low-pass filter for thermal waves // Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering. 2019. Vol. 22, № 12. P. 1009–1019 DOI: 10.1080/10255842.2019.1615058
30. *Сагайдачный А. А., Фомин А. В., Волков И. Ю.* Предельные возможности современных тепловизоров, как инструмента для исследования колебаний периферического кровотока человека в различных диапазонах частот // Медицинская физика. 2016. № 4. С. 84–93.
31. *Sagaidachnyi A. A., Skripal A. V., Fomin A. V., Usanov D. A.* Determination of the amplitude and phase relationships between oscillations in skin temperature and photoplethysmography-measured blood flow in fingertips // Physiological Measurement. 2014. Vol. 35, № 2. P. 153–166. DOI: 10.1088/0967-3334/35/2/153

Образец для цитирования:

Сагайдачный А. А., Майсков Д. И., Залетов И. С., Фомин А. В., Скрипаль Ан. В. Детектирование активности единичных потовых желез методом макротермографии и ее взаимосвязь с температурой кожи и периферической гемодинамикой // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2020. Т. 20, вып. 2. С. 103–115. DOI: https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-2-103-115

Detection of the Single Sweat Glands Activity Via the Macro Thermography Techniques and Its Relation with Skin Temperature and Peripheral Hemodynamics

A. A. Sagaidachnyi, D. I. Mayskov, I. S. Zaletov, A. V. Fomin, An. V. Skripal

Andrey A. Sagaidachnyi, https://orcid.org/0000-0002-5296-1968, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, andsag@yandex.ru

Dmitriy I. Mayskov, https://orcid.org/0000-0002-3487-2590, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, dmayskov@gmail.com

Ivan S. Zaletov, https://orcid.org/0000-0002-1419-7372, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia. izaletov25@gmail.com

Andrey V. Fomin, https://orcid.org/0000-0002-1568-8317, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, 89050344175@bk.ru

Anatoly V. Skripal, https://orcid.org/0000-0002-9080-0057, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, skripalav@info.sgu.ru

Background and Objectives: Interest in the study of the human's sweat glands activity is due to the close relationship of their activity with human body's peripheral regions sympathetic innervation. The increased activity of sweat glands and secretion occurs not only due to thermoregulation, but also is a response to the psychoemotional load and the physiological and drug tests. Sweat gland activity's disruption manifests itself in pathologies such as diabetes mellitus, chronic heart failure, hyperhidrosis, thyrotoxicosis, and Parkinson's disease. Thus, the search for a method for quantifying the sweat glands activity on the surface of a human body based on physical methods is relevant for biomedical diagnosis. **Materials and Methods:** The primary thermographic data were recorded using a ThermaCam SC 3000 thermal imaging camera, FLIR Systems (Sweden) with a 34/100 macro lens, in the spectral range of 8–9 μm with a temperature sensitivity of 0.02°C and a resolution of 320 × 240 pixels with a frequency 5 frames per second. The measurements were performed in laboratory conditions with a stable ambient temperature of 23 ± 0.2°C and the absence of forced convection. Simultaneously with temperature measurements, the volumetric blood flow was monitored using a KL-72001 photoplethysmographic sensor (Taiwan) at a wavelength of 800 nm. **Results:** The both hands reaction to a breathing test was observed. The dynamics of changes in the active sweat pore count, temperature and blood flow was analyzed. Using an algorithm for processing thermograms that implements the suppression of low-frequency and high-frequency spatial components of temperature fluctuations, and the subsequent detection of local minima, makes it possible using the infrared thermography method to study not only the temperature dynamics, but also the sweat glands activity. **Conclusion:** Thus, the thermographic recording of the limb's reaction to a respiratory test using the algorithm for detecting the sweat pore count can be positioned as a tool for studying the body's sympathetic response to a functional load. The method is interest for the prophylactic detection of small vessel's neuropathy's various forms in diabetes mellitus, thyroid disorders and Raynaud's syndrome.

Keywords: thermography, sweat gland, sweat pore, blood flow, neuropathy, asynchrony, filtration.

Received: 19.02.2020 / Accepted: 25.03.2020 / Published: 01.06.2020

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

Acknowledgements: *This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 19-32-90072).*

References

1. Krishnamurthy N., Mubarak A. S., Sri V. G., Balakumarr B., Srinivasan V. Influence of respiration on human sympathetic skin response. *Indian Journal of Physiology and Pharmacology*, 1996, vol. 40, pp. 350–354.
2. Familoni B. O., Gregor K. L., Dodson T. S., Krzywicki A. T., Lowery Jr B. N., Orr S. P., Rasmusson A. M. Sweat pore reactivity as a surrogate measure of sympathetic nervous system activity in trauma-exposed individuals with and without posttraumatic stress disorder. *Psychophysiology*, 2016, vol. 53, no. 9, pp. 1417–1428. DOI: 10.1111/psyp.12681
3. Shibasaki M., Kondo N., Crandall C. G. Non-thermoregulatory modulation of sweating in humans. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 2003, vol. 31, no. 1, pp. 34–39.
4. Freedman L. W., Scerbo A. S., Dawson M. E., Raine A., McClure W. O., Venables P. H. The relationship of sweat gland count to electrodermal activity. *Psychophysiology*, 1994, vol. 31, no. 2, pp. 196–200. DOI: 10.1111/j.1469-8986.1994.tb01040.x
5. Juniper Jr K., Blanton D. E., Dykman R. A. Palmar skin resistance and sweat-gland counts in drug and non-drug states. *Psychophysiology*, 1967, vol. 4, no. 2, pp. 231–243. DOI: 10.1111/j.1469-8986.1967.tb02762.x
6. Znamenskaya I. A., Koroteyeva E. Y., Khakhalin A. V., Shishakov V. V., Isaichev S. A., Chernorizov A. M. Infrared Thermography and Image Analysis of Dynamic Processes around the Facial Area. *Moscow University Physics Bulletin*, 2017, vol. 72, no. 6, pp. 595–600.
7. Znamenskaya I., Koroteeva E., Isaychev A., Chernorizov A. Thermography-based remote detection of psycho-emotional states. *QIRT 2018 Proceedings*, vol. 1, pp. 51–56. DOI: 10.21611/qirt.2018.p13
8. Znamenskaya I. A., Koroteeva E. Yu., Shishakov V. V., Khakhalin A. V., Kuzmicheva E. A., Isaichev S. A., Chernorizov A. M. Analysis of video sequences and thermal images of human faces for remote detection of psychoemotional states. *Materials of the 27th International Conference on Computer Graphics and Machine Vision, GraphiCon 2017* (Perm, 24–28 September, 2017). Perm, 2017, pp. 121–124 (in Russian).
9. Znamenskaya I. A., Koroteeva E. Yu., Khakhalin A. V., Shishakov V. V. Thermographic visualization and remote control of dynamical processes around a facial area. *Nauchnaia vizualizatsiia* [Scientific Visualization], 2016, vol. 8, no. 5, pp. 122–131 (in Russian).
10. Sato K., Kang W. H., Saga K., Sato K. T. Biology of sweat glands and their disorders. II. Disorders of sweat gland function. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 1989, vol. 20, no. 5, pp. 713–726. DOI:10.1016/S0190-9622(89)70081-5
11. Vainer B. G. *Matrichnoe teplovidenie v fiziologii* [Matrix Thermal Imaging in Physiology]. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2004. 95 p. (in Russian).
12. Vainer B. G. Short-wavelength matrix thermal imagers are an optimal tool for medical diagnostics and control. *Bol'nichnyi list* [Sick Leave], 2002, no. 9, pp. 14–21 (in Russian).
13. Vainer B. G. FPA-based infrared thermography as applied to the study of cutaneous perspiration and stimulated vascular response in humans. *Physics in Medicine & Biology*, 2005, vol. 50, no. 23, pp. 63–94.
14. Vetrugno R., Liguori R., Cortelli P., Montagna P. Sympathetic skin response. *Clinical Autonomic Research*, 2003, vol. 13, no. 4, pp. 256–270. DOI: 10.1007/s10286-003-0107-5
15. Ohmi M., Tanigawa M., Yamada A., Ueda Y., Haruna M. Dynamic analysis of internal and external mental sweating by optical coherence tomography. *J. Biomed. Opt.*, 2009, vol. 14, no. 1, 014026. DOI: 10.1117/1.3079808
16. Lee J., Pyo M., Lee S. H., Kim J., Ra M., Kim W. Y., Park B. J., Lee Ch. W., Kim J. M. Hydrochromic conjugated polymers for human sweat pore mapping. *Nature Communications*, 2014, vol. 5, no. 1, pp. 1–10, 3736. DOI: 10.1038/ncomms4736
17. Ring E. F. J. The historical development of temperature measurement in medicine. *Infrared Physics & Technology*, 2007, vol. 49, no. 3, pp. 297–301 DOI: 10.1016/j.infrared.2006.06.029
18. Shastri D., Merla A., Tsiamyrtzis P., Pavlidis I. Imaging facial signs of neurophysiological responses. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2009, vol. 56, no. 2, pp. 477–484. DOI: 10.1109/TBME.2008.2003265
19. Cardone D., Pinti P., Merla A. Thermal infrared imaging-based computational psychophysiology for psychometrics. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2015, ID 984353. DOI: 10.1155/2015/984353
20. Ivanitsky G. R. Modern matrix thermovision in biomedicine. *Advances in Physical Sciences,* 2006, vol. 49, no. 12, pp. 1263–1288. DOI: 10.1070/PU2006v049n12ABEH006163
21. Krzywicki A. T., Berntson G. G., O'Kane B. L. A. Non-contact technique for measuring eccrine sweat gland activity using passive thermal imaging. *International Journal of Psychophysiology*, 2014, vol. 94, no. 1, pp. 25–34. DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2014.06.011
22. Allen J., Frame J. R., Murray A. Microvascular blood flow and skin temperature changes in the fingers following a deep inspiratory gasp. *Physiological Measurement*, 2002, vol. 23, no. 2, pp. 365–373.
23. Allen J., Di Maria C., Mizeva I., Podtaev S. Finger microvascular responses to deep inspiratory gasp assessed and quantified using wavelet analysis. *Physiological Measurement*, 2013, vol. 34, no. 7, pp. 769–779.

24. Illigens B. M. W., Gibbons C. H. Sweat testing to evaluate autonomic function. *Clinical Autonomic Research*, 2009, vol. 19, no. 2, pp. 79–87, DOI: 10.1007/s10286-008-0506-8
25. Low V. A., Sandroni P., Fealey R. D., Low P. A. Detection of small-fiber neuropathy by sudomotor testing. *Muscle & Nerve*, 2006, vol. 34, no. 1, pp. 57–61. DOI: 10.1002/mus.20551
26. Gibbons C. H., Illigens B. M. W., Wang N., Freeman R. Quantification of sweat gland innervation: a clinical-pathologic correlation. *Neurology*, 2009, vol. 72, no. 17, pp. 1479–1486. DOI: 10.1212/WNL.0b013e3181a2e8b8
27. Podtaev S., Morozov M., Frick P. Wavelet-based correlations of skin temperature and blood flow oscillations. *Cardiovas. Eng.*, 2008, vol. 8, pp. 185–189. DOI: 10.1007/s10558-008-9055-y
28. Frick P., Mizeva I., Podtaev S. Skin temperature variations as a tracer of microvessel tone. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2015, vol. 21, pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.bspc.2015.04.014
29. Sagaidachnyi A. A., Fomin A. V., Usanov D. A., Skripal A. V. Real-time technique for conversion of skin temperature into skin blood flow: human skin as a low-pass filter for thermal waves. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 2019, vol. 22, no. 12, pp. 1009–1019. DOI: 10.1080/10255842.2019.1615058
30. Sagaidachnyi A. A., Fomin A. V., Volkov I. Yu. Limit capabilities of modern thermal imaging cameras as a tool for investigation of peripheral blood flow oscillations within different frequency ranges. *Medical Physics*, 2016, no. 4. pp. 84–93 (in Russian).
31. Sagaidachnyi A. A., Skripal A. V., Fomin A. V., Usanov D. A. Determination of the amplitude and phase relationships between oscillations in skin temperature and photoplethysmography-measured blood flow in fingertips. *Physiological Measurement*, 2014, vol. 35, no. 2, pp. 153–166. DOI: 10.1088/0967-3334/35/2/153

Cite this article as:

Sagaidachnyi A. A., Mayskov D. I., Zaletov I. S., Fomin A. V., Skripal An. V. Detection of the Single Sweat Glands Activity Via the Macro Thermography Techniques and Its Relation with Skin Temperature and Peripheral Hemodynamics. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2020, vol. 20, iss. 2, pp. 103–115 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-2-103-115

Nanomedicine and Drug Delivery Strategies for Theranostics Applications

A. V. Ermakov, E. V. Lengert, S. B. Venig

Alexey V. Ermakov, https://orcid.org/0000-0001-8105-5932, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, ermakov.ssu@gmail.com

Ekaterina V. Lengert, https://orcid.org/0000-0002-6447-2811, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, lengertkatrin@mail.ru

Sergey B. Venig, https://orcid.org/0000-0002-4759-5828, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, sergey.venig@gmail.com

Background and Objectives: Nanomedicine and drug delivery systems are a relatively new but rapidly developing branch of science, which investigate materials in the nano- and microscale range as diagnostic tools or carrier for delivery of therapeutic agents to specific targets within the body in a controlled manner. As far as the systemic administration faces a range of problems that cannot be solved by traditional approaches, it becomes extremely relevant to develop novel therapeutic options. **Results:** In this paper we provided information about the most interesting and promising strategies from our point of view that optimize the drug delivery process using various compositions of nano- and microcarriers of different nature and design, special physicochemical amplifiers, various devices, and methods. The current review briefly presents the latest advances in the field of nanomedicine and drug delivery systems driven by impressive recent results in the field of nanomaterials, drug carriers of different compositions, specific physicochemical amplifiers, various devices and methods. Few basic routes for drug delivery *in vivo* including injections, implantation and transdermal delivery open up a new avenue for an improved topical medical treatment which is considered and compared to each other in the current review. All of these routes offer certain advantages of terms drug absorption, targeting, prolongation, spatiotemporal accuracy, reduction of dosage and many others that must be taken into account to provide a correct approach for the treatment of a specific disease. **Conclusion:** Invasive and non-invasive implantation of drug delivery carriers and devices are reviewed together with transdermal routes leading to effective absorption of drugs with minimal side effects. The innovative approaches to drug delivery discussed here open venue for effective treatment of a wide range of diseases, especially chronic ones, that cannot be defeated by traditional approaches. Although transdermal delivery offers a promising non-invasive way to treat a variety of diseases, chronic illnesses can be treated more effectively by implantation of drug delivery devices with a bidirectional connection that in the future can drastically improve the quality of life. Diversity of emerging technologies in microelectronics, sensors and biomaterials leads to dramatic changes in the medical industry and appearance of new systems providing medical treatment in theranostics fashion.

Key words: nanomedicine, drug delivery, theranostics, implantation, transdermal system.

Received: 05.03.2020 / Accepted: 24.03.2020 / Published: 01.06.2020

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

DOI: https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-2-116-124

© Ermakov A. V., Lengert E. V., Venig S. B., 2020

Introduction

Currently, a great amount of highly effective drugs is developed, however, the problem of their targeted delivery to a specific organ or pathological site remains challenging. In this regard, one of the main trends in pharmaceutical industries along with the development of novel active biological compounds is the improvement of their delivery into the body. There are several routes for drug delivery based on carriers, which can be introduced into the body by means of injections, implantation or transdermal delivery.

The problems associated with standard injections are caused by difficulties in use by untrained users as syringes can result in injuries and infections and pains. Besides syringes can be reused by people with drug addiction, if they are not disposed properly. A large percentage of patients are afraid of syringes that causes problems in therapy, regardless of the reasons in pain and necessity of use. In order to overcome issues associated with user compliance, a number of needleless syringe designs have been proposed. Such syringes deliver the drug to the subject by injecting the drug through the skin of the subject under air pressure.

However, these techniques do not resolve a range of problems associated with the systemic administration of drugs leading to side effects and the necessity to repeat the procedure regularly. Novel technologies in drug delivery systems offer a range of routes the drug can be delivered in, accompanied by an opportunity to endow it with a bidirectional connection in a theranostics fashion. These systems are based on drug carriers and enable to control release profiles of drugs with high spatiotemporal precision.

The current review is focused on recent advances in the routes of drug delivery and biosensors incorporation into the body. Invasive and non-invasive implantation of drug delivery carriers and devices are reviewed together with transdermal routes leading to effective absorption of drugs with minimal side effects.

1. Delivery of drug carriers by subcutaneous injections

The subcutaneous fat layer is well supplied with blood vessels, therefore, the effect of drugs can be reached with subcutaneous injections are widely employed. Subcutaneously administered drugs be-

come absorbed quickly in comparison to the drugs absorbed via oral administration. Subcutaneous injections are made with a needle at the depth of 15 mm and can provide drug volume of up to 2 mL, which are rapidly absorbed in loose subcutaneous tissue and do not have a harmful effect on it.

A variety of drug delivery carriers were shown to exhibit therapeutic effect in the body upon introduction via subcutaneous injections such as liposomes [1, 2], magnetic iron oxide nanoparticles [3], carbon nanoparticles [4], gold nanoparticles [5] (Fig. 1).

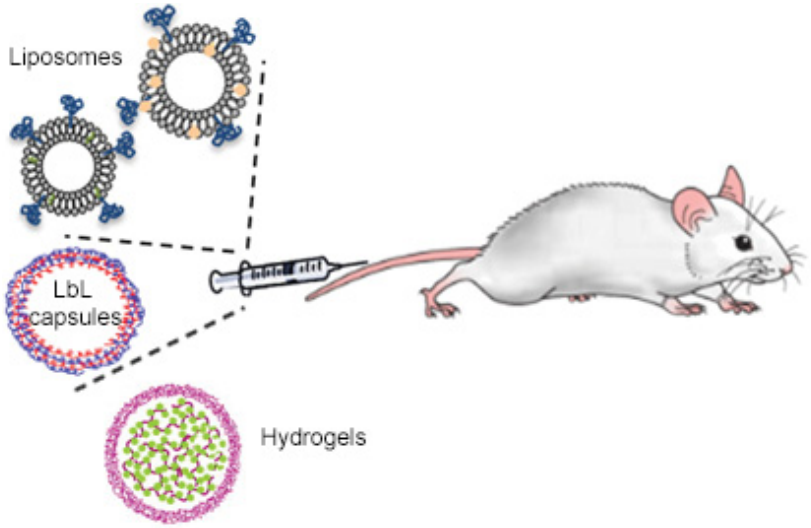


Fig. 1. Different types of drug delivery carriers used in subcutaneous injections. Reprinted with permission from [2]. Copyright Elsevier, 2018

However, it is known that the intravenous administration of liposomes and various polymer-based pharmaceuticals causes vegetative, mucocutaneous and cardiopulmonary reactions in some cases [6]. Symptoms include fever, chills, shortness of breath, hydrops, rash, cough, shortness of breath, polypnea, hypertension/hypotension, and chest and back pains. These symptoms range from mild to severe with an unknown reaction in response to pre-existing allergen-reactive immunoglobulins (e.g., IgE type antibodies). However, modern pharmaceuticals used in clinical practice are not designed to overcome these problems.

The mechanism underlying the reactions to pharmaceuticals in response to intravenous administration is not well understood. It is assumed that the unintentional activation of the complement system, which is the first line of defense of the body against extraneous intrusions, is a causative factor [7].

The authors of [8] have observed an additional problem in the difference of therapeutic effect in dependence on the site of injection. The authors studied the relationship between the left or right ulnar veins and with intravenous contrast injection sites and the quality of improved CT images of the chest. Interestingly, contrast images obtained by injection into the right ulnar vein showed better quality than images obtained by injection through the left arm. An increase in the contrast improved the image quality of a CT scan of the chest when injected into the right ulnar vein, avoiding passage through a possibly squeezed left brachiocephalic vein, that is especially relevant for elderly patients.

2. Implantation of theranostics systems

Biomedical engineering in recent years has made a breakthrough in the field of theranostics materials and devices which are consisted of drug delivery and biosensing systems [9]. These approaches enable tuning of therapeutic treatment employing targeting drugs together with control over release profiles into the body that can increase efficiency in comparison to systemic administration. The drug delivery process can also improve therapeutic affect by targeting a drug to a pathological site. However, this approach demands a mechanism to provide external control over the system at every step of the process. To date, a variety of materials and devices can offer a wide range of mechanisms of drug delivery and release according to the clinical requirements.

Drug delivery approaches can be divided into active and passive. Active systems are designed to implement release in response to an external signal which can be represented by electromagnetic waves, radio waves, ultrasound and others. It means that the system should be composed either of multifunctional composite material or devices containing power batteries and on-board electronics, usually accompanied by sensors. Passive systems designed in a specific way to provide release in response to the physical properties of the medium in the body.

In this way, microfabrication techniques become important in terms of miniaturization of implantable systems to provide implantation of multifunctional theranostics systems to different sites of the body. It should be noted that passive devices are beneficial in terms of size limitations as they are not equipped with active electronic parts and can be introduced to the body in a minimally invasive way [10]. Drug release can be assisted by different types of stimuli such as temperature [11, 12], pH [13, 14], and light [15, 16]. Besides these parameters should be taken into account to provide control over pharmacokinetics and increase therapeutic efficiency although passive systems are unable to implement drug release with complex release profile and dependency on multiple parameters [17].

The drug delivery devices and sensors can be implantable in an invasive and non-invasive way [18] or introduced via the transdermal route [19]. Implantable systems can be represented by complex micron-sized robots [20, 21] or capsules [22, 23]. Usually, implantable devices contain microreservoir filled with a drug, actuator and other electronic components to initialize release, sensors, and antenna to provide bidirectional connection [24]. In the case of active devices, the external transmitter wirelessly receives information from the device and delivers information if the actuating mechanism should be triggered to release the drug. This approach has benefits in comparison to systemic administration as it helps to reduce side effects as released drugs tend to accumulate near the site it was injected in.

In the other case, multifunctional carriers made of composite materials are employed for delivery, detection and release in response to physical and chemical surroundings in the body or specific type of external influence [25]. Biocompatible arrays of free-standing micron-sized chambers made of biodegradable polymers (polylactic acid or polyelectrolytes) were shown to provide either burst release triggered by NIR light [26] or prolonged release in response to enzyme treatment *in vivo* [27]. These chambers allow creating both independent drug depot implants [27] or as functional coating for implants [28]. Besides inorganic fillers, complex films consisted of lipids and biopolymers such as DNA [29] can find application as biosensors.

In dependence on medical indications, the gastrointestinal route for the introduction of sensors and drug delivery systems into the body can be used [22, 23]. This route is beneficial as it is a simple and noninvasive way to introduce drugs, however it is limited by a number of diseases that can be treated. The therapeutic effect of the complex capsule consisted of a camera, illumination, a drug delivery channel and an ultrasound transducer was studied *in vivo*. Once swallowed the capsule provides controllable release in response to pH or enzymatic treatment or in response to an external signal that makes it possible to tune the site of release. In other case composite alginate-based microchambers were studied *in vivo* and shown to be stable in the gastrointestinal tract of C.elegans and release the model drug in response to NIR laser trigger [30].

A wide range of implantable multifunctional systems with a drug depot is represented by composite scaffolds based on functionalized biocompatible polymeric matrices. In combination with the sensing and drug delivery approach, scaffolds are a promising candidate in the field of tissue regeneration [31, 32]. Usually, scaffolds consisted of hydrogels or biopolymers functionalized by drug delivery carriers such as calcium carbonate particles and gelatin microspheres [31, 33]. The basic requirements for tissue engineering implants are biocompatibility, biodegradability, the possibility of cell colonization over the scaffold and cell proliferation in order to form new living tissue, the structure, and functions of which are similar to the properties of native tissue [34]. Along with the restoration of structural defects in tissues, such materials also enable restoration of the functions of the tissues lost as a result of damage [35].

Together with hydrogels, nanofibers have found application as an implantable drug delivery system characterized by high flexibility and prolonged release of anti-glioma drug [36]. Alternatively, «drug delivery» term can suggest also the delivery of light energy as it was demonstrated with an implantable micro-optical semiconductor device, which provides both the delivery of light energy and the detection of optical signals within the body [37].

In general, hydrogels are widely applied as drug delivery carriers and sensors due to the great possibility of functionalization by fillers of differ-

ent nature. Hydrogels functionalized by graphene were shown to have great stimuli-responsiveness with high efficiency as an active component in actuator systems [38]. This approach continues the trend which started since the investigation of the first glucose electrochemical sensor. Together with new developments in the area of biocompatible functional materials, wireless power supplies and bioengineering, the latest advances in sensing techniques allowed investigation of implantable biosensors, that in some cases are accompanied by drug delivery systems in a theranostics fashion.

Graphene applied as a functional component in the hydrogel matrix contributes to the actuation performance of the composite in terms of electrical conductivity and mechanical properties, which allows the resulted material to change shape and dimensions in response to stimuli in a reversible manner. Hydrogels doped with graphene were shown to exhibit stimulus-responsive swelling that allowed realizing signal transduction in biosensors and bioelectronics [39]. In this way, composite hydrogels found a wide range of applications as implantable sensors [40]. Hydrogel based composites were demonstrated to serve as a pH [41] electrical [42] and photonic [43] responsive-actuator.

Along with advances in biocompatible composite materials, new developments in microelectronics, microfluidics, microsensors have led to an increasing number of technologies focused on implantable biodevices for continuous monitoring. These devices can help to resolve many clinical tasks including detecting or monitoring pathogens, ions, diseases, etc. [44]. Progress in this area has led to the development of a wireless implantable glucose/lactate sensing biochip made on the basis of on-chip potentiostats and new signal processing techniques [45]. Implantable bio-micro-electro-mechanical systems for the monitoring of blood flow in situ have also been developed [46].

3. Transdermal delivery of hybrid carriers and methods of stimulation

Various technologies and strategies for the delivery of therapeutic agents into the body have been widely investigated over the past decades. To date, many studies have proven an increase in the delivery efficiency of vaccines and various drugs, that can reduce the dosage of the drug and provide a minimally invasive alternative to traditional vaccination and dosage forms. Significant progress has been made in the field of various vaccinations and transdermal drug delivery among which are the following technologies: jet and powder injections, microneedles, microporation technologies, electroporation, sonoporation, as well as transdermal and transfollicular drug delivery.

Most drugs employed today in clinical practice are either injected or orally administered. Injections usually provide a quick, direct route to the bloodstream, while oral administration involves metabolization of the pharmaceutical agent in the liver. Hepatic metabolism reduces the efficiency of pharmaceutical agents up to 90% in some cases. As a result, a significant amount of the drug does not reach the rest of the body due to the detoxification of the drug by the liver. Despite this drawback, oral administration is still the most preferred route of administration of pharmaceutical drugs due to simple administration and the opportunity to avoid invasive methods such as injections.

To date, sonophoresis becomes an increasingly common method of drug administration. Therapeutics or model substances can penetrate through the skin, hair follicles, and sweat glands by means of vibration influence. The ultrasonic treatment (sonophoresis) is one of the least invasive physical stimulants. It is effectively employed in order to enhance intra- and transdermal delivery of bioactive molecules and solid particles. Ultrasound treatment of the skin at frequencies over 0.7 MHz leads to an increase in pressure in the medium and subsequent formation of cavitation bubbles inside the inherent cavities represented by hair follicle shafts and sweat glands [47]. Vibrations of the bubbles within follicles provokes movement of the particles' suspension down the follicle. Previously, ultrasound treatment at the frequency of 1 MHz and a power density of 2 W/cm^2 was shown to be safe for the skin of rats [48].

Ionophoretic delivery is another effective non-invasive approach for therapeutic drug delivery [49]. Typically, transdermal iontophoresis generates a small electric current (0.1–0.5 mA cm^{-2}) in the skin to induce transdermal molecular transport, enhancing drug delivery by electro-repulsion and electroosmosis. At neutral pH, the skin is negatively charged and has cationic selectivity [50]. Thus, the passage of current causes a convective flow of solvent from the anode to the cathode, leading in increased transfer of cations and improved transdermal transfer of neutral polar substances. The effects of electro-repulsion and electroosmosis depend on the physicochemical and electrical characteristics of the membrane. In addition, the negative charge of the skin can be reduced, neutralized, or even completely altered by the iontophoresis of some cationic, lipophilic species

[51]. In addition, a combined strategy to improve the permeability of the skin for drugs based on the simultaneous use of sonophoresis and iontophoresis was developed. This strategy showed a significantly higher gain in comparison to using only one approach. A miniature device able to induce sonophoresis and iontophoresis is a promising approach due to the enhanced transdermal drug delivery and the possibility of self-administration in the cosmetic and therapeutic fields [52].

Various alternative methods for improved skin penetration are presented in Fig. 2.

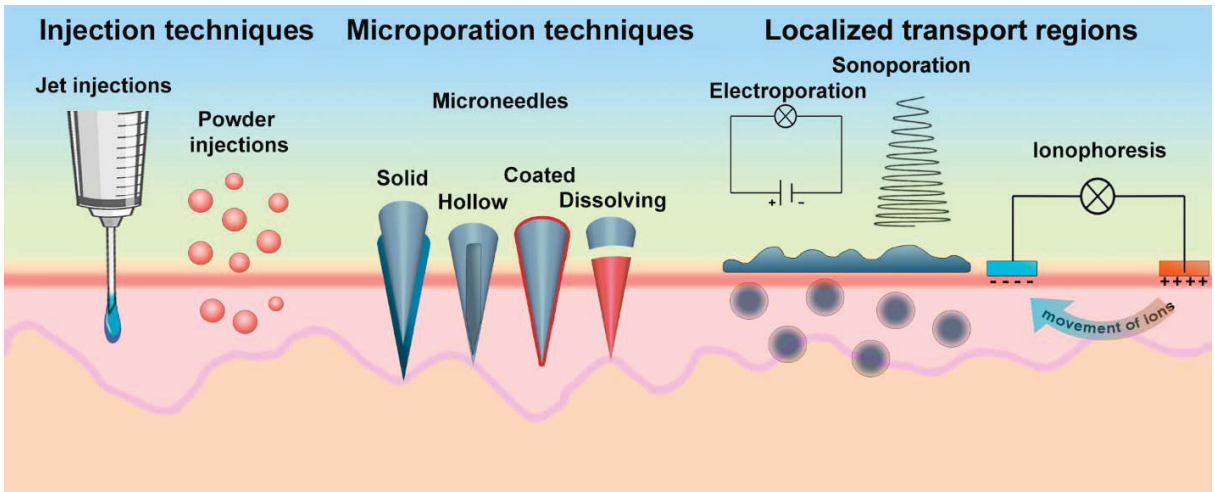


Fig. 2. Different approaches towards subcutaneous drug delivery. Injection, microporation and local transport region (LTR) techniques are displayed in representative dimensions relative to the epidermal layer of the skin

Technologies related to microporation for the delivery of macromolecular drugs, biopharmaceuticals and vaccines are developing rapidly [53].

Microneedle mediated drug delivery has been proposed as a strategy for disrupting the barrier function of the stratum corneum to provide efficient transport of molecules through the skin. This strategy suggests the employment of micron-sized needles of different geometries, which penetrate through the skin and create transitional water channels. Microneedles alone or in combination with other enhancing strategies (chemical or physical) have been shown to significantly increase skin permeability for a variety of therapeutic molecules, including *in vitro*, *ex vivo* or *in vivo* biopharmaceuticals [53].

A device with a microneedle matrix perforates the stratum corneum of the skin, which provides direct access of drugs to the underlying viable epidermis in absence of contact with blood vessels and nerve fibers located in the dermis. To date, there are several different approaches for transdermal drug delivery based on microneedles: solid microneedles (to increase the permeability of drugs by means of microholes created over the skin), microneedles with a coating (to provide quick dissolution of the drug together with the coating at underlying viable epidermis), soluble microneedles (for quick or controlled release of the drug trapped within microneedles), hollow microneedles (used to penetrate through the skin and provide release of liquid drug after infusion or diffusion of the drug through the hole of the needle) [54].

4. Application in medical practice

Currently, several microneedle products were released on the market for cosmetic applications. LiteClear® microneedles are used to treat acne and other skin diseases, and MicroHyala® is used to reduce the appearance of first wrinkles [54]. The only microneedle system available on the market for therapeutic use is the Becton-Dickinson Soluvia® microinjection device, consisting of a 1.5 mm hypodermic needle attached to a syringe pre-filled with an influenza vaccine. Soluvia® is currently marketed worldwide as IDflu®, Intanza®, and Fluzone Intradermal® and applied for intradermal vaccination. Micronjet® is used as an effective, accurate, and almost painless intradermal delivery of commercially available dosage forms, including influenza vaccines, lidocaine, and insulin for humans [55].

The most common and less invasive methods to improve drug penetration through the skin barrier

are based on either removing the outermost layer of the skin by peeling off the tape or using various chemical enhancers such as dimethyl sulfoxide, ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA), sodium glycocholate and related cholates, Tween 20 (non-ionic polysorbate surfactant), Brij 35 (polyoxyethylene lauryl ether), saponins, bile salts. Typically, penetration enhancers are small molecules that temporarily soften the bond between adjacent cells of the corneal epithelium (EDTA) or increase the fluidity of membranes (cholates) [55]. Oleic acid, the most studied unsaturated fatty acid, is a component of the transdermal composition Vivelle® estradiol, acting as a permeability enhancer along with propylene glycol [56] and peptides (both for macro molecules and micromolecules) [57].

A few implantable sensors for continuous monitoring of body characteristics have been developed and released [58]. The identification device RFID tag developed by VeriChip Corporation is a great example of a successful implantable device. This device optionally can be implanted in the upper arm where the medical professionals use the serial number emitted by the VeriChip in order to enable rapid obtaining of the vital data regardless of people's availability [58, 59]. Recent advances in biosensors offer novel solutions of a variety of tasks such as control over glucose level, pregnancy and DNA testing, microRNA detection, etc. [60].

Conclusion

Thus, emerging technologies in the field of novel microelectronics, sensors, miniaturization techniques, and biomaterials lead to an investigation of implantable drug delivery and monitoring systems. Problems in traditional routes of drug absorption and dosage forms stimulate the development of novel designs for drug delivery which in some cases are accompanied by the bidirectional connection. One of the most promising approaches based on transdermal delivery of carriers loaded with drugы as it helps to avoid unnecessary invasive intervention. However, transdermal delivery is limited by a number of diseases that can be treated in this way. In this paper we provided information about the most interesting and promising strategies from our point of view that optimize the drug delivery process using various compositions of nano- and microcarriers of different nature and design, special physicochemical amplifiers, various devices, and methods. We hope to encourage other researchers to go beyond the traditional methods of drug delivery and put into practice new ones.

Acknowledgements: *This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of the state task (project No. FSRR-2020-0002). Alexey Ermakov acknowledges the scholarship of the President of the Russian Federation (project No. SP-1488.2019.4).*

References

1. Al-Ahmady Z. S., Chaloin O., Kostarelos K. Monoclonal antibody-targeted, temperature-sensitive liposomes: *In vivo* tumor chemotherapeutics in combination with mild hyperthermia. *J. Control. Release*, 2014, vol. 196, pp. 332–343.
2. Al-Ahmady Z. S., Hadjidemetriou M., Gubbins J., Kostarelos K. Formation of protein corona *in vivo* affects drug release from temperature-sensitive liposomes. *J. Control. Release*, 2018, vol. 276, pp. 157–167.
3. Park E.-J., Kim S.-W., Yoon C., Kim Y., Kim J. S. Disturbance of ion environment and immune regulation following biodistribution of magnetic iron oxide nanoparticles injected intravenously. *Toxicol. Lett.*, 2016, vol. 243, pp. 67–77.
4. Xie P., Yang S.-T., He T., Yang S., Tang X.-H. Bioaccumulation and Toxicity of Carbon Nanoparticles Suspension Injection in Intravenously Exposed Mice. *Int. J. Mol. Sci.*, 2017, vol. 18, pp. 2562.
5. Sonavane G., Tomoda K., Makino K. Biodistribution of colloidal gold nanoparticles after intravenous administration: Effect of particle size. *Colloids Surfaces B Biointerfaces*, 2008, vol. 66, pp. 274–280.
6. Szebeni J. Complement activation-related pseudoallergy: A stress reaction in blood triggered by nanomedicines and biologicals. *Mol. Immunol.*, 2014, vol. 61, pp. 163–173.
7. Moghimi S. M., Wibroe P. P., Helvig S. Y., Farhangrazi Z. S., Hunter A. C. Genomic perspectives in inter-individual adverse responses following nanomedicine administration: The way forward. *Adv. Drug Deliv. Rev.*, 2012, vol. 64, pp. 1385–1393.
8. Cui M.-Y., Dong Z., Chan T., Luo Y., Huang K., Xu L., Li Z.-P., Li X. Effect of Intravenous Injection Site on Contrast Enhancement of CT Thorax – Comparison Between Injection on Two Sides of Cubital. *Curr. Med. Imaging Rev.*, 2017, vol. 14, pp. 124–128.
9. Khan A. N., Ermakov A., Sukhorukov G., Hao Y. Radio frequency controlled wireless drug delivery devices. *Appl. Phys. Rev.*, 2019, vol. 6, 041301.
10. Din F. U., Aman W., Ullah I., Qureshi O. S., Mustapha O., Shafique S., Zeb A. Effective use of nanocarriers as drug delivery systems for the treatment of selected tumors. *Int. J. Nanomedicine*, 2017, vol. 12, pp. 7291–7309.
11. Ward M. A., Georgiou T. K. Thermoresponsive Polymers for Biomedical Applications. *Polymers (Basel)*, 2011, vol. 3, pp. 1215–1242.
12. Bikram M., West J. L. Thermo-responsive systems for controlled drug delivery. *Expert Opin. Drug Deliv.*, 2008, vol. 5, pp. 1077–1091.

13. Almeida H., Amaral M. H., Lobão P. Temperature and pH stimuli-responsive polymers and their applications in controlled and selfregulated drug delivery. *J. Appl. Pharm. Sci.*, 2012, vol. 5, pp. 22–32.
14. Liu J., Huang Y., Kumar A., Tan A., Jin S., Mozhi A., Liang X.-J. pH-Sensitive nano-systems for drug delivery in cancer therapy. *Biotechnol. Adv.*, 2014, vol. 32, pp. 693–710.
15. Zhou Y., Ye H., Chen Y., Zhu R., Yin L. Photoresponsive Drug/Gene Delivery Systems. *Biomacromolecules*, 2018, vol. 19, pp. 1840–1857.
16. Cho H. J., Chung M., Shim M. S. Engineered photoresponsive materials for near-infrared-triggered drug delivery. *J. Ind. Eng. Chem.*, 2015, vol. 31, pp. 15–25.
17. Lee C. H., Kim H., Harburg D. V., Park G., Ma Y., Pan T., Kim J. S., Lee N. Y., Kim B. H., Jang K.-I., Kang S.-K., Huang Y., Kim J., Lee K.-M., Leal C., Rogers J. A. Biological lipid membranes for on-demand, wireless drug delivery from thin, bioresorbable electronic implants. *NPG Asia Mater.*, 2015, vol. 7, pp. e227–e227.
18. Farra R., Sheppard N. F., McCabe L., Neer R. M., Anderson J. M., Santini J. T., Cima M. J., Langer R. First-in-Human Testing of a Wirelessly Controlled Drug Delivery Microchip. *Sci. Transl. Med.*, 2012, vol. 4, pp. 122ra21-122ra21.
19. Ochoa M., Mousoulis C., Ziaie B. Polymeric microdevices for transdermal and subcutaneous drug delivery. *Adv. Drug Deliv. Rev.*, 2012, vol. 64, pp. 1603–1616.
20. Vikram Singh A., Sitti M. Targeted Drug Delivery and Imaging Using Mobile Milli/Microrobots: A Promising Future Towards Theranostic Pharmaceutical Design. *Curr. Pharm. Des.*, 2016, vol. 22, pp. 1418–1428.
21. Fusco S., Huang H.-W., Peyer K. E., Peters C., Häberli M., Ulbers A., Spyrogianni A., Pellicer E., Sort J., Pratsinis S. E., Nelson B. J., Sakar M. S., Pané S. Shape-Switching Microrobots for Medical Applications: The Influence of Shape in Drug Delivery and Locomotion. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2015, vol. 7, pp. 6803–6811.
22. Beccani M., Di Natali C., Aiello G., Benjamin C., Susilo E., Valdastri P. A Magnetic Drug Delivery Capsule Based on a Coil Actuation Mechanism. *Procedia Eng.*, 2015, vol. 120, pp. 53–56.
23. Stewart F., Cox B., Vorstius J., Verbeni A., Qiu Y., Cochran S. Capsule-based ultrasound-mediated targeted gastrointestinal drug delivery. *2015 IEEE International Ultrasonics Symposium* (IUS). Taipei, 2015, pp. 1–4.
24. Vinodini Ramesh M., Mohan K. S., Nadarajan D. An in-body wireless communication system for targeted drug delivery: Design and simulation. *2014 International Symposium on Technology Management and Emerging Technologies*. Bundung, 2014, pp. 56–61.
25. Lengert E., Saveleva M., Abalymov A., Atkin V., Wuytens P. C., Kamyshinsky R., Vasiliev A. L., Gorin D. A., Sukhorukov G. B., Skirtach A. G., Parakhonskiy B. Silver Alginate Hydrogel Micro- and Nanocontainers for Theranostics: Synthesis, Encapsulation, Remote Release, and Detection. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2017, vol. 9, pp. 21949–21958.
26. Ermakov A., Lim S. H., Gorelik S., Kauling A. P., de Oliveira R. V. B., Castro Neto A. H., Glukhovskoy E., Gorin D. A., Sukhorukov G. B., Kiryukhin M. V. Polyelectrolyte-Graphene Oxide Multilayer Composites for Array of Microchambers which are Mechanically Robust and Responsive to NIR Light. *Macromol. Rapid Commun.*, 2019, vol. 40, pp. 1700868.
27. Sindeeva O. A., Gusliakova O. I., Inozemtseva O. A., Abdurashitov A. S., Brodovskaya E. P., Gai M., Tuchin V. V., Gorin D. A., Sukhorukov G. B. Effect of a Controlled Release of Epinephrine Hydrochloride from PLGA Microchamber Array: *In Vivo* Studies. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018, vol. 10, pp. 37855–37864.
28. Zykova Y., Kudryavtseva V., Gai M., Kozelskaya A., Frueh J., Sukhorukov G., Tverdokhlebov S. Free-standing microchamber arrays as a biodegradable drug depot system for implant coatings. *Eur. Polym. J.*, 2019, vol. 114, pp. 72–80.
29. Kim V. P., Ermakov A. V., Glukhovskoy E. G., Rakhnyanskaya A. A., Gulyaev Y. V., Cherepenin V. A., Taranov I. V., Kormakova P. A., Potapenkov K. V., Usmanov N. N., Saletsky A. M., Koksharov Y. A., Khomutov G. B. Planar nanosystems on the basis of complexes formed by amphiphilic polyamine, magnetite nanoparticles, and DNA molecules. *Nanotechnologies Russ.*, 2014, vol. 9, pp. 280–287.
30. Lengert E., Parakhonskiy B., Khalenkow D., Zečić A., Vangheel M., Monje Moreno J. M., Braeckman B. P., Skirtach A. G. Laser-induced remote release *in vivo* in C. elegans from novel silver nanoparticles-alginate hydrogel shells. *Nanoscale*, 2018, vol. 10, pp. 17249–17256.
31. Yan J., Miao Y., Tan H., Zhou T., Ling Z., Chen Y., Xing X., Hu X. Injectable alginate/hydroxyapatite gel scaffold combined with gelatin microspheres for drug delivery and bone tissue engineering. *Mater. Sci. Eng. C*, 2016, vol. 63, pp. 274–284.
32. Alessandri G., Coccè V., Pastorino F., Paroni R., Dei Cas M., Restelli F., Pollo B., Gatti L., Tremolada C., Berenzi A., Parati E., Brini A. T., Bondiolotti G., Ponzoni M., Pessina A. Microfragmented human fat tissue is a natural scaffold for drug delivery: Potential application in cancer chemotherapy. *J. Control. Release*, 2019, vol. 302, pp. 2–18.
33. Saveleva M. S., Ivanov A. N., Kurtukova M. O., Atkin V. S., Ivanova A. G., Lyubun G. P., Martyukova A. V., Cherevko E. I., Sargsyan A. K., Fedonnikov A. S., Norkin I. A., Skirtach A. G., Gorin D. A., Parakhonskiy B. V. Hybrid PCL/$CaCO_3$ scaffolds with capabilities of carrying biologically active molecules: Synthesis, loading and *in vivo* applications. *Mater. Sci. Eng. C*, 2018, vol. 85, pp. 57–67.
34. Dvir T., Timko B. P., Kohane D. S., Langer R. Nanotechnological strategies for engineering complex tissues. *Nat. Nanotechnol.*, 2011, vol. 6, pp. 13–22.
35. Azevedo H. S., Pashkuleva I. Biomimetic supramolecular designs for the controlled release of growth factors in bone regeneration. *Adv. Drug Deliv. Rev.*, 2015, vol. 94, pp. 63–76.

36. Ramachandran R., Junnuthula V. R., Gowd G. S., Ashokan A., Thomas J., Peethambaran R., Thomas A., Unni A. K. K., Panikar D., Nair S. V., Koyakutty M. Theranostic 3-Dimensional nano brain-implant for prolonged and localized treatment of recurrent glioma. *Sci. Rep.*, 2017, vol. 7, pp. 43271–43281.
37. Takehara H., Katsuragi Y., Ohta Y., Motoyama M., Takehara H., Noda T., Sasagawa K., Tokuda T., Ohta J. Implantable micro-optical semiconductor devices for optical theranostics in deep tissue. *Appl. Phys. Express*, 2016, vol. 9, pp. 047001.
38. Zhang X., Hu W., Li J., Tao L., Wei Y. A comparative study of cellular uptake and cytotoxicity of multi-walled carbon nanotubes, graphene oxide, and nanodiamond. *Toxicol. Res. (Camb).*, 2012, vol. 1, pp. 62–68.
39. Song H. S., Kwon O. S., Kim J.-H., Conde J., Artzi N. 3D hydrogel scaffold doped with 2D graphene materials for biosensors and bioelectronics. *Biosens. Bioelectron.*, 2017, vol. 89, pp. 187–200.
40. Gray M., Meehan J., Ward C., Langdon S. P., Kunkler I. H., Murray A., Argyle D. Implantable biosensors and their contribution to the future of precision medicine. *Vet. J.*, 2018, vol. 239, pp. 21–29.
41. Ha E.-J., Kim B.-S., Park C., Lee J.-O., Paik H. Electroactive hydrogel comprising poly(methyl 2-acetamido acrylate) for an artificial actuator. *J. Appl. Phys.*, 2013, vol. 114, pp. 054701.
42. Tai Z., Yang J., Qi Y., Yan X., Xue Q. Synthesis of a graphene oxide–polyacrylic acid nanocomposite hydrogel and its swelling and electroresponsive properties. *RSC Adv.*, 2013, vol. 3, pp. 12751–12757.
43. Lo C.-W., Zhu D., Jiang H. An infrared-light responsive graphene-oxide incorporated poly(N-isopropylacrylamide) hydrogel nanocomposite. *Soft Matter*, 2011, vol. 7, pp. 5604–5609.
44. Andreu-Perez J., Leff D. R., Ip H. M. D., Yang G. From Wearable Sensors to Smart Implants – Towards Pervasive and Personalised Healthcare. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 2015, vol. 62, pp. 2750–2762.
45. Abdur Rahman A. R., Justin G., Guiseppi-Elie A. Towards an implantable biochip for glucose and lactate monitoring using microdisc electrode arrays (MDEAs). *Biomed. Microdevices*, 2009, vol. 11, pp. 75–85.
46. Steeves C. A., Young Y. L., Liu Z., Bapat A., Bhalerao K., Soboyejo A. B. O., Soboyejo W. O. Membrane thickness design of implantable bio-MEMS sensors for the in-situ monitoring of blood flow. *J. Mater. Sci. Mater. Med.*, 2007, vol. 18, pp. 25–37.
47. Polat B. E., Hart D., Langer R., Blankschtein D. Ultrasound-mediated transdermal drug delivery: Mechanisms, scope, and emerging trends. *J. Control. Release*, 2011, vol. 152, pp. 330–348.
48. Levy D., Kost J., Meshulam Y., Langer R. Effect of ultrasound on transdermal drug delivery to rats and guinea pigs. *J. Clin. Invest.*, 1989, vol. 83, pp. 2074–2078.
49. Merino V., Castellano A. L., Delgado-Charro M. B. Iontophoresis for Therapeutic Drug Delivery and Non-invasive Sampling Applications. In: *Percutaneous Penetration Enhancers Physical Methods in Penetration Enhancement*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2017, pp. 77–101.
50. Burnette R. R. Ongpipattanakul B. Characterization of the Permselective Properties of Excised Human Skin During Iontophoresis. *J. Pharm. Sci.*, 1987, vol. 76, pp. 765–773.
51. Hoogstraate A., Srinivasan V., Sims S., Higuchi W. Iontophoretic enhancement of peptides: behaviour of leuprolide versus model permeants. *J. Control. Release*, 1994, vol. 31, pp. 41–47.
52. Park J., Lee H., Lim G.-S., Kim N., Kim D., Kim Y.-C. Enhanced Transdermal Drug Delivery by Sonophoresis and Simultaneous Application of Sonophoresis and Iontophoresis. *AAPS PharmSciTech*, 2019, vol. 20, pp. 96.
53. Tuan-Mahmood T.-M., McCrudden M. T. C., Torrisi B. M., McAlister E., Garland M. J., Singh T. R. R., Donnelly R. F. Microneedles for intradermal and transdermal drug delivery. *Eur. J. Pharm. Sci.*, 2013, vol. 50, pp. 623–637.
54. Donnelly R. F., Singh T. R. R., Garland M. J., Migalska K., Majithiya R., McCrudden C. M., Kole P. L., Mahmood T. M. T., McCarthy H. O., Woolfson A. D. Hydrogel-Forming Microneedle Arrays for Enhanced Transdermal Drug Delivery. *Adv. Funct. Mater.*, 2012, vol. 22, pp. 4879–4890.
55. Kapoor M. S., GuhaSarkar S., Banerjee R. Stratum corneum modulation by chemical enhancers and lipid nanostructures: implications for transdermal drug delivery. *Ther. Deliv.*, 2017, vol. 8, pp. 701–718.
56. Ibrahim S. A., Li S. K. Efficiency of Fatty Acids as Chemical Penetration Enhancers: Mechanisms and Structure Enhancement Relationship. *Pharm. Res.*, 2010, vol. 27, pp. 115–125.
57. Shah P. P., Desai P. R., Channer D., Singh M. Enhanced skin permeation using polyarginine modified nanostructured lipid carriers. *J. Control. Release*, 2012, vol. 161, pp. 735–745.
58. Juanola-Feliu E., Colomer-Farrarons J., Miribel-Català P., Samitier J., Valls-Pasola J. Market challenges facing academic research in commercializing nano-enabled implantable devices for *in-vivo* biomedical analysis. *Technovation*, 2012, vol. 32, iss. 3–4, pp. 193–204.
59. Sullivan F., Wyatt J. C. How informatics tools help deal with patients' problems. *BMJ*, 2005, vol. 331, pp. 955–957.
60. Juanola-Feliu E., Miribel-Català P., Avilés C., Colomer-Farrarons J., González-Piñero M., Samitier J. Design of a Customized Multipurpose Nano-Enabled Implantable System for *in-vivo* Theranostics. *Sensors*, 2014, vol. 14, pp. 19275–19306.

Cite this article as:

Ermakov A. V., Lengert E. V., Venig S. B. Nanomedicine and Drug Delivery Strategies for Theranostics Applications. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2020, vol. 20, iss. 2, pp. 116–124 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-2-116-124

УДК 577

Стратегии в области наномедицины и доставки лекарств для применения в тераностике

А. В. Ермаков, Е. В. Ленгерт, С. Б. Вениг

Ермаков Алексей Вадимович, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского; Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова, отдел биомедицинской инженерии, ermakov.ssu@gmail.com

Ленгерт Екатерина Владимировна, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, lengertkatrin@mail.ru

Вениг Сергей Борисович, доктор физико-математических наук, профессор, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, sergey.venig@gmail.com

Системы на основе подходов наномедицины и доставки лекарств являются относительно новой, но быстро развивающейся отраслью науки, которая исследует материалы в диапазоне нано- и микромасштабов в качестве инструментов диагностики или носителей для доставки терапевтических средств к определенным целевым участкам в организме. В данном обзоре кратко представлены достижения последних лет в области наномедицины и систем доставки лекарств на основе наноматериалов и носителей лекарственных средств различного состава, специфических физико-химических усилителей, различных устройств и методов. Рассматриваются и сравниваются несколько основных стратегий доставки систем для терапии и диагностики *in vivo*, включая инъекции, имплантацию и трансдермальную доставку. Все эти пути обладают определенными преимуществами относительно абсорбции лекарственных средств, доставки их к заданным участкам организма, пролонгации их действия, снижения дозировки и многих других параметров, которые необходимо учитывать для обеспечения правильного подхода к лечению конкретного заболевания. Обсуждаемые здесь инновационные подходы к доставке лекарств открывают возможности для эффективного лечения широкого спектра заболеваний, которые невозможно победить традиционными подходами, особенно хроническими. Хотя трансдермальная доставка предполагает под собой многообещающий неинвазивный способ лечения различных заболеваний, относительно хронических заболеваний имплантация устройств для доставки лекарств с двунаправленной связью является более эффективным подходом, что в будущем может значительно улучшить качество жизни. Разнообразие появляющихся технологий в микроэлектронике, сенсорах и биоматериалах приводит к кардинальным изменениям в медицинской промышленности и появлению новых систем, обеспечивающих лечение в рамках тераностики.

Ключевые слова: наномедицина, доставка лекарств, тераностика, имплантирование, трансдермальные системы.

Поступила в редакцию: 05.03.2020 / Принята: 24.03.2020 / Опубликована: 01.06.2020

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках выполнения государственного задания (проект № FSRR-2020-0002). Алексей Ермаков благодарит стипендиальную программу Президента Российской Федерации (проект СП-1488.2019.4).

Образец для цитирования:

Ermakov A. V., Lengert E. V., Venig S. B. Nanomedicine and Drug Delivery Strategies for Theranostics Applications [*Ермаков А. В., Ленгерт Е. В., Вениг С. Б.* Стратегии в области наномедицины и доставки лекарств для применения в тераностике] // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2020. Т. 20, вып. 2. С. 116–124. DOI: https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-2-116-124

УДК 53.043:577.38

Индекс отражения пульсовой волны у юных спортсменов

Ан. В. Скрипаль, А. С. Бахметьев, Н. Б. Брилёнок, С. Ю. Добдин, А. А. Сагайдачный, Р. Т. Баатыров, А. Д. Усанов, А. С. Тихонова

Скрипаль Анатолий Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой медицинской физики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, skripalav@info.sgu.ru

Бахметьев Артем Сергеевич, кандидат медицинских наук, доцент кафедры лучевой диагностики и лучевой терапии имени Н. Е. Штерна, Саратовский государственный медицинский университет имени В. И. Разумовского, bakhmetev.artem@yandex.ru

Брилёнок Наиля Булатовна, кандидат философских наук, заведующий кафедрой физического воспитания и спорта, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, brilenoknb@yandex.ru

Добдин Сергей Юрьевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твёрдого тела, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, dobdinsy@info.sgu.ru

Сагайдачный Андрей Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры медицинской физики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, andsag@yandex.ru

Баатыров Рахим Таалайбекович, аспирант кафедры медицинской физики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, rahim_baatyrov@mail.ru

Усанов Андрей Дмитриевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры медицинской физики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, aka_norton@mail.ru

Тихонова Антонина Сергеевна, магистрант кафедры медицинской физики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, pruss1525@gmail.com

Представлены результаты анализа индексов отражения пульсовой волны, измеренные по зависимостям давления в артериальном русле методом сфигмографии в области плечевой артерии. Установлено, что, по сравнению с группой нетренированных испытуемых, индексы отражения, измеренные у спортсменов, показывающих высокие спортивные результаты, после снятия плечевой манжеточной окклюзии имеют более высокие значения, чем до окклюзии. Изменение индекса отражения характеризуется немонотонной динамикой, проявляющейся в первоначальном росте, а затем снижении до значения, близкого к исходному. Обсуждается связь амплитуды обратной волны с функциональными свойствами гладкомышечного слоя артериальных сосудов спортсменов и возможное влияние толщины эндотелиального гликокаликса на результаты окклюзионной пробы.

Ключевые слова: пульсовая волна, индекс отражения, окклюзионная проба, гладкомышечный слой, гликокаликс, спортивная медицина.

Поступила в редакцию: 28.02.2020 / Принята: 20.03.2020 / Опубликована: 01.06.2020

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

DOI: https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-2-125-133

Введение

Индекс отражения представляет собой отношение амплитуд обратной волны в диастоле к амплитуде прямой волны в систоле, формирующимися в артериальном русле кровеносной системы. Этот параметр используется для определения артериальной гипертензии в основном у взрослых пациентов и характеризует степень развития атеросклероза [1, 2]. Согласно современным представлениям в развитии систолической артериальной гипертензии ведущую роль играет преждевременное возвращение отраженной от мест ветвления артерий и резистивных сосудов пульсовой волны [3–5].

Основными методами диагностики артериальных и периферических сосудов являются ультразвуковая допплерография [6], фотоплетизмография [2], реография [7] и сфигмография [8]. Для визуализации состояния сосудистой системы спортсменов получили развитие методы дуплексного ультразвукового сканирования артериального русла [9–11], магниторезонансной томографии [12], тепловизионной диагностики сосудистого русла [13, 14]. Однако развитие методов диагностики артериальной сосудистой системы, требующих технически сложной и дорогостоящей системы визуализации и измерения сосудистого русла, вступает в противоречие с принципами развития скрининговой диагностики.

У юных спортсменов сердечно-сосудистая система подвержена функциональным изменениям, связанным с увеличением как вазодилататорной емкости сосудов, так и увеличением

© Скрипаль Ан. В., Бахметьев А. С., Бриленок Н. Б., Добдин С. Ю., Сагайдачный А. А., Баатыров Р. Т., Усанов А. Д., Тихонова А. С., 2020

вазоконстрикции [15–17]. Для скрининг диагностики функциональных изменений сосудистой системы спортсменов может быть использован сфигмографический метод регистрации индекса отражения, который может характеризовать изменение тонуса гладкомышечной стенки сосуда при функциональной нагрузке. При этом окклюзионная проба, проводимая, например, в области плеча, создает условия кратковременной ишемии тканей конечности так же, как и физическая нагрузка, во время которой увеличивается потребность тканей в кислороде. Поэтому местную реакцию организма на окклюзионную пробу, проводимую в области конечности, в некотором смысле можно соотносить с реакцией организма на общую физическую нагрузку. Таким образом, для мониторинга процесса адаптации сердечнососудистой системы спортсменов к физической нагрузке и количественной оценки прогресса тренировок актуальным является разработка соответствующего метода функциональной диагностики.

Цель работы – установление закономерностей изменения индекса отражения пульсовой волны у юных спортсменов, имеющих высокий спортивный статус, после проведения окклюзионной пробы.

Материал и методы исследования

Регистрация и анализ формы пульсовой волны проводились с использованием программно-аппаратного комплекса (рис. 1), включающего следующие элементы: инженерная станция для регистрации аналогового сигнала NI ELVIS (National Instruments, США) *1*; блок аналого-цифрового преобразователя (ADC) на основе NI USB DAQmx – устройства *2*; блок для создания компрессии и регистрации давления (манжета, резиновая груша, монометр, датчик давления MPX5050GP (Freescale Semiconductor, США) *3*; персональный компьютер *4*; программное обеспечение для создания виртуальных приборов LabView 8.5.

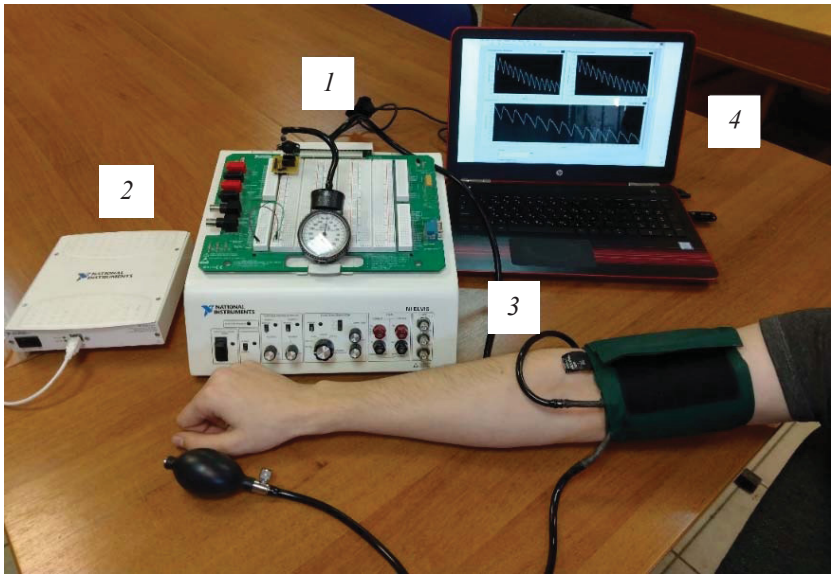


Рис. 1. Программно-аппаратный комплекс для регистрации пульсовой волны и расчёта индекса отражения до и после окклюзионного теста

Fig. 1. Hardware- software complex for registration of the pulse wave and calculation of the reflection index before and after occlusion test

Регистрация пульсовой волны осуществлялась методом сфигмографии следующим образом. Испытуемый располагался в положении сидя; манжету фиксировали в области плеча, нагнетали давление в ней до диастолического и регистрировали форму пульсовой волны до окклюзионного теста. Затем в манжете нагнетали давление на 30–40 мм рт. ст. выше систолического с целью создания полной артериовенозной окклюзии на 3 мин. Непосредственно сразу после снятия окклюзии и сброса давления в манжете до диастолического проводили регистрацию формы пульсовой волны в течение 30 с. Полученные данные сохранялись в памяти компьютера.

На рис. 2 показаны этапы обработки оцифрованного сигнала и расчёта индекса отражения до и после окклюзионного теста в программе LabView 8.5.

Рис. 2. Блок-схема обработки оцифрованного сигнала и расчёта индекса отражения
Fig. 2. Block diagram for processing a digitized signal and calculating the reflection index

На этапе 1 происходит загрузка массива измеряемых величин в программу для предварительной обработки. Этап 2 включает использование модуля DAQ assistant с частотой дискретизаций 1 кГц, который преобразует напряжение от пневмодатчика MPX5050GP (мВ) в давление (мм рт.ст.) по калибровочным зависимостям. Преобразованный сигнал фильтруется от шумов (этап 3) и нормируется по минимальному и максимальному значению на каждом кардиоинтервале пульсовой волны в диапазоне значений от 0 до 1 (этап 4). Расчёт индекса отражения пульсовой волны проводится на этапе 5 для каждого кардиоинтервала пульсовой волны и сохраняется в отдельный файл для каждого испытуемого (этап 6).

Индекс отражения (*RI*) определялся методом контурного анализа периферической пульсовой волны через отношение амплитуды обратной волны P_{min} к амплитуде прямой волны P_{max} [1, 2], используя выражение

$$RI = \frac{P_{min}}{P_{max}}.$$

Для обследования были выбраны две группы 16-летних пациентов: группа из 15 спортсменов, занимающихся греблей на байдарках и каноэ, имеющих высокие спортивные разряды, и контрольная группа, включающая 15 обследуемых без выявленных сердечно-сосудистых патологий. Перед началом диагностической процедуры каждому испытуемому измеряли артериальное давление на автоматическом тонометре и антропометрические показатели (рост, массу тела). Обследование проводилось после двухчасового отдыха спортсменов.

Письменное информированное согласие было получено от всех участников, а также обследуемые были ознакомлены с процедурой проведения исследования и проинформированы о его безопасности или возможных негативных последствиях. Исследование одобрено этическим комитетом Саратовского государственного медицинского университета имени В. И. Разумовского.

Результаты исследования

Результаты измерений формы пульсовой волны для 16-летнего спортсмена, имеющего звание кандидата в мастера спорта по гребле на байдарках и каноэ, при диастолическом давлении в манжете 70 мм рт.ст. приведены на рис. 3: *а* – до окклюзионного теста, *б* – после окклюзионного теста. Точками на рисунке обозначены значения амплитуд давления, используемых для расчета индекса отражения, P_{min} – амплитуда обратной волны, P_{max} – амплитуда прямой волны.

Как следует из результатов анализа, у этого спортсмена после трехминутного окклюзионного теста индекс отражения имеет более высокие значения, чем до теста, и характеризуется немонотонной динамикой, проявляющейся в первоначальном росте, а затем снижении к близкому к исходному значению. На рис. 4 приведена усредненная по 15 спортсменам динамика изменения индекса отражения до (*2*) и после (*4*) окклюзионного теста. На зависимостях показан разброс значений, вычисленный по среднему квадратическому отклонению.

Как видно из рис. 4, через несколько секунд после снятия окклюзии наблюдается макси-

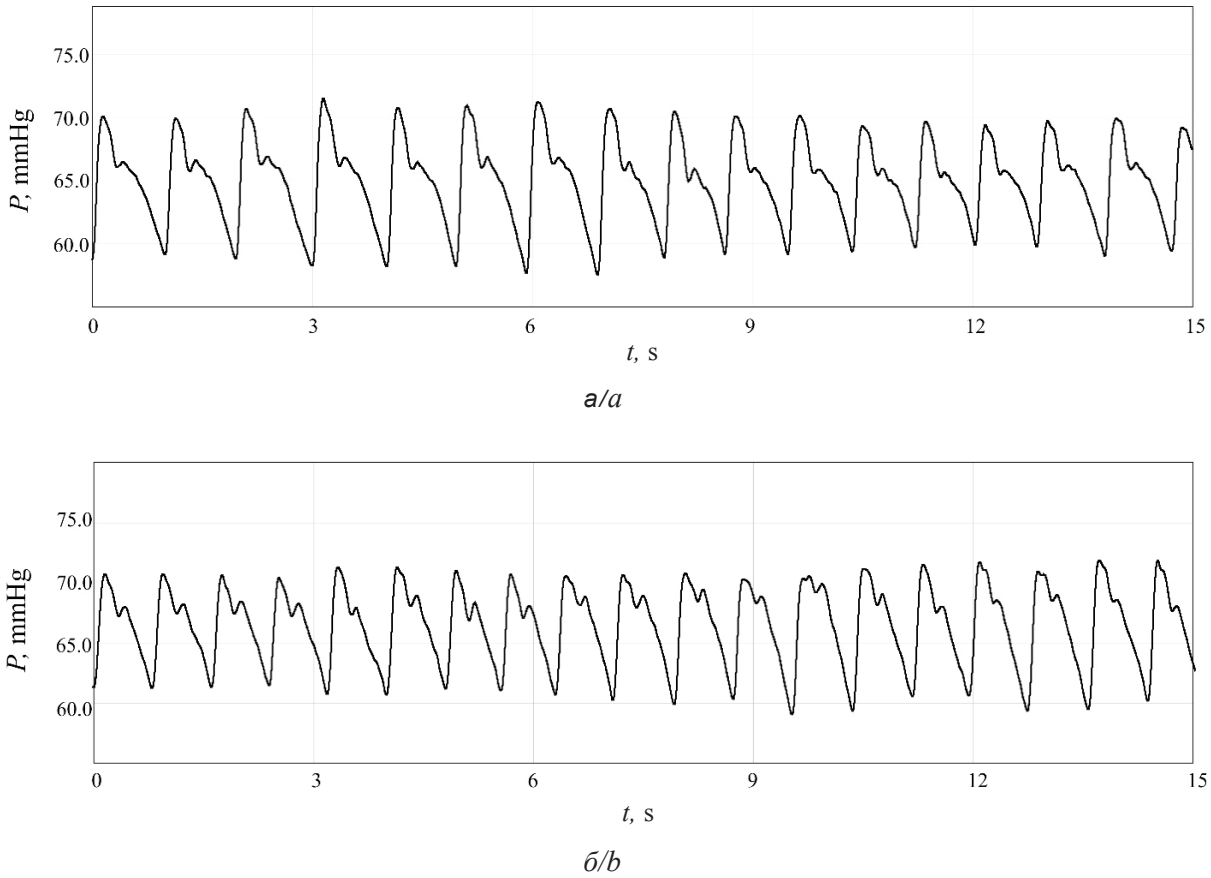


Рис. 3. Пульсовая волна 16-летнего спортсмена: *а* – до окклюзионного теста, *б* – после окклюзионного теста
Fig. 3. Pulse wave of a 16-year-old athlete: *a* – before the occlusion test, *b* – after the occlusion test

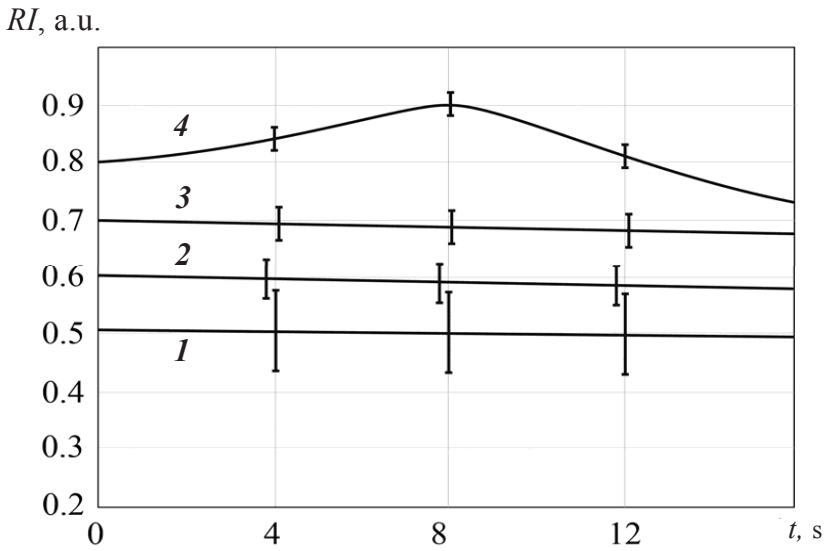
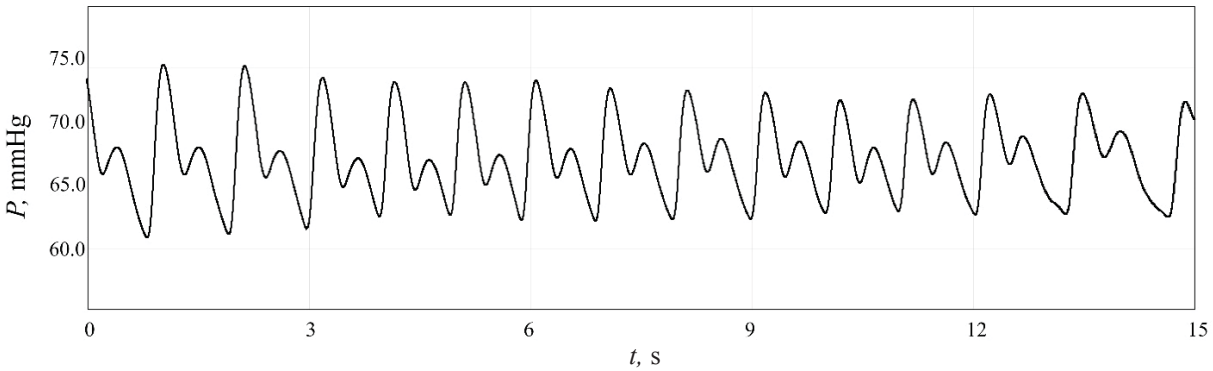


Рис. 4. Зависимости изменения индекса отражения от времени до *1*, *2* и после *3*, *4* окклюзионного теста: *1*, *3* – для не спортивной группы обследуемых без выявленных сердечно-сосудистых патологий, *2*, *4* – для группы юных спортсменов
Fig. 4. Dependences of changes in the reflection index before *1*, *2* and after *3*, *4* occlusion test: *1*, *3* – for a non- sports group of subjects without detected cardiovascular pathologies, *2*, *4* – for a group of young athletes

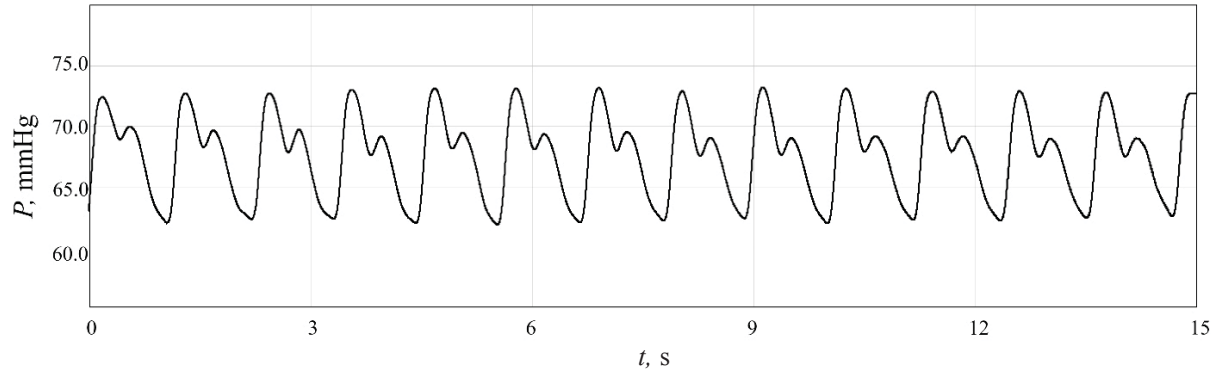
мум индекса отражения с последующей тенденцией к его возвращению к исходному значению. При этом уменьшается разброс значений, вычисленный по среднему квадратическому отклонению.

Следует заметить, что повышенное исходное значение индекса отражения в группе спортсменов может быть вызвано повышенным уровнем стресса испытуемых. Для выбранной группы спортсменов, ведущих активный тренировочный процесс, двухчасовой отдых после тренировки может быть недостаточным для полного восстановления.

Результаты измерений формы пульсовой волны для 16-летнего обследуемого, не страдающего сердечно-сосудистой патологией, входящего в контрольную группу, при диастолическом давлении в манжете 65 мм рт.ст. приведены на рис. 5: *а* – до окклюзионного теста, *б* – после окклюзионного теста.



а/a



б/b

Рис. 5. Пульсовая волна 16-летнего обследуемого, не страдающего сердечно-сосудистой патологией: *а* – до окклюзионного теста, *б* – после окклюзионного теста

Fig. 5. Pulse wave of a 16-year-old subject who does not suffer from cardiovascular disease: *a* – before the occlusion test, *b* – after the occlusion test

Как следует из результатов анализа, у обследуемого из не спортивной группы обследуемых без выявленных сердечно-сосудистых патологий сразу после трехминутного окклюзионного теста индекс отражения имеет повышенное значение и медленно уменьшается без проявления немонотонной динамики. При этом динамика возврата индекса отражения в исходное значение растягивалась до 60 с.

На рис. 4 приведена зависимость изменения индекса отражения от времени до (*1*) и после (*3*) окклюзионного теста для не спортивной группы обследуемых без выявленных сердечно-сосудистых патологий. Видно, что после снятия окклюзии наблюдается небольшое увеличение усредненного по 15 пациентам значения индекса отражения с последующей тенденцией к его возвращению к исходному значению. При этом

также уменьшается разброс значений, вычисленный по среднему квадратическому отклонению.

Статистическую обработку результатов проводили с помощью программы Statistica 13.0. Данные на рис. 4 представлены в виде зависимости среднего значения показателя в выборке от времени и разброса значений, вычисленного по среднему квадратическому отклонению в выборке. Существенность различий средних величин оценивали по критерию Стъюдента. Критический уровень значимости p при проверке статистических гипотез принимался равным 0.05.

Полученные результаты свидетельствуют, что измерение индекса отражения без окклюзии не дает достоверных отличий признаков функционального изменения артериальных сосудов, в то время как проведение трехминутного окклюзионного теста позволяет получить существенные отличия в значениях индекса отражения при значении критического уровня значимости $p < 0.05$.

Обсуждение

Проведенные измерения показали, что индексы отражения у юных спортсменов, измеренные сразу после окклюзионой пробы, имеют более высокие значения, чем до теста, и характеризуется немонотонной динамикой, проявляющейся в первоначальном росте, а затем снижении к близкому к исходному значению. У неспортивной группы обследуемых без выявленных сердечно-сосудистых патологий сразу после трехминутного окклюзионного теста индекс отражения имеет повышенное значение и медленно уменьшается без проявления немонотонной динамики. При этом время возврата индекса отражения в исходное значение увеличивалось до 60 с.

Обнаруженные закономерности трудно объяснить с точки зрения отражения объема крови, проходящего по аорте и крупным магистральным артериям от бифуркаций сосудов.

Известно, что отличительной особенностью организма спортсменов является постепенное ремоделирование стенки артериальных сосудов, происходящее под воздействием повышенных физических нагрузок. Процесс ремоделирования сопровождается, в том числе, изменением функциональных свойств гладкомышечной стенки сосудов. Степень влияния функционального состояния гладкомышечной стенки на тонус сосуда постепенно увеличивается на пути движения крови от левого желудочка через аорту, крупные, мелкие артерии и артериолы.

Организм спортсменов, по сравнению с организмом нетренированных людей, во время физической нагрузки должен обеспечивать в значительной степени большую пропускную способность артериальных сосудов для обеспечения адекватного объемного кровотока через работающие скелетные мышцы, а также более быструю адаптацию сосудистой системы к увеличению нагрузки. Этим может объясняться увеличение индекса отражения у спортсменов при резком увеличении скорости кровотока после снятия окклюзии (см. рис. 4) с постепенным снижением индекса, свидетельствующем об адаптации тонуса сосудов к уровню нагрузки.

Кроме этого, как было установлено [18, 19], у спортсменов чувствительность гладкомышечного слоя сосудов к основному вазодилататору – оксиду азота – повышена. При этом, по данным [20], постоянные физические нагрузки могут включать как структурную перестройку сосудов (ангиогенез, ремоделирование), так и функциональную адаптацию, включающую фенотипическое изменение гладкомышечного слоя сосудов и эндотелиальных клеток.

Также следует учитывать возможное воздействие регулярных физических нагрузок на формирования слоя гликокаликса, который, по современным представлениям, играет определяющую роль в обеспечении механочувствительности эндотелия [21, 22], а именно: движущийся поток крови создает напряжение сдвига, воздействующее на стенку сосуда, при этом слой эндотелиального гликокаликса опосредует это воздействие на эндотелий и является своеобразным детектором величины напряжения сдвига. При повреждении слоя гликокаликса возникает снижение дилататорного ответа сосуда на повышение скорости кровотока [23]. Физические тренировки, напротив, оказывают положительное воздействие на увеличение дилататорного ответа плечевой артерии после снятия окклюзии, как было показано на группе нормальных испытуемых [24]. Таким образом, у обследованной нами группы спортсменов более выраженная динамика тонуса сосудов и индекса отражения после снятия окклюзии, на наш взгляд, может объясняться как увеличением толщины слоя гликокаликса вследствие регулярных физических тренировок, так и увеличенной скоростью кровотока у спортсменов до и после окклюзии по сравнению с группой нетренированных испытуемых. Проверка данных предположений может являться темой отдельного исследования.

Заключение

Сфигмографическое исследование реакции плечевой артерии спортсменов на окклюзионную пробу показало наличие немонотонной динамики индекса отражения пульсовой волны. Параметры кривой изменения индекса отражения могут использоваться как для характеристики текущего уровня адаптации артериальной системы спортсменов к физической нагрузке, так и для мониторинга изменения функциональных свойств сосудов в процессе серии тренировок. Установленные закономерности изменения индекса отражения трудно объяснить при использовании представлений о дополнительной волне сфигмограммы как волне, отраженной от бифуркаций дистально расположенных артерий. Поэтому вопрос о природе и механизмах формирования отраженной волны в артериальной сосудистой системе остается открытым.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-32-90072).

Список литературы

1. *Иванов С. В., Рябиков А. Н., Малютина С. К.* Жесткость сосудистой стенки и отражение пульсовой волны в связи с артериальной гипертензией // Сиб. науч. мед. журн. 2008. № 3. С. 9–12.
2. *Калакутский Л. И., Федотов А. А.* Диагностика дисфункции сосудистого эндотелия методом контурного анализа пульсовой волны // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2009. Т. 98, № 9. С. 93–98.
3. *Сторожаков Г. И., Верещагина Г. С., Червякова Ю. Б., Федотова Н. М.* Оценка эластических свойств артериальной стенки у больных артериальной гипертонией молодого возраста // Артериальная гипертензия. 2005. Т. 11, № 1. С. 17–20. DOI: 10.18705/1607-419X-2005-11-1-17-20
4. *Ревенко С. В.* Гармонические перспективы реографии // Нервно-мышечные болезни. 2012. № 4. С. 8–19. DOI: 10.17650/2222-8721-2012-0-4-8-18
5. *Погодина М. В., Милягина И. В.* Объемная сфигмография – один из значимых методов определения артериальной жесткости у больных терапевтического профиля // Вестн. Смол. гос. мед. академии. 2017. Т. 16, № 2. С. 101–106.
6. *Кузьменко Е. А., Кривенко Л. Е., Шишкин В. П.* Роль цветового дуплексного сканирования в выявлении субклинического атеросклероза брахиоцефальных артерий у больных гипертонической болезнью // Здоровье. Медицинская экология. Наука. 2012. Т. 47–48, № 1–2. С. 198–201.
7. *Вихерт Т. А., Арзамасов К. М.* Современные направления ультразвукового метода исследования артерий и периферического кровообращения // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 11. 2013. Вып. 1. С. 161–166.
8. *Кривошеева Н. В.* Применение ультразвукового исследования в клинической практике при обследовании артериального русла нижней конечности у пациентов пожилого и старческого возраста с сахарным диабетом типа 2 // Клиническая геронтология. 2017. Т. 23, № 3–4. С. 32–39.
9. *Кремнева Е. И., Коновалов Р. Н., Кротенкова М. В.* Функциональная магнитно-резонансная томография // Анналы клинической и экспериментальной неврологии. 2011. Т. 5, № 1. С. 30–34.
10. *Клюшкин И. В., Фатыхов Р. И.* Современные методы диагностики при синдроме диабетической стопы // Казан. мед. журн. 2012. Т. 93, № 2. С. 298–301.
11. *Усанов Д. А., Скрипаль Ан. В., Протопопов А. А., Сагайдачный А. А., Рытик А. П., Мирошниченко Е. В.* Оценка функционального состояния кровеносных сосудов по анализу температурной реакции на окклюзионную пробу // Сарат. науч.-мед. журн. 2009. Т. 5, № 4. С. 554–558.
12. *Cioni G., Berni A., Gensini G. F., Abbate R., Boddi M.* Impaired Femoral Vascular Compliance and Endothelial Dysfunction in 30 Healthy Male Soccer Players : Competitive Sports and Local Detrimental Effects // Sports Health. 2015. Vol. 7, iss. 4. P. 335–340. DOI: 10.1177/1941738115577931
13. *Green D. J., Spence A., Rowley N., Thijssen D. H., Naylor L. H.* Why isn't flow-mediated dilation enhanced in athletes? // Med. Sci. Sport. Exerc. 2013. Vol. 45, iss. 1. P. 75–82.
14. *Кудря О. Н., Кирьянова М. А., Капилевич Л. В.* Особенности периферической гемодинамики спортсменов при адаптации к нагрузкам различной направленности // Бюл. сиб. медицины. 2012. Т. 11, № 3. С. 48–52.
15. *Бойцов С. А.* Что нового дает нам информация о жесткости стенки артерий и об отраженной пульсовой волне? // Рос. физиол. журн. им. И. М. Сеченова. 2009. Т. 95, № 5. С. 516–531.
16. *Фролов А. В., Сидоренко Г. И., Воробьев А. П., Мельникова О. П., Гуль Л. М.* Прямая и отраженная пульсовые волны: методы исследования // Кардиология в Беларуси. 2009. № 5 (6). С. 99–108.
17. *Федотов А. А.* Помехоустойчивость методик контурного анализа пульсовой волны // Измерительная техника. 2019. Т. 62, № 3. С. 64–67. DOI: 10.32446/0368-1025it.2019-3-64-67
18. *Walther G., Nottin S., Karpoff L., Pérez-Martin A., Dauzat M., Obert P.* Flow-mediated dilation and exercise-induced hyperaemia in highly trained athletes : comparison of the upper and lower limb vasculature // Acta Physiologica. 2008. Vol. 193, iss. 2. P. 139–150. DOI: 10.1111/j.1748-1716.2008.01834.x
19. *Green D. J., Spence A., Rowley N., Thijssen D. H., Naylor L. H.* Vascular adaptation in athletes: is there an 'athlete's artery'? // Experimental Physiology. 2012. Vol. 97,

iss. 3. P. 295–304. DOI: 10.1113/expphysiol.2011.058826

20. *Padilla J., Simmons G. H., Bender S. B., Arce-Esquivel A. A., Whyte J. J., Laughlin M. H.* Vascular effects of exercise : endothelial adaptations beyond active muscle beds // Physiology (Bethesda). 2011. Vol. 26, № 3. P. 132–145. DOI: 10.1152/physiol.00052.2010
21. *Weinbaum S., Zhang X., Han Y., Vink H., Cowin S. C.* Mechanotransduction and flow across the endothelial glycocalyx // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2003. Vol. 100, № 13. P. 7988–7995. DOI: 10.1073/pnas.1332808100
22. *Мелькумянц А. М.* О роли эндотелиального гликокаликса в механогенной регуляции сопротивления артериальных сосудов // Успехи физиологических наук. 2012. Т. 43, № 4. С. 45–58.
23. *Гончар И. В., Балашов С. А., Валиев И. А., Антонова О. А., Мелькумянц А. М.* Роль эндотелиального гликокаликса в механогенной регуляции тонуса артериальных сосудов // Тр. Моск. физ.-техн. ин-та. 2017. Т. 9, № 1 (33). С. 101–108.
24. *Мелькумянц А. М., Балахонова Т. В., Погорелова О. А., Трипотень М. И.* Влияние кратковременных физических упражнений на гемодинамический аспект функции эндотелия плечевой артерии человека // Кардиологический вестн. 2019. Т. 14, № 3. С. 44–48. DOI: 10.36396/MS.2019.14.03.007

Образец для цитирования:

Скрипаль Ан. В., Бахметьев А. С., Брилёнок Н. Б., Добдин С. Ю., Сагайдачный А. А., Баатыров Р. Т., Усанов А. Д., Тихонова А. С. Индекс отражения пульсовой волны у юных спортсменов // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2020. Т. 20, вып. 2. С. 125–133. DOI: https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-2-125-133

Reflection Index of the Pulse Wave for Young Athletes

An. V. Skripal, A. S. Bakhmetyev, N. B. Brilenok, S. Yu. Dobdin, A. A. Sagaidachnyi, R. T. Baatyrov, A. D. Usanov, A. S. Tikhonova

Anatoly V. Skripal, https://orcid.org/0000-0002-9080-0057, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, skripalav@info.sgu.ru

Artem S. Bakhmetyev, https://orcid.org/0000-0003-3814-5515, Saratov State Medical University named after V. I. Razumovsky, bakhmetev.artem@yandex.ru

Nailya B. Brilenok, https://orcid.org/0000-0001-6510-823X, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, brilenoknb@yandex.ru

Sergey Yu. Dobdin, https://orcid.org/0000-0002-0801-4664, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, dobdinsy@info.sgu.ru

Andrey A. Sagaidachnyi, https://orcid.org/0000-0002-5296-1968, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, andsag@yandex.ru

Rahim T. Baatyrov, https://orcid.org/0000-0001-6747-7119, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, rahim_baatyrov@mail.ru

Andrey D. Usanov, https://orcid.org/0000-0002-4004-875X, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, aka_norton@mail.ru

Antonina S. Tikhonova, https://orcid.org/0000-0002-2628-4780, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, pruss1525@gmail.com

Background and Objectives: The cardiovascular system of young athletes is subject to functional changes associated with an increase in both vasodilator capacity of blood vessels and an increase in vasoconstriction. Diagnostics of functional changes in the vascular system of athletes can be carried out by the sphygmographic method when measuring the reflection index, which characterizes the change in the tone of the smooth muscle wall of the vessel during an occlusive test. **Materials and Methods:** Two groups of 16-year-old patients were selected for the examination: a group of 10 athletes engaged in kayaking and Canoeing, and a control group including 10 non-athletic control subjects without identified cardiovascular pathologies. Registration of reflection indices was performed by sphygmography in the brachial artery area before and after the occlusion test. **Results:** Compared with a group of non-athletic subjects, the reflection indices measured in athletes with high sportive results after removal of the shoulder cuff occlusion have higher values than before the occlusion. The change in the reflection index is characterized by non-monotonic dynamics, consisting of an initial increase, and then a decrease to a value close to the original one. **Conclusion:** The more pronounced dynamics of vascular tone and reflection index after removal of occlusion can be explained both by an increase in the thickness of the glycocalyx layer, due to regular physical training, and by an increased blood flow rate in athletes before and after occlusion compared to the group of untrained subjects.

Keywords: pulse wave, reflection index, occlusal test, smooth muscle layer, glycocalyx, sports medicine.

Received: 28.02.2020 / Accepted: 20.03.2020 / Published: 01.06.2020

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

Acknowledgements: *This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 19-32-90072).*

References

1. Ivanov S. V., Ryabikov A. N., Malyutina S. K. Arterial stiffness and pulse wave reflection in association with arterial hypertension. *The Siberian Scientific Medical Journal*, 2008, no. 3, pp. 9–12 (in Russian).

2. Kalakutskiy L. I., Fedotov A. A. Diagnostics of endothelial dysfunction by the method of contour analysis of pulse wave. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2009, vol. 98, no. 9, pp. 93–98 (in Russian).
3. Storozhakov G. I., Vereshchagina G. S., Chervyakova Yu. B., Fedotova N. M. Evaluation of the elastic properties of the arterial wall in young patients with arterial hypertension. *Arterial'naya Gipertenziya* [Arterial Hypertension], 2005, vol. 11, no. 1, pp. 17–20 (in Russian). DOI: 10.18705/1607-419X-2005-11-1-17-20
4. Revenko S. V. Rheography: Harmonic perspectives. *Neuromuscular Diseases*, 2012, no. 4, pp. 8–18 (in Russian). DOI: 10.17650/2222-8721-2012-0-4-8-18
5. Pogodina M. V., Milyagina I. V. Volume sphygmography is one of the most important methods for the determination of arterial stiffness at the patients of therapeutic profile. *Vestnik of the Smolensk State Medical Academy*, 2017, vol. 16, iss. 2, pp. 101–106 (in Russian).
6. Kuzmenko E. A., Krivenko L. E., Shishkin V. P. Role color duplex scanning in detecting subclinical atherosclerosis brachiocephalic artery of patients arterial hypertension. *Health. Medical Ecology. Science*, 2012, vol. 47–48, no. 1–2, pp. 198–201 (in Russian).
7. Vikhert T. A., Arzamasov K. M. Modern trends in ultrasonic methods and peripheric arteries circulation. *Vestnik St. Petersburg. University. Ser. 11*, 2013. iss. 1, pp. 161–166 (in Russian).
8. Krivosheeva N. V. The use of ultrasound testing in clinical practice during examination of the lower limb arterial bed among elder age group patients with diabetes type 2. *Klinicheskaya gerontologiya* [Clinical Gerontology], 2017, vol. 23, no. 3–4, pp. 32–39 (in Russian).
9. Kremneva E. I., Konovalov R. N., Krotenkova M. V. Functional Magnetic Resonance Imaging. *Annaly klinicheskoy i experimental'noy nevrologii* [Annals of Clinical and Experimental Neurology], 2011, vol. 5, no. 1, pp. 30–34 (in Russian).
10. Klyushkin I. V., Fatykhov R. I. Modern diagnostic methods in diabetic foot syndrome. *The Kazan Medical Journal*, 2012, vol. 93, no. 2, pp. 298–301 (in Russian).
11. Usanov D. A., Skripal An. V., Protopopov A. A., Sagaidachnyi A. A., Rytik A. P., Miroshnichenko E. V. Estimation of blood vessels functional state by means of analysis of temperature reaction on occlusive test. *Saratov Journal of Medical Scientific Research*, 2009. vol. 5, no. 4, pp. 554–558 (in Russian).
12. Cioni G., Berni A., Gensini G. F., Abbate R., Boddi M. Impaired Femoral Vascular Compliance and Endothelial Dysfunction in 30 Healthy Male Soccer Players: Competitive Sports and Local Detrimental Effects. *Sports Health*, 2015, vol. 7, iss. 4, pp. 335–340. DOI: 10.1177/1941738115577931
13. Green D. J., Spence A., Rowley N., Thijssen D. H., Naylor L. H. Why isn't flow-mediated dilation enhanced in athletes? *Med. Sci. Sport. Exerc.*, 2013, vol. 45, iss. 1, pp. 75–82. DOI: 10.1249/MSS.0b013e318269affe
14. Kudrya O. N., Kiriyanova M. A., Kapilevich L. V. Characteristics of peripheral hemodynamics athletes with loads of adaptation to a different direction. *Byulleten' sibirskoj mediciny* [Bulletin of Siberian Medicine], 2012, vol. 11, no. 3, pp. 48–52 (in Russian).
15. Boytsov S. A. What is new in information on hardness of the artery walls and on repulsed pulse? *Russian Journal of Physiology*, 2009, vol. 95, no. 5. pp. 516–531 (in Russian).
16. Frolov A. V., Sidorenko G. I., Vorob'ev A. P., Mel'nikova O. P., Gul' L. M. Direct and reflected pulse waves: research methods. *Kardiologija v Belarusi* [Cardiology in Belarus], 2009, no. 5 (6), pp. 99–108 (in Russian).
17. Fedotov A. A. Noise Immunity of Pulse Wave Contour Analysis. *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, no. 3, pp. 64–67 (in Russian). DOI: 10.32446/0368-1025it.2019-3-64-67
18. Walther G., Nottin S., Karpoff L., Pérez-Martin A., Dauzat M., Obert P. Flow-mediated dilation and exercise-induced hyperaemia in highly trained athletes: comparison of the upper and lower limb vasculature. *Acta Physiologica,* 2008, vol. 193, iss. 2, pp. 139–150. DOI: 10.1111/j.1748-1716.2008.01834.x
19. Green D. J., Spence A., Rowley N., Thijssen D. H., Naylor L. H. Vascular adaptation in athletes: is there an 'athlete's artery'? *Experimental Physiology*, 2012, vol. 97, iss. 3, pp. 295–304. DOI: 10.1113/expphysiol.2011.058826
20. Padilla J., Simmons G. H., Bender S. B., Arce-Esquivel A. A., Whyte J. J., Laughlin M. H. Vascular effects of exercise: endothelial adaptations beyond active muscle beds. *Physiology (Bethesda)*, 2011, vol. 26, no. 3, pp. 132–145. DOI: 10.1152/physiol.00052.2010
21. Weinbaum S., Zhang X., Han Y., Vink H., Cowin S. C. Mechanotransduction and flow across the endothelial glycocalyx. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2003, vol. 100, no. 13, pp. 7988–7995. DOI: 10.1073/pnas.1332808100
22. Melkumyants A. M. About the role of endothelial glycocalix in mechanogenic regulation of resistance of arterial vessels. *Uspekhi fiziologicheskikh nauk* [Advances in Physiological Sciences], 2012, vol. 43, no. 4, pp. 45–58 (in Russian).
23. Gonchar I. V., Balashov S. A., Valiev I. A., Antonova O. A., Melkumyants A. M. Role of endothelial glycocalyx in the mechanogenic regulation of arterial tone. *Trudy MFTI* [Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology], 2017, vol. 9, no. 1 (33), pp. 101–108 (in Russian).
24. Melkumyants A. M., Balakhonova T. V., Pogorelova O. A., Tripoten M. I. Effect of short-term physical training on hemodynamic aspects of endothelial function in human brachial artery. *Kardiologicheskii vestnik* [Cardiological Bulletin], 2019, vol. 14, no. 3, pp. 44–48 (in Russian). DOI: 10.36396/MS.2019.14.03.007

Cite this article as:

Skripal An. V., Bakhmetyev A. S., Brilenok N. B., Dobdin S. Yu., Sagaidachnyi A. A., Baatyrov R. T., Usanov A. D., Tikhonova A. S. Reflection Index of the Pulse Wave for Young Athletes. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2020, vol. 20, iss. 2, pp. 125–133 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-2-125-133

НАУЧНЫЙ ОТДЕЛ

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 537.533.8

Наноуглеродные композиты для безнакальных магнетронов СВЧ и субтерагерцового диапазонов

Р. К. Яфаров, Н. О. Шабунин, В. Я. Шаныгин, А. М. Захаревич

Яфаров Равиль Кяшшафович, доктор технических наук, заведующий лабораторией субмикронной электронно-ионной технологии, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, pirpc@yandex.ru

Шабунин Никита Олегович, студент, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, n-shabunin@bk.ru

Шаныгин Виталий Яковлевич, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории субмикронной электронно-ионной технологии, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, vitairerun@mail.ru

Захаревич Андрей Михайлович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией диагностики наноматериалов и структур, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, lab-15@mail.ru

Разработана численная методика определения вторично-эмиссионных свойств пленочных алмазографитовых нанокомпозитов по яркости изображений в зависимости от величины положительного потенциала на сетке детектора сканирующего электронного микроскопа. С использованием разработанной методики проведена оценка вторично-эмиссионных свойств наноуглеродных пленочных структур, полученных в различных режимах микроволнового плазмохимического осаждения. Показана перспективность применения в безнакальных источниках электромагнитных излучений различной выходной мощности СВЧ и субтерагерцового диапазонов частот, взамен металлических, наноуглеродных автокатодов, которые устраняют необходимость в использовании для этих целей традиционных вторично-эмиссионных катодов на основе сложных композиционных материалов с расходуемыми активными примесями.

Ключевые слова: вторичная электронная эмиссия, численная методика, яркость изображений, наноуглеродный композит, микроволновая плазма.

Поступила в редакцию: 6.02.2020 / Принята: 26.03.2020 / Опубликована: 01.06.2020

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

DOI: https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-2-134-143

Введение

В связи с повышением требований к техническим характеристикам аппаратуры в основном специального назначения весьма актуальными становятся работы, направленные на создание электровакуумных приборов (ЭВП) с безнакальным режимом работы, в которых взамен термокатодов используются «холодные» катоды, работающие на принципе автоэлектронной эмиссии. Это позволяет обеспечить практически мгновенную готовность к работе тех радиотехнических систем, в которых они применяются [1–3].

© Яфаров Р. К., Шабунин Н. О., Шаныгин В. Я., Захаревич А. М., 2020

Типичная конструкция катодного узла магнетрона, предназначенного для генерирования электромагнитных колебаний сверхвысоких частот, главным образом сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн, содержит анод и коаксиально размещённый внутри него безнакальный катод. Последний включает в себя керн с расположенными на нем комбинациями чередующихся автоэлектронных эмиттеров (АЭК) в виде шайб и вторично-эмиссионных катодов (ВЭК) в виде втулок. ВЭК является активатором АЭК и обеспечивает необходимый уровень электрического заряда в пространстве взаимодействия магнетронов и, тем самым, позволяет получать высокую выходную мощность. В современных магнетронах в качестве материала АЭК, как правило, служит танталовая или вольфрамовая фольга толщиной ~ 4 мкм, а в качестве ВЭК используются прессованные палладий – бариевые втулки – эмиттеры [4]. Процесс активирования и эксплуатации эмиттеров происходит в условиях высоких температур (400–800°C, в зависимости от параметров магнетрона) и напряженностей внешнего электрического поля, вызывающих интенсивные электронную и ионную бомбардировки. Это приводит к постепенной их деградации, главным образом за счет катодного распыления и практически не контролируемого и не управляемого процесса термического переосаждения легирующей примеси между элементами катодного узла. Эти изменения влияют на стабильность работы магнетрона, приводят к изменению частоты генерируемых колебаний, падению электронного КПД, уменьшению долговечности, а также в ряде случаев к отказам по запуску магнетронов в радиотехнических системах. Проблема обеспечения надежности работы магнетронов в течение достаточного срока службы дополняется в настоящее время желанием создателей современных радиотехнических систем переходить к все более высоким рабочим частотам – вплоть до терагерцового диапазона. Задача выполнения необходимых требований осложняется тем, что конструкционные элементы в терагерцовых магнетронах оказываются весьма мелкоструктурными, что требует использования специальных высоких технологий. В настоящее время конструкции магнетронов и технология производства продолжают совершенствоваться [1–9].

Анализ литературных данных показывает, что в настоящее время наиболее перспективными для применения в качестве автоэмиссионных источников электронов являются не металлические, а наноуглеродные материалы [10–13]. Это обусловлено устойчивостью углеродных структур к высоким температурам и бомбардировке ионами остаточных газов, которые присутствуют в приборах, работающих в условиях технического вакуума, а также высокой теплопроводностью и возможностью снижения работы выхода электронов при определённых структурных модификациях, характерных для алмазного типа гибридизации связей валентных электронов атомов углерода. Уменьшение рабочих напряжений автоэмиссии позволяет увеличить запас электрической прочности синтезированных структур и получить за счет этого источники холодных электронов с повышенными плотностью тока и деградационной стойкостью.

Таким образом, применение взамен металлических наноуглеродных автокатодов может позволить устранить необходимость в активировании АЭК и, как следствие, необходимость использования для этих целей традиционных ВЭК на основе сложных композиционных материалов с расходуемыми активными примесями, а также применения высоких температур для реализации процесса активации.

В связи с возможными перспективами кардинального изменения состава, конструкции, надежности и долговечности катодного узла магнетронов за счет использовании наноуглеродных структур становится актуальным исследование их вторично-эмиссионных свойств.

Цель работы – разработка методик и исследование вторично-эмиссионных свойств пленочных алмазографитовых нанокомпозитов, полученных в различных режимах микроволнового плазмохимического осаждения для источников электромагнитных излучений различной выходной мощности СВЧ и субтерагерцового диапазонов частот.

Материалы и методы

Получение пленочных наноалмазографитовых композитов проводилось в вакуумной установке с использованием СВЧ ионно-плазменного источника по методикам, изложенным в работах [11, 13, 14]. Осаждение осуществлялось на поликоровые подложки с использованием в качестве рабочего вещества паров этанола при давлении 0.05–0.07 Па. Напряжения смещения на подложкодержателе в процессах плазмохимического осаждения составляли +300 В и −300 В. Подложки в экспериментах нагревались до температуры 300 ± 10°C. Исследование вторичной электронной

эмиссии (ВЭЭ) в наноуглеродных пленочных структурах производилось с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) MIRA 2 LMU (Tescan, Чехия). Измерения яркости полученных изображений проводились при различных энергиях первичного пучка (10, 5, 1 и 0.65 кэВ) и различных напряжениях (300, 150, 75, 0 В) на сетке детектора вторичных электронов СЭМ.

Для количественной характеристики ВЭЭ наноуглеродных покрытий определяли численные значения яркости полученных в СЭМ изображений. Для этого использовались программы Mathcad 15, Adobe Photoshop и ColorMania. Первым этапом обработки изображений являлось «размытие» их яркости, которое осуществлялось в графическом редакторе Adobe Photoshop CC. «Размытие» производилось с целью усреднения по площади яркости изображения анализируемых участков поверхности пленок. Примеры размытых изображений приведены на рис. 1.

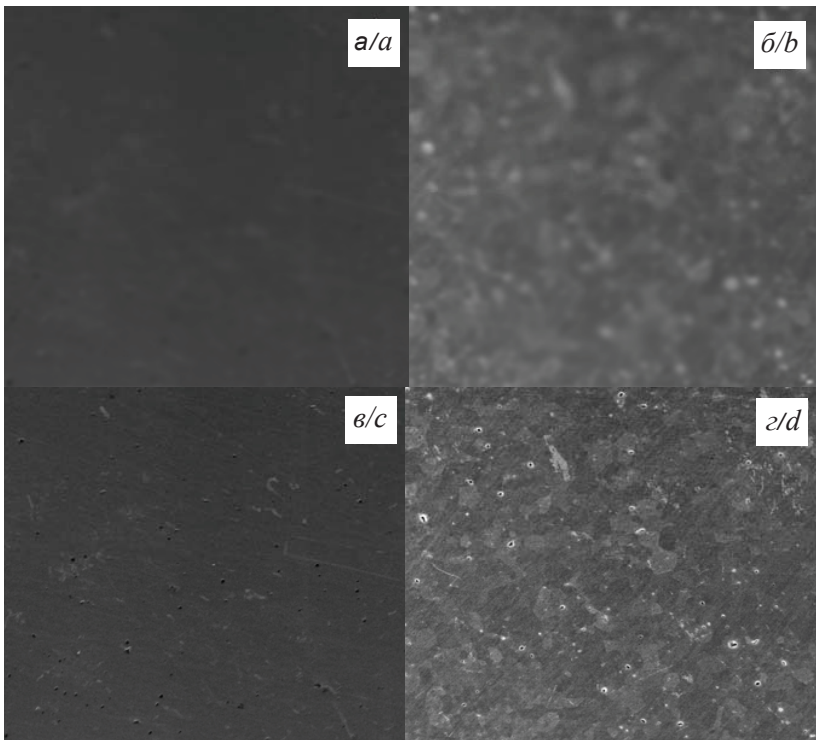


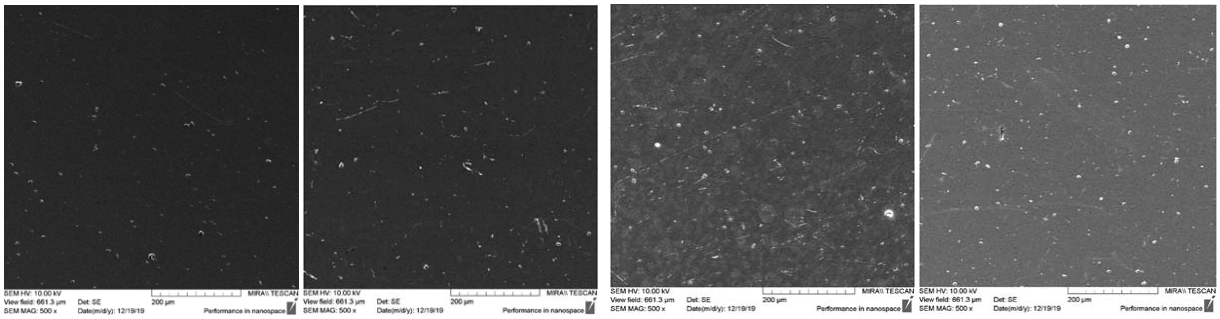
Рис. 1. Изображения участков пленочных покрытий до (*в, г*) и после (*а, б*) обработки в графическом редакторе Adobe Photoshop CC

Fig. 1. Images of film coating areas before (*c, d*) and after (*a, b*) processing in Adobe Photoshop CC graphics editor

Следующим этапом анализа снимков СЭМ являлось получение численных значений яркости. Это было осуществлено с использованием утилита ColorMania с достаточно высокой точностью, которая обусловлена пиксельным анализом исходного изображения.

Результаты и их обсуждение

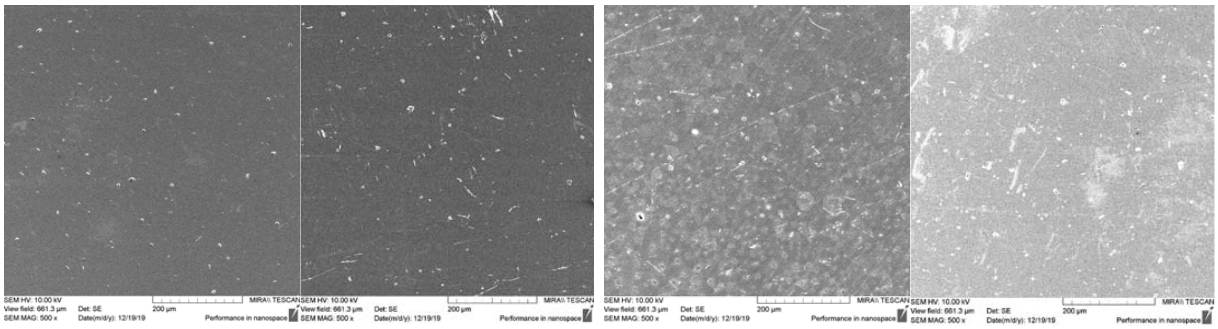
На рис. 2, 3 в качестве примеров приведены СЭМ-изображения четырех наноуглеродных пленочных покрытий, полученных в различных режимах плазмохимического осаждения. Изображения получены при энергии первичного электронного пучка 10 кэВ и напряжениях на сетке детектора вторичного электрона (ВЭ) + 300 и +75 В. СЭМ-изображения аналогичного типа получены при напряжениях на сетке +150 и 0 В. Ток первичного пучка во всех случаях составлял 352 пА при увеличении ×500. Можно видеть, что яркость изображений зависит как от режима получения наноуглеродных покрытий, так и режима получения изображения в СЭМ. В частности, просматривается зависимость яркости изображений от напряжения на сетке детектора ВЭ СЭМ. Аналогичного типа изменения яркостей изображений в зависимости от режима получения образцов и напряжений на сетке детектора СЭМ получены для энергий первичного пучка 5, 1 и 0.65 кэВ.



а/a *б/b* *в/c* *г/d*

Рис. 2. СЭМ-изображения наноуглеродных покрытий, полученных в различных режимах осаждения: *а, б* – -300 В (*а* – 55 кОм/кв, *б* – 37 кОм/кв); *в*, *г* – +300 В (*в* – 100 кОм/кв, *г* – 850 кОм/кв). Измерения проводились при контрасте 48%, яркости 83% и потенциале на сетке +300 В

Fig. 2. SEM images of nanocarbon coatings obtained in different deposition modes: *a*, *b* – -300 V (*a* – 55 kOm/sq, *b* – 37 kOm/sq); *c*, *d* – 300 V (*c* – 100 kOm/sq, *d* – 850 kOm/sq). Measurements were made at 48% contrast, 83% brightness and 300 V grid potential



а/a *б/b* *в/c* *г/d*

Рис. 3. СЭМ-изображения наноуглеродных покрытий, полученных в различных режимах осаждения: *а*, *б* – -300 В (*а* – 55 кОм/кв, *б* – 37 кОм/кв); *в*, *г* – +300 В (*в* – 100 кОм/кв, *г* – 850 кОм/кв). Измерения проводились при контрасте 56%, яркости 65% и потенциале на сетке + 75 В

Fig. 3. SEM images of nanocarbon coatings obtained in different deposition modes: *a*, *b* – -300 V (*a* – 55 kOm/sq, *b* – 37 kOm/sq); *c*, *d* – 300 V (*c* – 100 kOm/sq, *d* – 850 kOm/sq). Measurements were made at 56% contrast, 65% brightness and 75 V grid potential

На рис. 4–7 приведены зависимости яркостей изображений от потенциалов на сетке детектора СЭМ при различных энергиях первичных электронов для наноуглеродных покрытий, полученных в различных режимах плазмохимического осаждения.

Как известно, структуру энергетического спектра электронов, испускаемых с поверхности, облучаемой пучком электронов с энергией E_o, составляют упруго рассеянные электроны с энергией E_o, ВЭ с энергией от 0 до 50 эВ, а также неупруго обратнорассеяные электроны (ОРЭ) с энергией от 50 эВ до E_o [15]. Большое влияние на ВЭЭ имеет энергия электронов первичного пучка. С увеличением энергии коэффициент вторичной эмиссии сначала возрастает в связи с ростом количества возбужденных электронов, а затем начинает убывать, поскольку существенная часть электронов рождается на большей глубине и число вторичных электронов, выходящих наружу, уменьшается.

На рис. 8 представлена схема детектора ВЭ. Коллектор *1* имеет положительный потенциал, величину которого можно изменять в диапазоне от 0 до +300 В, благодаря чему траектории вторичных электронов искривляются и они попадают в коллектор. На первичные и отраженные электроны, имеющие высокие значения энергии (E_o), этот потенциал существенного влияния не оказывает.

Внутри коллектора электроны ускоряются. Для этого на сцинтиллятор *3* подается высо-

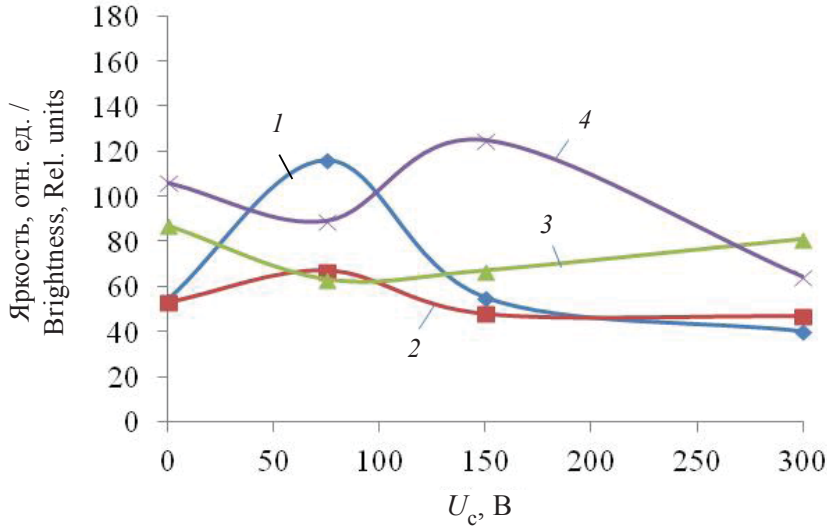


Рис. 4. Графическая интерпретация яркости изображения от напряжения СЭМ на сетке для образца с осажденным углеродным покрытием при -300 В на подложке и 55 кОм/кв при различных энергиях первичного электронного пучка, кэВ: *1* – 10, *2* – 5, *3* – 1, *4* – 0.65

Fig. 4. Graphical interpretation of image brightness versus the SEM voltage on the sample grid with deposited carbon coating at -300 V on the substrate and 55 kOm/sq. at different energies of the primary electron beam, keV: *1* – 10, *2* – 5, *3* – 1, *4* – 0.65

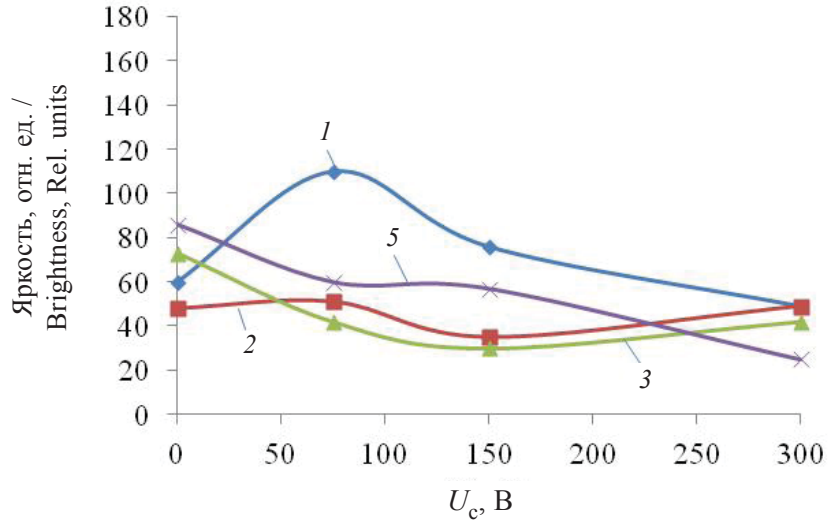


Рис. 5. Графическая интерпретация яркости изображения от напряжения СЭМ на сетке для образца с осажденным углеродным покрытием при -300 В на подложке и 37 кОм/кв. при различных энергиях первичного электронного пучка, кэВ: *1* – 10, *2* – 5, *3* – 1, *4* – 0.65

Fig. 5. Graphical interpretation of image brightness versus the SEM voltage on the sample grid with deposited carbon coating at -300 V on the substrate and 37 kOm/sq. at different energies of the primary electron beam, keV: *1* – 10, *2* – 5, *3* – 1, *4* – 0.65

кое напряжение порядка 12 кВ. Его влияние на электронный зонд экранируется корпусом коллектора. Вследствие ускорения вторичные электроны получают достаточную энергию, чтобы вызвать световое излучение материала сцинтиллятора, которое по световоду *2* попадает на фотоумножитель *4*, где преобразуется в электрический сигнал. Мощность этого сигнала

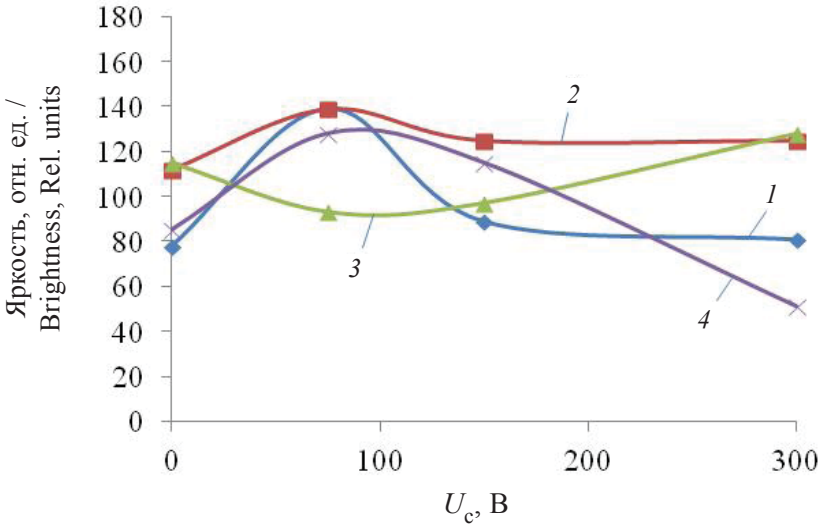


Рис. 6. Графическая интерпретация яркости изображения от напряжения СЭМ на сетке для образца с осажденным углеродным покрытием при +300 В на подложке и 100 кОм/кв. при различных энергиях первичного электронного пучка, кэВ: *1* – 10, *2* – 5, *3* – 1, *4* – 0,65

Fig. 6. Graphical interpretation of image brightness on the SEM voltage on the carbon plated sample grid at 300 V on substrate and 100 kOm/sq. at different energies of the primary electron beam, keV: *1* – 10, *2* – 5, *3* – 1, *4* – 0.65

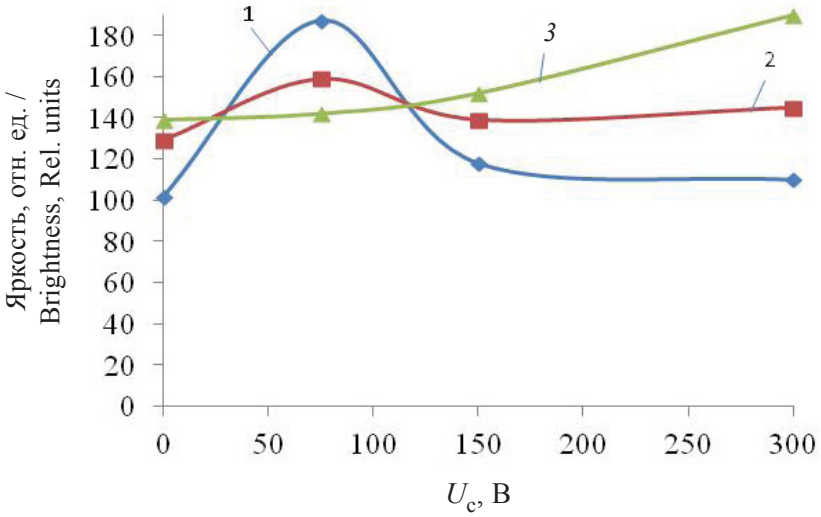


Рис. 7. Графическая интерпретация яркости изображения от напряжения СЭМ на сетке для образца с осажденным углеродным покрытием при +300 В на подложке и 650 кОм/кв. при различных энергиях первичного электронного пучка, кэВ: *1* – 10, *2* – 5, *3* – 1

Fig. 7. Graphical interpretation of image brightness on the SEM voltage on the carbon plated sample grid at 300 V on substrate and 650 kOm/sq. at different energies of the primary electron beam, keV: *1* – 10, *2* – 5, *3* – 1

и, следовательно, яркость соответствующей точки на экране при использовании вторичных электронов определяется топографическим контрастом.

При положительных потенциалах на сетке детектора яркость изображения на видеоусилителе формируется за счет попадания в него всех электронов, имеющих энергию, близкую к той,

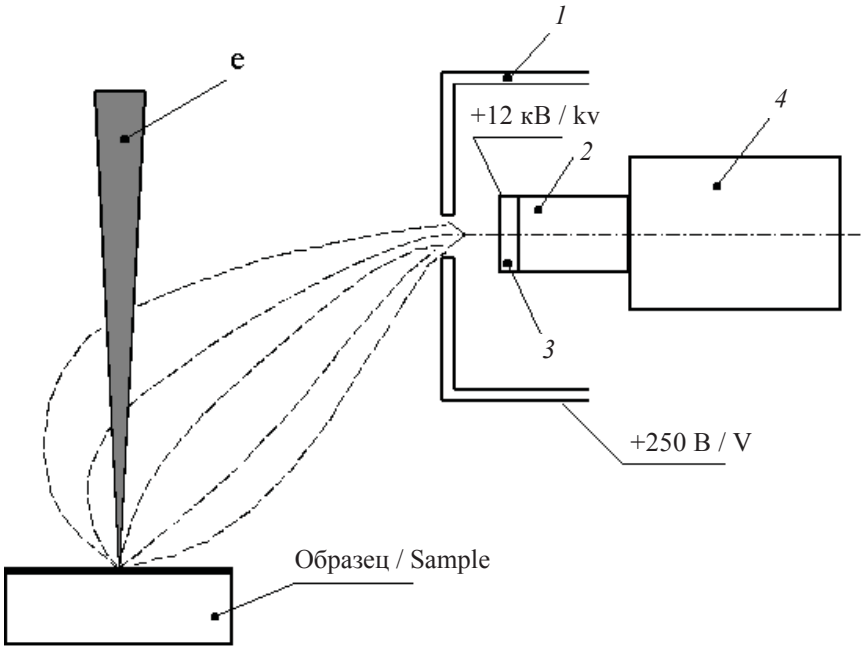


Рис. 8. Схема детектора эмитированных электронов Эверхарта – Торнли: *1* – коллектор, *2* – световод, *3* – сцинтиллятор, *4* – фотоумножитель

Fig. 8. Everhart – Thornley emitted electron detector circuit: *1* – collector, *2* – light guide, *3* – scintillator, *4* – photomultiplier

что определяет приложенный к сетке потенциал. При потенциалах на сетке +300 В это, главным образом, небольшая доля неупругоотраженных электронов. При уменьшении напряжения на сетке от +300 до +75 В яркости изображений в зависимости от свойств образцов и энергии первичных электронов постепенно увеличиваются (см. рис. 4–7). Для энергий электронов 5 и 10 кэВ наблюдаются при U_c = 75 В максимумы яркости изображений. Это обусловлено увеличением количества «истинных» ВЭ, попавших в детектор.

Влияние энергии электронов первичного пучка на яркость изображений хорошо видно при U_c = 300 В: с ее увеличением от 1 до 10 кэВ яркости изображений, как правило, уменьшаются. Это обусловлено тем, что с увеличением E_o увеличивается энергия отраженных электронов и уменьшается их доля попадающих в детектор, а также, как уже говорилось, большей глубиной проникновения первичных электронов в образец, при которой вероятность выхода вторичных электронов из образца уменьшается. Кроме того, различный характер зависимостей яркостей изображения от потенциала сетки для различных энергий первичного пучка электронов может быть обусловлен зависимостью коэффициента отражения от их энергии. При низких E_o коэффициент отражения увеличивается. Вследствие этого уменьшается доля неупругоотраженных электронов, которые могут попасть в детектор и яркость изображений с уменьшением потенциалов на сетке уменьшается. Меньшая яркость изображений при энергии электронов 0.65 кэВ, по сравнению с энергией 1 кэВ, может быть обусловлена уменьшением концентрации неупругоотраженных и вторичных электронов в связи с низкой кинетической энергией электронов первичного пучка. Вследствие этого для электронов с энергиями 1 и 0.65 кэВ наблюдается с уменьшением сеточных напряжений монотонное уменьшение концентрации электронов, преодолевших потенциал сетки и яркость полученных изображений. Подъем кривых яркости при U_c = 0 В обусловлен вкладом в ее формирование неупругоотраженных и вторичных электронов с очень низкой энергией.

В отсутствие напряжений на сетке (U_c = 0 В) вторичные электроны не изменяют траекторию своего движения от образца и не попадают в детектор. В этом случае яркости изображений уменьшаются до минимальных значений, которые имеют примерно такие же значения, как при U_c = +300 В.

Заключение

Вторично-эмиссионные свойства исследованных наноуглеродных пленочных покрытий в первом приближении можно оценить как отношение яркостей изображений в их максимуме в зависимости от напряжения на сетке к яркости изображений при $U_c = 0$ В. Для образца 1 с поверхностным сопротивлением 55 кОм/кв при энергиях первичных электронных пучков 10 кэВ и 5 кэВ это, соответственно, более чем 2.15 и 1.27. Большее отношение яркостей для энергии первичных электронов 10 кэВ означает, что, несмотря на большую глубину проникновения электронов в образец, которое должно приводить к снижению выхода вторичных электронов, увеличение их концентрации в результате взаимодействия первичного пучка и неупругорассеянных электронов с электронно-атомной структурой наноуглеродного материала приводит к увеличению ВЭЭ. Для образца 2, полученного при том же ускоряющем напряжении на подложкодержателе в процессе плазмохимического осаждения, но имеющем более низкое поверхностное сопротивление (37 кОм/кв), отношения соответствующих яркостей изображений составляют 1.83 и 1.06 соответственно. Снижение выхода ВЭ однозначно обусловлено меньшей дефектностью пленочной структуры образца 2 и, вследствие этого, большей глубиной проникновения электронов первичного пучка, что снизило вероятность выхода на поверхность ВЭ.

Яркости изображений образцов, полученных в микроволновоой плазме при потенциале +300 В (образцы 3 и 4), при одинаковых энергиях первичных пучков электронов и напряжениях на сетках существенно выше, чем для образцов, полученных при отрицательных напряжениях. В соответствии с результатами работы [13] это может быть связано с большим содержанием в наноуглеродной матрице алмазных нанокристаллитов и меньшей работой выхода электронов. Вследствие этого увеличивается количество упругих соударений первичных электронов и процессов их рассеяния, что приводит к отклонению траекторий и способствует генерации ВЭ на меньшей глубине.

Для образца 3, имеющего поверхностное сопротивление около 100 кОм/кв, отношение яркостей для энергии первичного пучка 10 кэВ составляет 1.8, а для 5 кэВ – 1.2. Практически такие же значения получены для образца 4, у которого сопротивление почти на порядок выше. Однако во втором случае значения яркостей существенно выше, что подтверждает усиление вклада неупругоотраженных электронов от дефектов структуры в генерацию ВЭ на меньшей глубине от поверхности пленочного покрытия.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-10033).

Список литературы

1. *Schünemann K., Sosnytskiy S. V., Vavriv D. M.* Self-consistent simulation of the spatial-harmonic magnetron with cold secondary emission cathode // IEEE Ttrans. Electron Devices. 2001. Vol. 48, № 5. P. 993–998. DOI: 10.1109/16.918248
2. *Sosnytskiy S. V., Vavriv D. M.* Theory of the spatial-harmonic magnetron: an equivalent network approach // IEEE Trans. Plasma Sci. 2002. Vol. 30, № 3. P. 984–991. DOI: 10.1109/TPS.2002.801616
3. *Яфаров Р. К., Новиков П. Е., Еремин В. П., Кочнев Д. О.* Исследование возможности создания автоэмиссионного катода для безнакального магнетрона на основе алмазографитового нанокомпозита // Вопросы электротехнологии. 2018. № 2. С. 62–71.
4. Магнетрон с безнакальным катодом : пат. на изобретение 2380784 Рос. Федерация, МПК H01J 25/00 (2006.01) / Ли И. П., Дюбуа Б. Ч., Каширина Н. В., Комиссарчик С. В., Лифанов Н. Д., Зыбин М. Н. ; заявл. 24.10.08 ; опубл. 27.01.10.
5. *Гурко А. А.* Магнетроны миллиметрового диапазона длин волн. М. : [б. и.], 2015. 223 с.
6. *Zybin M. N.* Cold Cathode Magnetrons : Yesterday, Today and Tomorrow // Microwave Journal. URL: http://www.microwavejournal.com (дата обращения: 14.06.2012).
7. *Yeryomka V. D., Kopot M. A., Kulagin O. P., Naumenko V. D.* 3-D simulation of millimeter-wave cold secondary-emission cathode drift-orbital resonance magnetrons. // Proc. IVEC. 2006. P. 349–350. DOI: 10.1109/IVELEC.2006.1666327
8. *Avtomonov N. I., Naumenko V. D., Vavriv D. M., Schünemann K., Suvorov A. N., Markov V. A.* Toward terahertz magnetrons : 210-GHz spatial-harmonic magnetron with cold cathode // IEEE Trans. Electron Devices. 2012. Vol. 59, № 12. P. 3608–3611. DOI: 10.1109/TED.2012.2217974
9. *Shengen Li, Tiechang Yan, Fengling Li, Jinsheng Yang, Wei Shi.* Experimental study of millimeter magnetrons with cold cathodes // IEEE Trans. Plasma Sci. 2016. Vol. 44, № 8. P. 1386–1390. DOI: 10.1109/TPS.2016.2585644
10. *Гуляев Ю. В., Абаньшин Н. П., Горфинкель Б. И., Морев С. П., Резчиков А. Ф., Синицын Н. И., Якунин А. Н.* Новые решения для создания перспективных приборов на основе низковольтной полевой эмиссии углеродных наноразмерных структур // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39, вып. 11. С. 63–70. DOI: 10.1134/S1063785013060035

11. *Яфаров Р. К.* Получение наноалмазных композиционных материалов в плазме микроволнового газового разряда низкого давления // ЖТФ. 2006. Т. 76, вып. 1. С. 42–48.
12. *Фурсей Г. Н., Поляков М. А., Кантонистов А. А., Яфясов А. М., Павлов Б. С., Божевольнов В. Б.* Автоэлектронная и взрывная эмиссия из графеноподобных структур // ЖТФ. 2013. Т. 83, вып. 6. С. 71–77.
13. *Яфаров Р. К., Шаныгин В. Я., Нефедов Д. В.* Углеродный пленочный нанокомпозит для сильноточных полевых источников электронов // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2019. Т. 19, вып. 1. С. 68–75. DOI: https://doi.org/10.18500/1817-3020-2019-19-1-68-75
14. *Яфаров Р. К.* Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий. М. : Физматлит, 2009. 216 с.
15. *Оура К., Лифшиц В. Г., Саранин А. А., Зотов А. В., Катаяма М.* Введение в физику поверхности. М. : Наука, 2006. 490 с.

Образец для цитирования:

Яфаров Р. К., Шабунин Н. О., Шаныгин В. Я., Захаревич А. М. Наноуглеродные композиты для безнакальных магнетронов СВЧ и субтерагерцового диапазонов // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2020. Т. 20, вып. 2. С. 134–143. DOI: https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-2-134-143

Nanocarbon Composites for Non-Incandescent Microwave Magnetrons and Subterahertz Ranges

R. K. Yafarov, N. O. Shabunin, V. Ya. Shanygin, A. M. Zakharevich

Ravil K. Yafarov, https://orcid.org/0000-0001-6678-511X, Saratov Branch of Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, 38 Zelenaya St., Saratov 410019, Russia, pirpc@yandex.ru

Nikita O. Shabunin, https://orcid.org/0000-0002-5363-0132, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, n-shabunin@bk.ru

Vitaliy Ya. Shanygin, https://orcid.org/0000-0001-8445-6491, Saratov Branch of Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, 38, Zelenaya St., Saratov 410019, Russia, vitairerun@mail.ru

Andrey M. Zakharevich, https://orcid.org/0000-0002-3813-5870, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, lab-15@mail.ru

Background and Objectives: Development of techniques and investigation of secondary emission properties of film diamond graphite nanocomposites obtained in different modes of microwave plasma-chemical deposition were performed for sources of electromagnetic radiation of different output power of microwave and subteragetic frequency ranges. **Materials and Methods:** Production of film nano diamond graphite composites was carried out in a vacuum plant using a microwave ion-plasma source. Precipitation was carried out on polycore substrates using ethanol vapor as a working material at a pressure of 0.05–0.07 Pa. The bias voltages on the substrate holder in plasma chemical deposition processes were 300 V and -300 V. The substrates were heated to 300 ± 10°C in experiments. The study of secondary electron emission (EE) in nanocarbon film structures was performed using the Mira TESCAN scanning electron microscope (SEM). Measurements of the brightness of the obtained images were made at different primary beam energies (10, 5, 1 and 0.65 keV) and different voltages (300, 150, 75, 0 B) on the secondary electron detector grid SEM. **Results:** A numerical technique has been developed for determining the secondary emission properties of film diamond graphite nanocomposites by the brightness of their images depending on the value of the positive potential on the grid of the scanning electron microscope detector. Using the developed technique, the secondary emission properties of nanocarbon film structures obtained in different modes of microwave plasma-chemical deposition were evaluated. **Conclusion:** For sample 1: a larger ratio for primary electron energy of 10 keV means that despite the greater depth of electron penetration into the sample, which should lead to a decrease in the secondary electron output, an increase in their concentration as a result of the interaction of the primary beam and the nonelastic electrons with the electron-atomic structure of the nanocarbon material leads to an increase in EE. For sample 2: the decrease in RE yield is definitely due to the lower defect of the film structure and the greater penetration depth of the primary beam electrons, which reduced the probability of reaching the RE surface. For samples 3, 4: brightness values are significantly higher, which confirms the enhancement of the contribution of unelastic electrons from structure defects to the generation of RE at a lower depth from the surface of the film coating.

Keywords: secondary electron emission, numerical technique, image brightness, nanocarbon composite, microwave plasma.

Received: 06.02.2020 / Accepted: 26.03.2020 / Published: 01.06.2020

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

***Acknowledgements**: This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 16-19-10033).*

References

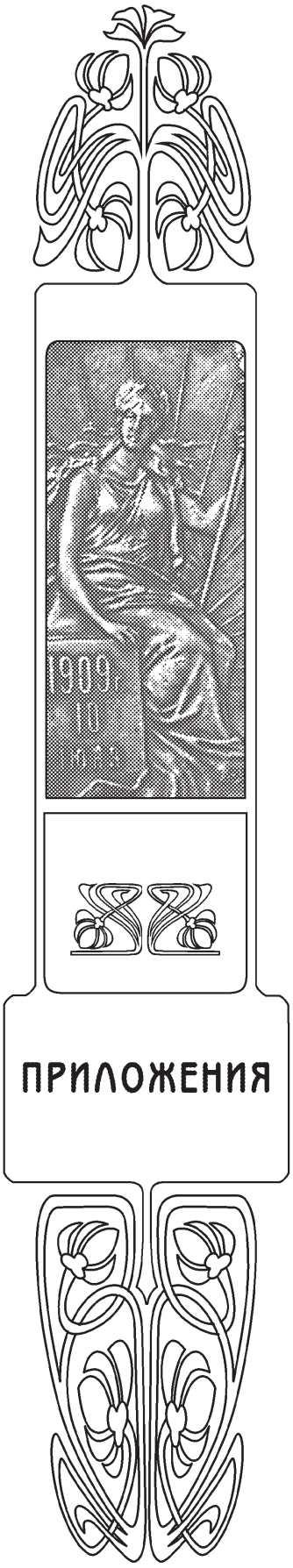
1. Schünemann K., Sosnytskiy S. V., Vavriv D. M. Self-consistent simulation of the spatial-harmonic magnetron with cold secondary emission cathode. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2001, vol. 48, no. 5, pp. 993–998. DOI: 10.1109/16.918248
2. Sosnytskiy S. V., Vavriv D. M. Theory of the spatial-harmonic magnetron: an equivalent network approach. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2002, vol. 30, no. 3, pp. 984–991. DOI: 10.1109/TPS.2002.801616
3. Yafarov R. K., Novikov P. E., Eremin V. P., Kochnev D. O. Investigation of the possibility of creating an field emission

cathode for a non-incised magnetron based on a diamond graphite nanocomposite. *Voprosyi yelektrotekhnologii* [Questions of Electrotechnology], 2018, no. 2, pp. 62–71 (in Russian).

4. Li I. P., Dubuya B. Ch., Kashirina N. V., Komissarchik S. V., Liphanov N. D., Zyibin M. N. *Magnetron with non-nominal cathode.* Patent RF no. 2380784, 2008 (in Russian).
5. Gurko A. A. *Magnetronyi millimetrovogo diyapozona dlinn voln* [Millimeter Wavelength Magnetrons]. Moscow, [b. i.], 2015. 223 p. (in Russian).
6. Zybin M. N. Cold Cathode Magnetron: Yesterday, Today and Tomorrow. *Microwave Journal*. Available at: http://www.microwavejournal.com (accessed 14 June 2012).
7. Yeryomka V. D., Kopot M. A., Kulagin O. P., Naumenko V. D. 3-D simulation of millimeter-wave cold secondary-emission cathode drift-orbital resonance magnetrons. *Proc. IVEC*, 2006, pp. 349–350. DOI: 10.1109/IVELEC.2006.1666327
8. Avtomonov N. I., Naumenko V. D., Vavriv D. M., Schünemann K., Suvorov A. N., Markov V. A. Toward terahertz magnetrons: 210-GHz spatial-harmonic magnetron with cold cathode. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2012, vol. 59, no. 12, pp. 3608–3611. DOI: 10.1109/TED.2012.2217974
9. Shengen Li, Tiechang Yan, Fengling Li, Jinsheng Yang, Wei Shi. Experimental study of millimeter magnetrons with cold cathodes. *IEEE Trans. Plasma Sci*., 2016, vol. 44, no. 8, pp. 1386–1390. DOI: 10.1109/TPS.2016.2585644
10. Gulyaev Yu. V., Aban'shin N. P., Gorfinkel' B. I., Morev S. P., Rezchikov A. F., Sinitsyn N. I., Yakunin A. N. New solutions for designing promising devices based on low-voltage field emission from carbon nanostructures. *Technical Physics Letters*, 2013, vol. 39, iss. 11, pp. 63–70 (in Russian). DOI: 10.1134/S1063785013060035
11. Yafarov R. K. Production of nanodiamond composites in low pressure microwave gas discharge plasma. *Technical Physics*, 2006. vol. 39, pp. 525–528.
12. Fursey G. N., Polyakov M. A., Cantonistov A. A., Yafyasov A. M., Pavlov B. S., Bozhevolnov V. B. Auto-electronic and explosive emission from graphene-like structures. *Technical Physics*, 2013, vol. 83, iss. 6, pp. 71–77 (in Russian).
13. Yafarov R. K., Shanygin V. Y., Nefedov D. V. Carbon film nanocomposite for high-current field sources of electrons. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2019, vol. 19, iss. 1, pp. 68–75 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.18500/1817-3020-2019-19-1-68-75
14. Yafarov R. K. *Fizika SVCh vakuumno-plazmennyh nanotekhnologij* [Physics of Microwave Vacuum Plasma Nanotechnology]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 216 p. (in Russian).
15. Oura K., Lifshitz V. G., Saranin A. A., Zotov A. V., Katayama M. *Vvedeniye v phiziku poverkhnosti.* [Introduction to Surface Physics]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 490 p. (in Russian).

Cite this article as:

Yafarov R. K., Shabunin N. O., Shanygin V. Ya., Zakharevich A. M. Nanocarbon Composites for Non-Incandescent Microwave Magnetrons and Subterahertz Ranges. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2020, vol. 20, iss. 2, pp. 134–143 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-2-134-143



ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

УДК 52(091)

Профессор астрономии Саратовского университета Иосиф Фёдорович Полак (1881–1954)

В. М. Аникин

Аникин Валерий Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, декан физического факультета, заведующий кафедрой компьютерной физики и метаматериалов на базе Саратовского филиала Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, AnikinVM@info.sgu.ru

Впервые приводятся систематизированные биографические данные профессора Московского и Саратовского университетов Иосифа Фёдоровича Полака (1881–1954), астронома и преподавателя, автора многих учебников и научно-популярных изданий по астрономии. Всего вышло около 60 изданий и переизданий его книг, общий тираж которых составил 2 млн экземпляров. В Саратовском государственном университете И. Ф. Полак работал в 1919–1930 гг. на физико-математическом и педагогическом факультетах. Его труды представляют интерес с исторической и методической точек зрения, отражая историю развития астрономии как науки и историю ее преподавания в вузах и школах СССР. Пунктирно прослеживается история развития астрономии, астрофизики и геофизики в СГУ за последние 100 лет.

Ключевые слова: Саратовский университет, астрономия, Иосиф Фёдорович Полак.

Поступила в редакцию: 15.01.2020 / Принята: 25.02.2020 / Опубликована: 01.06.2020

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

DOI: https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-2-144-159

Введение

После учреждения в Саратовском университете в 1917 г. физико-математического факультета его первый декан Владимир Дмитриевич Зёрнов пригласил на должности профессоров факультета ряд ученых и преподавателей из Москвы и Петрограда [1–4]. В их числе были и астрономы. Первыми преподавателями астрономии в Саратовском университете были [5]: в 1918 г. – академик Аристарх Аполлонович Белопольский (1854–1934), в 1919–1920 учебном году – профессор Михаил Аврамеевич Грачев (1866–1925), а с 1919 г. – профессор Иосиф Фёдорович Полак (1881–1954).

И. Ф. Полак посвятил свою жизнь теоретической астрономии, изучению комет и преподаванию астрономии и математики. В данной статье мы собрали разбросанные по различным источникам сведения о вехах его биографии, использовав также данные личного дела И. Ф. Полака, хранящегося в архиве СГУ.

В Саратовском университете И. Ф. Полак работал в 1919–1930 гг. на физико-математическом и педагогическом факультетах. Избранный профессором астрономии, он, по существу, исполнял функции заведующего кабинетом астрономии и кафедры астрономии и геодезии. Он является автором учебников, рекомендованных на высшем

© Аникин В. М., 2020

уровне для студентов университетов и других высших учебных заведений страны, а также научно-популярных изданий по астрономии. В каталоге Российской национальной библиотеки насчитывается около 60 изданий и переизданий его книг, общий тираж которых составляет около 2 млн экземпляров. Труды И. Ф. Полака интересны с исторической и методической точек зрения, отражая историю развития астрономии как науки, особенности организации высшего образования в стране, методику преподавания астрономии в вузах и школах СССР.

Астрономическую «эстафету» И. Ф. Полак передал своему сотруднику по кафедре Павлу Васильевичу Вьюшкову (1900–1969), преемником которого стал, в свою очередь, Юрий Андреевич Скляров (1931–2014), подготовивший учеников в области астрономии и астрофизики и обеспечивший Саратовскому университету (СГУ) статус «космического вуза» [5, 6]. Становление в СГУ радиоастрономии как науки и учебной дисциплины связано с именем профессора Артура Вениаминовича Хохлова [7].

И. Ф. Полак – московский астроном

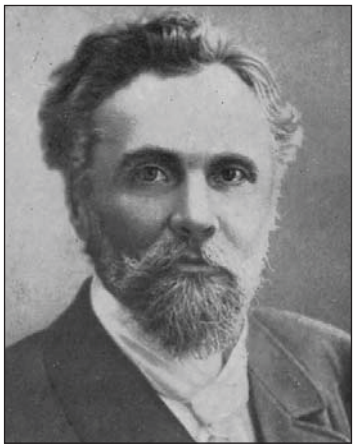
Иосиф Фёдорович Полак родился 25 октября 1881 г. в г. Ананьеве Херсонской губернии в семье гимназического учителя[1]. Окончив местную гимназию с золотой медалью, в 1899 г. поступил на математическое отделение физико-математического факультета Московского университета. Уже с третьего курса стал заниматься астрономическими вычислениями под руководством профессора Витольда Карловича Цераского (1849–1925) и приват-доцента Сергея Алексеевича Казакова (1873–1936). С 1905 г. работал в Московской университетской обсерватории: сначала помощником при астрофотографических наблюдениях и вычислителем при обработке фотометрических наблюдений В. К. Цераского и многочисленных данных наблюдений на меридианном круге звезд в зоне склонений от 0 до +16 градусов, проведенных в 1860-х гг. русским астрономом членом-корреспондентом Петербургской Академии наук М. Ф. Хандриковым, а в 1908–1909 гг. проводил самостоятельные наблюдения на меридианном круге. Названными вычислениями занимались как опытные астрономы, так и молодые, в число которых входил И. Ф. Полак [8, с. 121]. В монографии «История общественных астрономических организаций в СССР (1888–1941)» И. Ф. Полак назван среди тех, кто «своей деятельностью способствовал известности Московской университетской обсерватории» [9, с. 8].

Государственные экзамены за университетский курс И. Ф. Полак сдал осенью 1906 г. Весной 1907 г. он был оставлен в университете при кафедре астрономии. В 1908–1909 гг. заведовал общедоступной обсерваторией в доме Трындиных[2]. После сдачи магистерских экзаменов, с осени 1912 г. до начала 1919 г. вел факультативные курсы по астрономии в должности приват-доцента, а также читал лекции в Педагогическом институте и на Пречистинских рабочих курсах[3],

[1] Curriculum Vitae И. Ф. Полака от 12 января 1919 г. (Архив СГУ).

[2] Трындины – владельцы одной из крупнейших компаний дореволюционной России, производившей оптические, другие физические, геодезические приборы, учебно-наглядные пособия и медицинские инструменты.

[3] Пречистенские рабочие курсы – бесплатные вечерние общеобразовательные курсы для рабочих (для взрослых) в Москве; существовали в 1897–1919 гг.

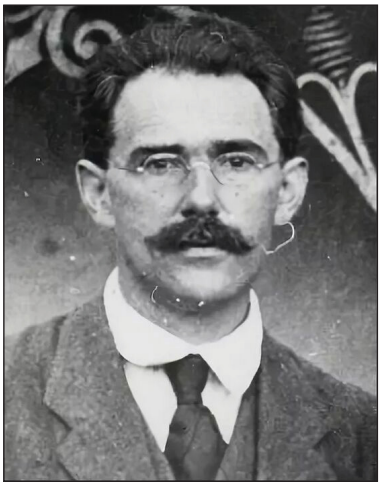


В. К. Цераский
V. K. Cerasky

С. А. Казаков
S. A. Kazakov

состоял секретарем в журнале «Природа»[4], вел занятия в школах. За две работы по кометным орбитам, опубликованные в немецком журнале «Astronomische Nachrichten» в 1910 и 1912 гг., был отмечен премией Русского астрономического общества.

В 1913 г. было образовано Московское общество любителей астрономии (МОЛА), и И. Ф. Полак стал его активным членом. Так, он был заметной фигурой при проведении популярных бесед-коллоквиумов, на которых обсуждалась новейшая (в основном зарубежная) литература по астрономии [9, с. 53]. В 1909–1914 гг. И. Ф. Полак принимал участие в написании заметок в раздел «Успехи астрономии» для астрономического ежегодника – «Русского Астрономического календаря», выпускавшегося в Нижнем Новгороде членами Нижегородского общества любителей астрономии [9, с. 30].



Приват-доцент Московского университета И. Ф. Полак[5]
Private Associate Professor of Moscow University J. F. Polak

Магистерскую диссертацию И. Ф. Полак представил на факультет в феврале 1918 г., но формальная защита не состоялась: сначала по причине задержки отзыва П. К. Штернбергом, а затем в связи с отменой в 1918 г. в стране ученых степеней. Тем не менее, Октябрьскую революцию И. Ф. Полак встретил в звании приват-доцента Московского университета. Хотя Декретом Совета Народных Комиссаров «О некоторых изменениях в составе и устройстве государственных учебных и высших учебных заведений Российской Республики» от 1 октября 1918 г. звание приват-доцента было упразднено, приват-доценты со стажем не менее трех лет были переведены в состав профессоров. И. Ф. Полак удовлетворял этому «нормативу», и в октябре 1918 г. стал именоваться профессором. Это звание неизменно присутствует на обложках написанных им впоследствии учебных и научно-популярных книг.

20 (7) февраля 1918 г. на заседании Отделения физико-математических наук Российской академии наук была рекомендована к публикации в журнале «Известия Российской академии наук» представленная академиком А. А. Белопольским статья И. Ф. Полака «Хвост кометы Галлея в мае 1910 г. Предварительное сообщение». В годы работы в Саратовском университете И. Ф. Полак подготовил к публикации статью «О движении кометы Холмса (Holmes)» [10][6].

В августе 1932 г. Московское общество любителей астрономии было реорганизовано в Московское отделение Всесоюзного астрономо-геодезического общества (МО ВАГО). И. Ф. Полак, к тому времени вернувшийся в Москву после 10-летней работы на кафедре астрономии Саратовского университета, был избран в первый состав (из 11 человек) Правления Московского отделения. Этот состав Правления осуществлял свои функции до 1937 г. [9, с. 172].

Не случайно известный астрофизик И. С. Шкловский в шутливой форме представил рабочее место И. Ф. Полака в Государственном астрономическом институте имени П. К. Штернберга (ГАИШ) на … хвосте кометы. Рисунок сопровождает пояснение: «В послевоенной тесноте старого ГАИШ мечты о новом здании витали в воздухе, каждый мечтал о наиболее удобном для себя рабочем месте… Иосиф Фёдорович Полак был старейшим сотрудником Университетской обсерватории МГУ (с 1905 г.). Он читал в ГАИШ в послевоенные годы курс истории астрономии, однако, будучи специалистом-кометчиком, удобнее всего чувствовал бы себя не иначе как на хвосте благосклонной к нему кометы…» [11].

[4] Многие годы имя И. Ф. Полака в журнале «Природа» значилось среди «участника журнала». Ему принадлежат журнальные заметки «Загадки кометы Энке» (1913), «Метеорная гипотеза солнечных пятен» (1914), «Движение Луны» (1914), «Звезды Oriona» (1917) , а также многочисленные рецензии и мелкие заметки.

[5] Фото с сайта «История геодезии». URL: https://istgeodez.com/polak-iosif-fedorovich/.

[6] В октябре 2007 г. периодическая в Солнечной системе комета Холмса привлекла к себе внимание астрономов резким увеличением своего блеска.

И. Ф. Полак. Дружеский шарж И. С. Шкловского [11]
I. F. Pollack. Friendly cartoon by I. S. Shklovsky [11]

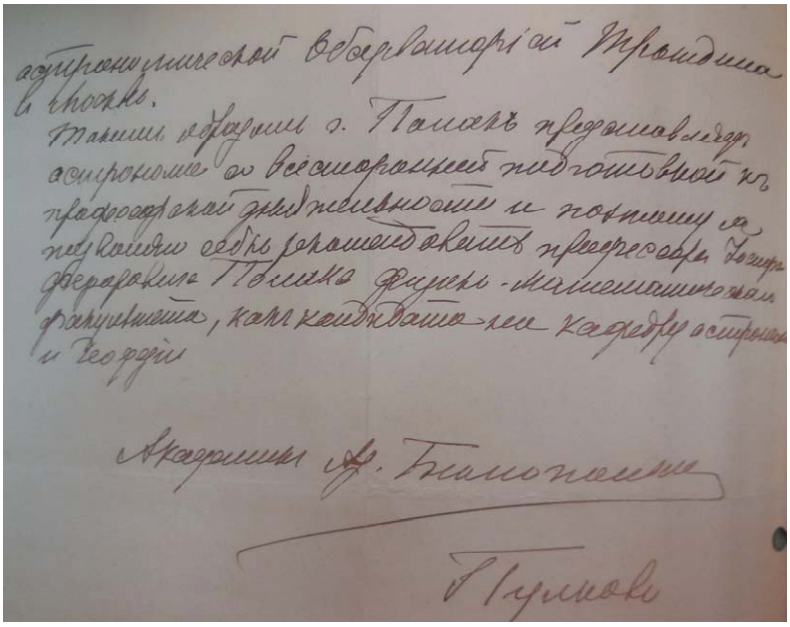
И. Ф. Полак – профессор Саратовского университета

Физико-математический факультет Саратовского университета (СГУ) был образован в 1917 г. [1–4]. Учебный план факультета включал и астрономические и геодезические дисциплины. Отдельные из них, как уже говорилось во введении, студентам факультета прочитали: в 1918–1919 учебном году – академик А. А. Белопольский, а в 1919–1920 учебном году – профессор М. А. Грачев. Вопросами небесной механики занимался профессор Георгий Николаевич Свешников (1889–1970), проработавший в СГУ с 1918 по 1930 г., причем с 1920 г. – заведующим кафедрой механики.

В конце декабря 1918 г. из письма Сергея Анатольевича Богуславского, в ту пору профессора Саратовского университета, И. Ф. Полак узнал об образовавшейся вакансии по кафедре астрономии и геофизики в связи с отказом академика А. А. Белопольского баллотироваться на новый срок. Иосиф Фёдорович срочно написал декану физико-математического факультета В. В. Голубеву с предложением своей кандидатуры, которую поддержали сотрудники факультета И. И. Привалов и Г. Н. Свешников, а также А. А. Белопольский (отзыв А. А. Белопольского был получен физико-математическим факультетом 10 февраля 1919 г.).

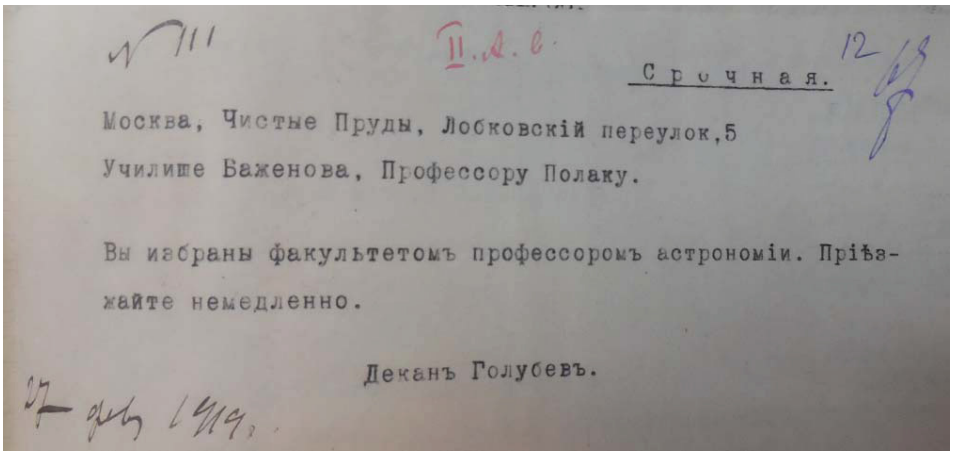
А. А. Белопольский
A. A. Belopol'sky

С. А. Богуславский
S. A. Boguslavsky



Фрагмент рекомендательного письма академика А. А. Белопольского
(Архив СГУ)
Fragment of recommendation letter by academician A. A. Belopolsky
(Archive of Saratov State University)

12 января 1919 г. И. Ф. Полак написал заявление декану с просьбой «подвергнуть его баллотировке на кафедру астрономии и геодезии», которое было зарегистрировано уже 17 января. А 27 февраля положительный результат выборов был сообщен И. Ф. Полаку телеграммой.



№ 111 П. А. С. 12

Срочная.

Москва, Чистые Пруды, Лобковскій переулок,5
Училище Баженова, Профессору Полаку.

Вы избраны факультетомъ профессоромъ астрономіи. Пріѣзжайте немедленно.

Деканъ Голубевъ.

27 февр 1919.

Текст телеграммы И. Ф. Полаку об избрании его профессором астрономии
Telegram text to I. F. Polak about his election as professor of astronomy

В 1919–1923 гг. на кафедре астрономии и геодезии в качестве астронома-вычислителя работал Петр Иванович Яшнов (1874–1940), коллега И. Ф. Полака по астрономической обсерватории Московского университета. В 1921 г. на кафедру был принят молодой сотрудник Павел Васильевич Вьюшков (1900–1969).

В [12] приведен немногочисленный состав кафедры астрономии в 1925 г.: Иосиф Фёдорович Полак – профессор; Павел Васильевич Вьюшков – препаратор (научно-технический работник). За И. Ф. Полаком были закреплены дисциплины «Введение в наблюдательную астрономию», «Наблюдательная астрономия»; «Геодезия», «Прак-

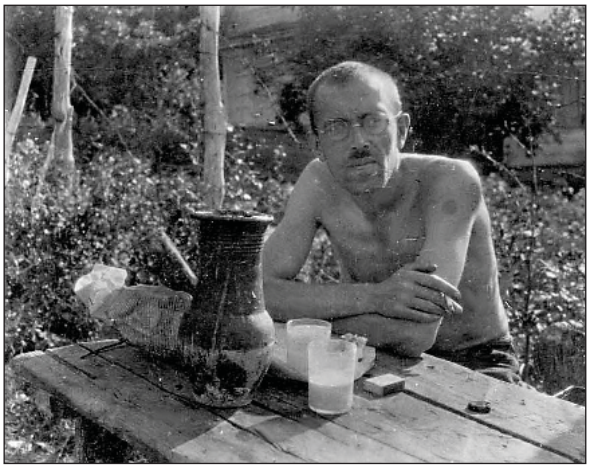
тическая астрономия». В связи с включением в 1922 г. физико-математического факультета в состав педагогического факультета кафедра астрономии и геодезии значилась по физико-техническому отделению. В журнале «Нижнее Поволжье» за 1925 г. отмечалось, что на физико-техническом отделении педагогического факультета «профессорами и преподавателями велась крупная исследовательская работа по основным теоретическим вопросам их специальностей. Проф. Леонтьев разрешил ряд вопросов, имеющих большое значение в радиотелеграфном деле и металлургии; проф. Полак вел интересные работы по астрономии; проф. Голубев и Свешников написали ряд интересных статей по математике» [13, с. 90].

В выпущенных в 1934 г. материалах по истории кафедр СГУ резюмируется деятельность И. Ф. Полака:

«Проф. Полак в течение многих лет был бессменным председателем физико-математической предметной комиссии7. Его заботами был создан астрономический кабинет и астрономическая вышка. Кабинет включал: 2 астрономических часов, несколько хронометров, 4-дюймовый рефрактор, теодолит.

Научная работа проф. И. Ф. Полака протекала главным образом в области теории строения хвоста комет. По этому вопросу им было написано 12 научных работ, из которых “Строение хвоста кометы Галлея 1910 – II” (Саратов, 1923) удостоена премии им. ГУС’а8. Проф. Полак много внимания уделял популяризации астрономии. Широко известны его статьи обзорного характера в Русском астрономическом календаре и отдельные книги: “Космография” и “Происхождение Вселенной”» [14, с. 29, 30].

Павел Васильевич Вьюшков «работал в области полевой астрономии. Для обеспечения геодезических и съемочных работ Главного геодезического управления[9] им был проведен целый ряд экспедиций в Калмообласть, Казахстан, Северный Урал, район Кузбасса и др. для определения географических координат пунктов. По предложению Научно-исследовательского института геодезии и картографии им произведены определения долгот на двух основных долготных пунктах СССР в Орске и Омске» [14, с. 30]. Подчеркивалось также, что с 1931 г. руководство всеми астрономическими курсами взял на себя ассистент П. В. Вьюшков. Дисциплины же из области геодезии в 1933 г. отошли к специально созданной в СГУ кафедре геодезии и картографии.



Земные будни астронома П. В. Вьюшкова, 1935
(фото В. И. Калинина)
Earthly routine of astronomer P. V. Vyushkov, 1935
(photo by V. I. Kalinin)

Краткий неформальный отзыв о П. В. Вьюшкове можно найти в книге профессора Саратовского университета В. Г. Очева «Тайны пылающих холмов» [15, с. 10]. Рассказывая о талантливом сыне Павла Васильевича – палеонтологе Борисе, автор вспоминал:

«Отец Бориса Павловича – Павел Васильевич Вьюшков – до последних дней своей жизни заведовал у нас в Саратовском университете астрономическим кабинетом… Это был очень высокий худощавый человек, до глубокой старости не расстававшийся с теннисом и плаванием. Его отличала необычная дотошность в работе. Интересными, наполненными оригинальными сведениями и расчетами, были популярные лекции по астрономии Павла Васильевича. Все лучшие черты отца унаследовали и его дети – рослые, спортивные и столь же дотошные люди».

[7] Принятое Декретом Совнаркома РСФСР от 3 июля 1922 г. «Положение о высших учебных заведениях» регламентировало деятельность вузов до 1930 г. и определяло руководящую «вертикаль»: 1) центральный орган управления профессиональным образованием – Главное управление профессионального образования (Главпрофобр) Народного комиссариата просвещения; 2) подконтрольные Главпрофорбу правления вузов, обеспечивавшие руководство учебной и административно-хозяйственной деятельностью (председатель правления (ректор) назначался Наркомпросом; в состав правления вуза включались представители преподавателей, студентов и заинтересованных организаций); 3) предметные комиссии из числа студентов и преподавателей (в равном количестве), в функции которых входили разработка учебных программ и обсуждение методов преподавания. Деятельность предметных комиссий сопровождалась конфликтами интересов преподавательской и студенческой части комиссий.

[8] Государственный ученый совет (ГУС) – высший руководящий научно-методический центр Наркомпроса РСФСР. Образован Декретом Совнаркома в марте 1919 г. ГУС утверждал учебные планы, программы и учебные пособия, разрабатывал политику в сфере образования, контролировал назначение преподавательских кадров. Прекратил свою деятельность в 1933 г. в связи с реорганизацией Наркомпроса.

[9] Высшее геодезическое управление, Главное геодезическое управление – названия в разные периоды времени государственной структуры, занимавшейся в РСФСР и СССР вопросами геодезии и картографии.

Петр Иванович Яшнов, сотрудник Московской (1904–1909), Пулковской (1909–1912, 1917–1919) и Николаевской (1912–1917) обсерваторий, оказался в Саратове в силу житейских трудностей, обусловленных Гражданской войной. В одном из писем к директору Пулковской обсерватории А. А. Иванову П. И. Яшнов откровенно признает свой отъезд из Пулково «очень необдуманным шагом» и в качестве «смягчающих его поведение обстоятельств» вспоминает «жизнь в Пулково осенью 1919 года» [8, с. 132]. Привыкший к интенсивной научной и организационной деятельности, он далее жалуется на свой «духовный голод»: «Есть духовный голод, проявления которого не так ужасны по внешности, как страдания от голода физического, не так трогают окружающих, а иногда и совсем скрыты для них, но тем не менее переживать это состояние очень мучительно» [8, с. 132]. А вот что пишет П. И. Яшнов 10 декабря 1921 г. директору обсерватории Московского университета С. Н. Блажко о своей и И. Ф. Полака работе: «Я счастливее его, у меня еще есть Пулковские материалы, и я вычисляю и пишу, но это скоро иссякнет».

П. И. Яшнов [8]
P. I. Yashnov [8]

Как и П. В. Вьюшков, П. И. Яшнов летние месяцы проводил в степи за Волгой, занимался геодезическими работами, являясь начальником астрономических партий от Приволжского округа Высшего геодезического управления. В 1922 г. П. И. Яшнов при содействии Пулковской обсерватории и Высшего геодезического управления радиотелеграфным методом определил разницу долгот между Пулково и Саратовом (это было одно из первых применений метода).

Что касается И. Ф. Полака, то он уже с первых лет работы в Саратовском университете уделял существенное влияние аналитической и методической работе: составлял программы астрономических и геодезических дисциплин, писал и издавал учебники и учебные пособия, научно-популярную литературу по астрономии.

В брошюре о функционировавшем в 1922–1930 гг. педагогическом факультете Саратовского университета [16] астрономическое (теоретическое и прикладное) направление в СГУ представлено кафедрой астрономии и геодезии и (в качестве учебно-вспомогательного учреждения) кабинетом астрономии. Книга интересна тем, что в ней приведены учебные рабочие планы для различных отделений педагогического факультета. Дисциплина «Астрономия» включена в учебные планы третьего (семинары) и четвертого (лекции) курсов. На 3-м курсе лекции по дисциплине «Геодезия» сопровождались 6-дневным летним геодезическим практикумом. Лекции по геодезии и 8-дневная летняя практика предусматривались на третьем курсе секции экономической географии на общественно-экономическом отделении педагогического факультета.

Учебные программы дисциплин были составлены И. Ф. Полаком. Раздел «Теоретическая астрономия» содержал темы:

Закон всемирного тяготения. Законы Кеплера; вывод из них закона тяготения. Вывод законов эллиптического движения из законов Ньютона. Уравнение Кеплера. Движение по параболе. Вычисление геоцентрических координат планет и комет (эфемерид). Определение орбит комет по трем наблюдениям. Способ Ольберса. Определение орбит планет. Понятие о способе Гаусса. Орбиты двойных звезд. Орбиты метеорных роев.

Раздел «Описательная астрономия» включал такие темы:

Астрономия. Инструменты. Определение широты, долготы, астрономических координат светил. Земля как небесное тело; ее размеры, форма, движение, масса. Солнце. Его видимое движение, расстояние, размеры. Физическое строение Солнца. Луна. Ее движение и природа. Затмение. Планеты. Их движение и природа. Кометы и метеоры. Звездный мир. Расстояния и собственные движения звезд. Природа звезд. Абсолютная яркость. Спектральные классы. Звезды двойные и переменные. Звездные скопления и туманности. Главнейшие космогонические гипотезы.

Программа астрономического «семинария» включала вопросы сферической астрономии и элементы практической астрономии:

Основные формулы сферической тригонометрии. Основные формулы интерполирования. Небесная сфера и ее суточное движение. Астрономические координаты и их преобразование. Измерение времени и

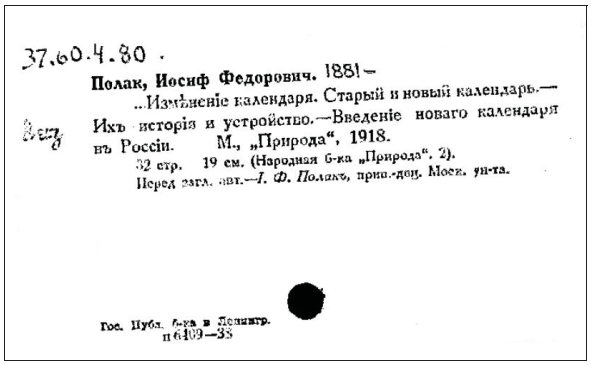
календарь. Задачи на суточное движение. Устройство и употребление астрономических ежегодников. Параллакс. Рефракция. Аберрация. Прецессия и нутация. Понятие об определении координат звезд. Средние и истинные координаты. Звездные каталоги.

В качестве учебной литературы в программе рекомендовались две книги И. Ф. Полака – «Строение звездного мира» (издана в 1923 г.) [17] и «Происхождение Вселенной» (издана в 1926 г.; переиздавалась в 1933 г. и дважды в 1934 г.) [18][10]. Еще раньше, в 1918 г., им были изданы учебник «Космография» [20] (переиздавался в 1923 и 1924 гг.) и (в связи с переходом России на новый стиль) брошюра «Изменение календаря» [21]. В 1924 г. вышла книга И. Ф. Полака на весьма обсуждавшуюся тему о жизни на Марсе. Называлась она «Планета Марс и возможность жизни на ней» [22] (переиздавалась в 1934, 1939 и 1948 гг.). В 1928 и 1935 гг. издана брошюра «Солнце» [23].

В полной мере счастливая судьба (fata libelli) ждала и другие книги И. Ф. Полака. В 1928 г. в библиотеке журнала «Народный учитель» была издана научно-популярная брошюра И. Ф. Полака «Время и календарь» [24]. В 1929–1959 гг. последовал вал ее переизданий в различных издательствах. Только в 1947–1948 гг. она была напечатана тиражом 500000 экз.! Последнее переиздание в 1959 г., осуществленное уже после смерти автора, имело тираж 60000 экз.

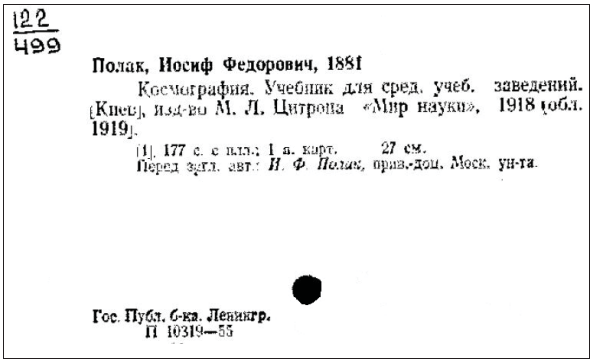
Аналогичное широкое тиражирование ждало и книгу И. Ф. Полака «Как устроена Вселенная». Вышедшая в 1945 г. [25], она в 1946–1949 гг.

[10] В 1925 г. в Саратове была издана книга И. Ф. Полака под названием «Происхождение мира» [19].


37.60.4.80

Полак, Иосиф Федорович. 1881–
..Измѣненіе календаря. Старый и новый календарь.—
Ихъ исторія и устройство.—Введеніе новаго календаря
въ Россіи. М., „Природа", 1918.
52 стр. 19 см. (Народная б-ка „Природа". 2).
Перед загл. авт.—*І. Ф. Полакъ*, прив.-доц. Моск. ун-та.

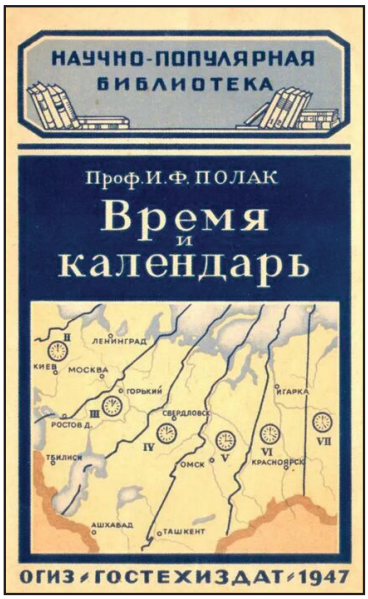
Гос. Публ. б-ка в Ленингр.
П 6409—38


122
499

Полак, Иосиф Федорович, 1881
Космография. Учебник для сред. учеб. заведений. [Киев], изд-во М. Л. Цитрона «Мир науки», 1918 [обл. 1919].
[1], 177 с. с илл.; 1 л. карт. 27 см.
Перед загл. авт.: *И. Ф. Полак*, прив.-доц. Моск. ун-та.

Гос. Публ. б-ка. Ленингр.
П 10319—55

Библиографические карточки Российской национальной библиотеки с описанием книг И. Ф. Полака
Bibliographic cards from the Russian National Library with description of books by I. F. Polak



Обложки научно-популярных брошюр И. Ф. Полака
Covers of popular science brochures by I. F. Polak

переиздавалась по всей стране (Москва, Чкалов, Чита, Саратов, Пенза, Иркутск, Киров, Новосибирск, Иваново) не менее 10 раз. Кроме того, в 1947–1950 гг. трижды выпускалась брошюра «Строение Вселенной», в том числе в серии «Научно-популярная библиотека солдата и матроса» [26]. В Саратовском университете в 1929 г. И. Ф. Полак закончил написание капитального учебника «Курс общей астрономии».

Саратовские встречи

В 1930 г. И. Ф. Полак вернулся на работу в московские вузы. В 1930 – 1946 гг. он работал профессором Московского института инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии (МИИГАиК). С момента организации кафедры небесной механики МГУ (1938 г.) являлся профессором этой кафедры.

В апреле 1935 г. И. Ф. Полак приезжал в Саратов на празднование 25-летия Саратовского университета, которое отмечалось, по выражению профессора С. И. Спасокукоцкого, с «всесоюзным размахом» [27, 28]. В те дни доцент физико-математического факультета (впоследствии – профессор, основатель кафедры радиофизики физического факультета) Венедикт Иванович Калинин сделал интересные фотографии с митинга, посвященного юбилею СГУ. На публикуемой фотографии И. Ф. Полак (в центре) запечатлен вместе с Владимиром Дмитриевичем Зёрновым (также приехавшим из Москвы), директором СГУ Дмитрием Александровичем Рамзаевым, профессорами физико-математического факультета Георгием Николаевичем Свешниковым и Иваном Ивановичем Приваловым.

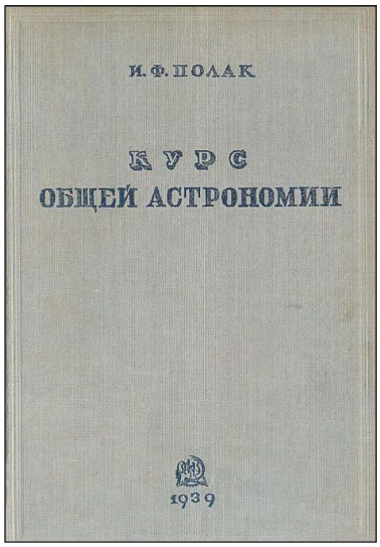
На митинге, посвященном 25-летию СГУ, апрель 1935 г. Слева направо: В. Д. Зёрнов, Д. А. Рамзаев, И. Ф. Полак, Г. Н. Свешников, И. И. Привалов

At the rally dedicated to the 25th anniversary of Saratov State University, April 1935. From left to right: V. D. Zernov, D. A. Ramzaev, I. F. Polak, G. N. Sveshnikov, I. I. Privalov

Автор классических учебников

В течение всей жизни Иосиф Фёдорович Полак вел продуктивную методическую и педагогическую деятельность, написав свыше 10 учебников и научно-популярных брошюр, которые долгое время выходили повторными изданиями, в том числе и после его смерти. По этим книгам можно получить представление и о темпах развития астрономических знаний, и о видоизменениях структуры руководства высшей школой в стране, и о размахе издательской деятельности, и, что было естественным в те годы, о не только практическом, но и политическом обосновании необходимости преподавания астрономии.

Большую подготовительную работу для написания фундаментальных учебников И. Ф. Полак



Обложка учебника И. Ф. Полака
Cover of textbook by I. F. Polak

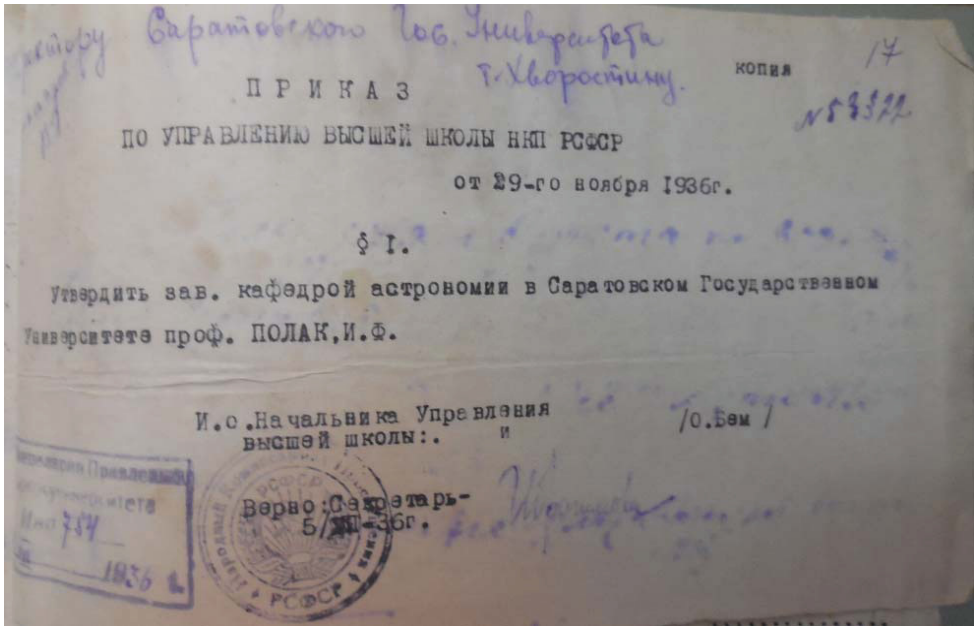
проделал в период работы в Саратовском университете (см. [17–24]). Солидный «Курс общей астрономии» И. Ф. Полака для государственных университетов, педагогических институтов и высших технических учебный заведений выдержал 7 изданий – в 1930, 1933, 1934, 1938, 1939, 1951 и 1955 гг. [29]. Отдельно для студентов педагогических техникумов в 1934 г. была выпущена книга «Астрономия» [30]. Двумя изданиями (в 1944 и 1946 гг.) вышла научно-популярная книга «Общедоступная астрономия» [31]. В 1933 и 1945 гг. И. Ф. Полак принял участие в издании учебников, посвященных сферической астрономии – специальному разделу астрономии, посвященному методам определения положения объектов на небесной сфере [32].

В 1947 г. Министерство высшего образования СССР утвердило подготовленную И. Ф. Полаком программу по общей астрономии для физико-математических факультетов университетов [33].

Историческое заключение

Как уже говорилось, проработав в Саратовском университете с 1919 г., И. Ф. Полак в 1930 г. в числе некоторых других профессоров СГУ покинул Саратов и вернулся в Москву, где занимался научной и преподавательской работой в вузах, готовил к печати издания по астрономии. Однако в архивном деле И. Ф. Полака имеется загадочный документ от 29 ноября 1936 г. об утверждении его заведующим кафедрой астрономии в СГУ. Возможно, директор СГУ Г. К. Хворостин пригласил тогда И. Ф. Полака в рамках второго «призыва» квалифицированных столичных преподавателей на физико-математический факультет [1, 3].

Однако последующая архивная справка от 31 декабря1939 г., подписанная ректором П. В. Голубковым, фиксирует стаж работы И. Ф. Полака в СГУ с 12 февраля 1919 г. по 1 октября 1930 г. Умер Иосиф Фёдорович в 1954 г. Он похоронен на Новодевичьем кладбище (участок 3, ряд 58).



Саратовского Гос. Университета
Г. Хворостину.

копия 17

ПРИКАЗ
ПО УПРАВЛЕНИЮ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ НКП РСФСР
от 29-го ноября 1936г.

§ I.

Утвердить зав. кафедрой астрономии в Саратовском Государственном Университете проф. ПОЛАК,И.Ф.

И.о.Начальника Управления высшей школы:. /О.Бем /

Верно:Секретарь-
5/XII-36г.

Справка от 29 ноября 1936 г. о назначении И. Ф. Полака заведующим кафедрой астрономии СГУ
Certificata of November 29, 1936 on the appointment of I. F. Polak as the head of the astronomy department of Saratov State University

В исторических материалах, характеризующих деятельность Астрономической обсерватории Московского университета, а также созданных на ее базе Государственного астрономического института имени П. К. Штернберга (1931) и астрономического отделения физического факультета МГУ, неизменно отмечается вклад И. Ф. Полака в педагогическую и научную деятельность в области астрономии:

«За долгую историю существования обсерватории и института их сотрудниками были выполнены работы, позволившие заложить в астрономии основы новых научных направлений и завоевавшие широкую известность, как в России, так и за рубежом. В XIX – начале XX вв. лицо Астрономической обсерватории определяли такие ученые, как академики Д. М. Перевощиков, А. Н. Савич, Ф. А. Бредихин, А. А. Белопольский, члены-корреспонденты М. Ф. Хандриков, В. К. Цераский, С. К. Костинский, Г. А. Тихов, С. Н. Блажко, профессора П. К. Штернберг, С. А. Казаков, И. А. Казанский, И. Ф. Полак и другие. Деятельность этих ученых и воспитанных ими исследователей позволила превратить Москву в один из ведущих мировых центров развития астрономии» [34].

В 1931 г. кафедра астрономии Саратовского университета в рамках возрожденного физико-математического факультета была временно присоединена к кафедре математики. Астрономическую тематику в СГУ продолжал доцент Павел Васильевич Вьюшков (ученая степень кандидата физико-математических наук была присвоена ему в 1938 г.), заведовавший кафедрой астрономии в 1930–1954 гг. В октябре 1936 г. он был избран руководителем Саратовского отделения Всесоюзного астрономо-геодезического общества [9, с. 177]. Сохранилась интересная фотография выпускников физмата 1936 г. (подробнее см. [1, 35]). На ней рядом помещены фото П. В. Вьюшкова и выпускника В. Е. Штепана, местом работы которого в 1939 г. в должности старшего преподавателя стала кафедра физики Саратовского педагогического института. Вел он, в частности, и занятия по астрономии [36].

В октябре 1936 г. В. Е. Штепан был участником Шестой конференции исследователей переменных звезд в СССР (конференция проводилась в ГАИШ) [37]. Принимал участие в международной программе наблюдений слабых телескопических метеоров, которая была в Саратове успешно осуществлена (под руководством И. С. Астаповича) [38]. На Третьей научной конференции по метеорной и кометной астрономии 1939 г. он как член Саратовского отделения Всесоюзного астрономо-геодезического общества был избран в Центральную комиссию по метеорам, кометам

Фрагмент фотографии выпускников физико-математического факультета СГУ, 1936 г. [1, 35]

Fragment of a photograph of graduates from the Faculty of Physics and Mathematics of Saratov State University, 1936 [1, 35]

и астероидам при Астрономическом Совете АН СССР, призванной согласовывать и объединять всю научную работу по метеорной астрономии в СССР [9, с. 189]. В 1941 г. в журнале «Наука и жизнь» была опубликована его методическая заметка «Наблюдения метеоров с помощью бинокля» [39].

В 1945 г. физико-математический факультет был разделен на физический и механико-математический факультеты [3,4, 40 – 45]. В число первых четырех кафедр физического факультета входила и кафедра астрономии, которая в 1954 г. была присоединена к кафедре теоретической физики. Но за год до этого кафедру с отличием окончил (по специальности «Астрономия» с присвоением квалификации «Астроном») Юрий Андреевич Скляров (1931–2014), будущий продолжатель астрономического, астрофизического и геофизического научных направлений в СГУ [5, 6, 46]. Его научный руководитель П. В. Вьюшков предложил ему реализовать в действующий прибор идею болометрического пиргелиометра – прибора для абсолютных измерений прямой солнечной радиации. Как оказалось, этот выбор определил всю жизнь Ю. А. Склярова. Доктор физико-математических наук профессор Михаил Борисович Богданов, ученик Ю. А. Склярова, вспоминает:

«Я познакомился с Ю. А. Скляровым весной 1965 г. Тогда я занимался в астрономическом кружке Дворца пионеров, а он читал нам лекции по сферической астрономии. Когда я учился в университете, здесь функционировала станция наблюдения искусственных

спутников Земли. Ю. А. Скляров был ее начальником. И я устроился туда на полставки лаборантом-наблюдателем. Учился я на дневном отделении, но поскольку вечер и ночь были свободны, проводил наблюдения. Вокруг этой станции собирались студенты и сотрудники университета, которые интересовались астрономией. Сам Юрий Андреевич занимался измерением потока солнечного излучения.

Ю. А. Скляров ратовал за то, чтобы развивалось несколько направлений. В частности, нам с Л. Н. Бердниковым было поручено заниматься изучением переменных звезд. Юрий Андреевич сам помогал нам. И вот сейчас Леонид Николаевич – доктор наук. Работает в Государственном астрономическом институте имени П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова. И я тоже стал профессиональным астрономом. По крайней мере, по дипломам кандидата и доктора наук. Другие сотрудники занимались наблюдениями астероидов и малых планет.

Спустя некоторое время к нам присоединился А. В. Хохлов, сейчас он доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики. Со своей группой он создал два радиотелескопа для наблюдений за Солнцем.

Конечно, группа, которую возглавлял Юрий Андреевич, была самой сильной, она занималась созданием специальной аппаратуры для наблюдения за Солнцем и отраженной нашей планетой радиации с борта искусственных спутников Земли и высотных аэростатов. Он создал много приборов. И один из них – радиометр ИКОР-М – до сих пор летает на спутнике и каждую секунду принимает информацию об отраженной солнечной радиации. Это своеобразный памятник Юрию Андреевичу, потому что спутник находится на высокой орбите, где он будет существовать еще сотни лет» [46, с. 10].

Безусловно, за последние десятилетия астрономия и астрофизика сделали гигантские шаги в изучении окружающего мира. Но научное творчество следует, по-видимому, рассматривать как особый нарратив, в котором важен каждый эпизод. Важно и то, что знание университетской истории означает сохранение и охранение корпоративной культуры и исторической памяти. Показательно, что многие годы в Саратовском университете функционирует Общество любителей астрономии [47].

Список литературы

1. *Аникин В. М.* Физико-математический факультет Саратовского университета (1917–1945) // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2018. Т. 18, вып. 1. С. 64–79. DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-1-64-79
2. *Аникин В. М.* «Ввести в действие до обнародования Правительствующим Сенатом» (К истории учреждения физико-математического факультета Саратовского университета) // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2018. Т. 18, вып. 2. С. 149–157. DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-149-157
3. *Аникин В. М.* «Бифуркационная летопись» физико-математического факультета Саратовского университета. 1917–1945 // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2018. Т. 26, № 6. С. 5–19. DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-6-5-19
4. *Аникин В. М.* «Приобретать уменье делать физические измерения и исследования» : к 100-летию физического образования и физической науки в Саратове // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2014. Т. 14, вып. 1. С. 53–58.
5. *Скляров Ю. А., Бричков Ю. И.* Астрономические и геофизические исследования в СГУ (К 45-летию создания станции слежения за ИСЗ) // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. 2002. Т. 2, вып. 2. С. 27–32.
6. Памяти профессора Ю. А. Склярова (1931–2014) // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Науки о Земле. 2015. Т. 15, вып. 1. С. 80–88.
7. *Хохлов А. В.* Становление и развитие солнечной радиоастрономии в Саратове // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2019. Т. 19, вып. 3. С. 223–236. DOI: https://doi.org/10.18500/1817-3020-2019-19-3-223-236
8. *Горель Г. К., Зверев М. С.* Пулковский астроном П. И. Яшнов // Историко-астрономические исследования. М. : Наука. ГРФМЛ, 1977. Вып. XIII. С. 117–146. URL: http://www.astro-cabinet.ru/library/IAI_13/Iai_Ogl.htm (дата обращения 02.02.2020).
9. *Луцкий В. К.* История общественных астрономических организаций в СССР (1888–1941). М. : Наука, 1982. 264 с.
10. *Полак И. Ф.* О движении кометы Холмса (Holmes) // Учен. зап. СГУ. Пед. фак. 1929. Т. VII, вып. III. С. 45–79.
11. *Шкловский И. С.* Альбом с рисунками. URL : http://www.sai.msu.ru/news/2016/06/16/Shklovskyi.pdf (дата обращения: 02.02.2020).
12. Саратовский государственный имени Н. Г. Чернышевского университет в 1925 году (Краткие сведения о состоянии и работе). Приложение к V тому «Ученых записок». Саратов : [б.и.], 1926. 57 с.
13. *Семичастнов М.* Саратовский университет как культурный центр Нижнего Поволжья // Нижнее Поволжье. 1925. № 10. С. 86–92.
14. Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, 1909–1934 : сборник материалов по истории СГУ и его кафедр. Юбилейный выпуск / отв. ред. Д. А. Рамзаев. Саратов, 1935. 95 с. URL : http://elibrary.sgu.ru/Djvu/s.html#1 (дата обращения: 02.02.2020).
15. *Очев В. Г.* Тайны пылающих холмов. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 1976. 95 с.
16. Обозрение преподавания на педагогическом факультете Саратовского государственного, имени Н. Г. Чернышевского, университета на 1927–28 уч. год. Саратов : Издание Сарат. гос. ун-та, 1927. 186 с.
17. *Полак И. Ф.* Строение звездного мира. М. : М. и С. Сабашниковы, 1923. 98 с. Перед загл. : И. Ф. Полак, проф. Сарат. ун-та.
18. *Полак И. Ф.* Происхождение Вселенной : Популярный очерк. М. : Изд-во Коммунист. ун-та им. Я. М. Свердлова, 1926. 134 с.

19. *Полак И. Ф.* Происхождение мира. Саратов : Изд-во Саризвестий, 1925. 62 с. (Б-ка «Саратовских известий», № 2).
20. *Полак И. Ф.* Изменение календаря : Старый и новый календарь. Их история и устройство. Введение нового календаря в России М. : Природа, 1918. 32 с. (Народная б-ка «Природа»).
21. *Полак И. Ф.* Космография : учебник для средних учебных заведений. [Киев] : Изд-во М. Л. Цитрона «Мир науки», 1918. 177 с.
22. *Полак И. Ф.* Планета Марс и возможность жизни на ней. М. : Гос. изд-во, 1924. 100 с. (Начатки естествознания).
23. *Полак И. Ф.* Солнце. М. ; Л. : Гос. изд-во, 1928. 120 с. (Начатки науки).
24. *Полак И. Ф.* Время и календарь. М. : Работник просвещения, 1928. 121 с. (Науч.-попул. б-ка журн. «Народный учитель»). Перед загл. : Проф. И. Ф. Полак.
25. *Полак И. Ф.* Как устроена Вселенная. М. ; Л. : Гостехиздат, 1945. 40 с. (Науч.-попул. б-ка).
26. *Полак И. Ф.* Строение Вселенной. М. : Воен. изд-во, 1947. 48 с. (Науч.-попул. б-ка солдата и матроса).
27. «Празднику был придан всесоюзный и политический размах» (проф. С. И. Спасокукоцкий о праздновании 25-летия Саратовского университета и медицинского института) / вступ. статья, коммент. и подготовка текста к публикации В. А. Соломонова // Отечественные архивы. 1995. № 6. С. 80–84.
28. *Трубецков Д. И., Аникин В. М.* Физики на четвертьвековом юбилее Саратовского университета // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2019 Т. 27, № 3. С. 99–106. DOI: https://doi.org/10.18500/0869-6632-2019-27-3-99-106
29. *Полак И. Ф.* Курс общей астрономии : учебник для гос. ун-тов и пед. ин-тов. 7-е изд., перераб. М. : Гостехиздат, 1955. 371 с.
30. *Полак И. Ф.* Астрономия : учебник для пед. техникумов. М. ; Л. : Гос. учеб.-пед. изд-во, 1934. 143 с.
31. Полак И. Ф. Общедоступная астрономия. М. ; Л. : Гостехиздат, 1946. 279 с.
32. *Полак И. Ф., Смирнов М. Н., Цветков К. А.* Курс сферической астрономии. М. ; Л. : Гос. техн.-теор. изд-во, 1933. 128 с.
33. Полак И. Ф. Программа по общей астрономии (для физ.-мат. фак. гос. ун-тов). Киев : Изд-во Киевского гос. ун-та им. Т. Г. Шевченко, 1947. 7 с. (М-во высшего образования СССР).
34. Астрономическое отделение физического факультета МГУ. ГАИШ. История. URL: http://www.sai.msu.ru/ao/history/ (дата обращения: 02.02.2020).
35. *Трубецкова И. А.* Университетская Вселенная ректора Г. К. Хворостина : Рождение и гибель // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2017. Т. 25, № 2. С. 89–103. DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-2-89-103
36. *Железовский Б. Е.* Подготовка педагогов : годы и люди // Очерки истории физико-математического образования в Саратовском университете / под общ. ред. В. М. Аникина. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2019. С. 129–136.
37. Астрономическое наследие. Создание ГАИШ. URL: http://heritage.sai.msu.ru/history/sai_history/sai2005_04.html (дата обращения: 02.02.2020).
38. Материалы по истории астрономии. URL: http://www.astro-cabinet.ru/library/raiir/russkie-astronomy-i-ih-raboty10.htm (дата обращения: 02.02.2020).
39. *Штепан В. Е.* Наблюдения метеоров с помощью бинокля // Наука и жизнь. 1941. № 5. С. 13.
40. *Аникин В. М.* Физическому факультету – 65 лет // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. / под ред. А. В. Ляшенко. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2011. Вып. 9. Магнитоэлектроника. Микро- и наноструктуры. Прикладные аспекты. Проблемы физического образования. С. 4–16.
41. *Аникин В. М.* Физика в Саратовском университете. К 100-летию физического института и 70-летию физического факультета // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. / под ред. А. В. Ляшенко. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2014. Вып. 16. Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. С. 78–84.
42. *Усанов Д. А., Аникин В. М.* Саратовские научные и педагогические школы по физике (к 80-летию образования Саратовской области) // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2016. Т. 16, вып. 3. С. 178–190. DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-3-178-190
43. *Аникин В. М.* Физический факультет в XXI веке // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2014. Т. 14, вып. 2. С. 65–71. DOI : https://doi.org/10.18500/1817-3020-2014-14-2-65-71
44. *Аникин В. М.* Послесловие к юбилею физического факультета СГУ // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2016. Т. 16, вып. 4. С. 248–252. DOI: https://doi.org/10.18500/1817-3020-2016-16-4-248-252
45. *Аникин В. М.* Физический факультет СГУ : памятные даты // Вопросы прикладной физики : межвуз. науч. сб. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2015. Вып. 22. С. 3–7.
46. Юрий Андреевич Скляров / под ред. А. Н. Чумаченко, Д. А. Усанова // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Науки о Земле. 2014. Т. 14. Отд. оттиск. 42 с.
47. *Рытик А. П., Аникин В. М., Богданов М. Б., Короновский А. А.* Общество любителей астрономии Саратовского университета // Первая Всероссийская конференция по космическому образованию «Дорога в космос» (Москва, 1–4 октября 2019 г.). М. : Ин-т космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), 2019. С. 296–300.

Образец для цитирования:

Аникин В. М. Профессор астрономии Саратовского университета Иосиф Фёдорович Полак (1881–1954) // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2020. Т. 20, вып. 2. С. 144–159. DOI: https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-2-144-159

Professor of Astronomy of Saratov State University Joseph Fedorovich Polak (1881–1954)

V. M. Anikin

Valery M. Anikin, https://orcid.org/0000-0002-6506-6997, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, AnikinVM@info.sgu.ru

For the first time, the article provides a systematic biography of the professor of Moscow and Saratov Universities, Joseph F. Polak (1881–1954), an astronomer and teacher, the author of many textbooks and popular science publications on astronomy. In total, about 60 editions and reprints of his books were published, the total circulation of which is 2 million copies. I. F. Polak worked at the University of Saratov in 1919–1930 at the Faculty of Physics and Mathematics and at the Pedagogical Faculty, he headed the Department of Astronomy organized by him. His works are of interest from a historical and methodological point of view, reflecting the history of the development of astronomy both in science and in its teaching in universities and schools of the USSR. The history of the development of astronomy, astrophysics, and geophysics at Saratov State University over the past 100 years is dotted.
Keywords: Saratov State University, astronomy, Joseph Fedorovich Polak.

Received: 15.01.2020 / Accepted: 25.02.2020 / Published: 01.06.2020

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

References

1. Anikin V. M. Faculty of Physics and Mathematics of Saratov State University (1917–1945). *Izv. Saratov Univ. (N. S.). Ser. Physics*, 2018, vol. 18, iss. 1, pp. 64–79 (in Russian). DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-1-64-79
2. Anikin V. M. «Enter into Action before Declaration by Governing Senate» (On the History of the Establishment of the Faculty of Physics and Mathematics at Saratov State University). *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2018, vol. 18, iss. 2, pp. 149–157 (in Russian). DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-149-157
3. Anikin V. M. "Bifurcation chronicle" of Saratov University Department of Physics and Mathematics. 1917–1945. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2018, vol. 26, no. 6, pp. 5–19 (in Russian). DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-6-5-19
4. Anikin V. M. "To Get the Ability to Do the Physical Dimensions and Research": A Centenary of Physical Education and Science in Saratov. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2014, vol. 14, iss. 1, pp. 53–58 (in Russian).
5. Sklyarov Yu. A., Brichkov Yu. I. Astronomical and Geophysical Research at SSU (On the 45th Anniversary of the Creation of a Satellite Tracking Station. *Izv. Saratov Univ. (N. S.),* 2002, vol. 2, iss. 2, pp. 27–32 (in Russian).
6. In Memory of Professor Yu. A. Sklyarov (1931–2014). *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Earth Sciences*, 2015, vol. 15, iss. 1, pp. 80–88 (in Russian).
7. Khokhlov A. V. Formation and Development of Solar Radio Astronomy in Saratov. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2019, vol. 19, iss. 3, pp. 223–236 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.18500/1817-3020-2019-19-3-223-236
8. Gorel G. K., Zverev M. S. Pulkovsky astronomer P. I. Yashnov. *Istoriko-astronomicheskiye icsledovaniya* [Historical and astronomical studies]. Moscow, Nauka Publ., GRFML, 1977, iss. XIII, pp. 117–146. Available at: http://www.astro-cabinet.ru/library/IAI_13/Iai_Ogl.htm (accessed 2 February 2020) (in Russian).
9. Lutsky V. K. *Istoriya obshchestvennykh astronomicheskikh organizatsiy v SSSR (1888–1941)* [History of Public Astronomical Organizations in the USSR (1888–1941)]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 264 p. (in Russian).
10. Polak I. F. On the motion of the comet Holmes. *Uchenyye zapiski SGU. Pedagogicheskiy fakul'tet* [Scientists notes of SSU. Faculty of Education], 1929, vol. VII, iss. III, pp. 45–79 (in Russian).
11. Shklovsky I. S. *Al'bom s risunkami* (An album with drawings). Available at: http://www.sai.msu.ru/news/2016/06/16/Shklovskyi.pdf (accessed 2 February 2020) (in Russian).
12. *Saratovskiy gosudarstvennyy imeni N. G. Chernyshevskogo universitet v 1925 godu (Kratkiye svedeniya o sostoyanii i rabote)*. Prilozheniye k V tomu "Uchenykh zapisok" [Saratov State University in 1925 (Brief information about the state and work). Suppl. to vol. V of "Scientific Notes"]. Saratov, 1926. 57 p. (in Russian).
13. Semichastnov M. Saratov University as a cultural center of the Lower Volga region. *Nizhneye Povolzh'ye* [Lower Volga region], 1925, no. 10, pp. 86–92 (in Russian).
14. *Saratovskiy gosudarstvennyy universitet im. N. G. Chernyshevskogo, 1909–1934: materialy po istorii SGU I yego kafedr. Yubileyny vypusk* [Saratov State University. 1909–1934. Materials on the history of SSU and its departments. Anniversary issue]. Saratov, 1935. 95 p. (in Russian).
15. Ochev V. G. *Tayny pylayushchikh kholmov* [Secrets of flaming hills]. Saratov, Izdatel'stvo Saratovskogo universiteta, 1976. 95 p. (in Russian).
16. *Obozreniye prepodavaniya na pedagogicheskom fakul'tete Saratovskogo gosudarstvennogo, imeni N. G. Chernyshevskogo, universiteta na 1927–28 uch. god* [Review of teaching at the pedagogical faculty of the Saratov State University, named after N. G. Chernyshevsky, university for the 1927–28 academic year]. Saratov, Izdaniye Sarat. gos. un-ta, 1927. 186 p. (in Russian).
17. Polak I. F. *Stroyeniye zvezdnogo mira* [The structure of the starry world]. Moscow, M.&S. Sabashnikovs, 1923. 98 p. (in Russian).
18. Polak I. F. *Proiskhozhdeniye Vselennoy. Popul. ocherk* [Genesis of the Universe. Popul. feature article]. Moscow, Izd-vo Kommunist. un-ta im. Ya. M. Sverdlova, 1926. 134 p. (in Russian).

19. Polak I. F. *Proiskhozhdeniye mira* [Genesis of the Universe]. Saratov, Izd-vo Sarizvestiy, 1925. 62 p. (B-ka "Saratovskikh izvestiy", no. 2) (in Russian).
20. Polak I. F. *Izmeneniye kalendarya: Staryy i novyy kalendar'. Ikh istoriya i ustroystvo. Vvedeniye novogo kalendarya v Rossii* [Calendar Change: Old and New Calendar. Their history and device. Establishment of the new calendar in Russia]. Moscow, Priroda Publ., 1918. 32 p. (Narodnaya biblioteka "Priroda") (in Russian).
21. Polak I. F. *Kosmografiya: uchebnik dlya srednikh uchebnykh zavedeniy* [Cosmography: a textbook for secondary schools]. [Kiyev], Izd-vo M. L. Tsitrona "Mir nauki", 1918. 177 p. (in Russian).
22. Polak I. F. *Planeta Mars i vozmozhnost' zhizni na ney* [Planet Mars and the Possibility of Life on It]. Moscow, Gos. izd-vo, 1924. 100 p. (Nachatki yestestvoznaniya) (in Russian).
23. Polak I. F. *Solntse* [The Sun]. Moscow, Leningrad, Gos. izd-vo, 1928. 120 p. (Nachatki nauki) (in Russian).
24. Polak I. F. *Vremya i kalendar'* [Time and calendar]. Moscow, Rabotnik prosveshcheniya Publ., 1928. 121 p. (Nauch.-popul. b-ka zhurn. "Narodnyy uchitel") (in Russian).
25. Polak I. F. *Kak ustroyena Vselennaya* [How the Universe is arranged]. Moscow, Leningrad, Gostekhizdat Publ., 1945. 40 p. (Nauch.-popul. b-ka) (in Russian).
26. Polak I. F. *Stroyeniye Vselennoy* [The structure of the Universe]. Moscow, Voyennoe izd-vo, 1947. 48 p. (Nauch.-popul. b-ka soldata i matrosa) (in Russian).
27. "The holiday was given at All-Union and political scope" (Prof. S. I. Spasokukotsky about the celebration of the 25th anniversary of Saratov University and the Medical Institute). Introductory article, comments and preparing the text for publication by V. A. Solomonov. *Otechestvennye Arkhivy* [Domestic Archives], 1995, no. 6, pp. 80–84 (in Russian).
28. Trubetskov D. I., Anikin V. M. Physicists at the quarter century anniversary of Saratov University. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2019, vol. 27, no. 3, pp. 99–106 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.18500/0869-6632-2019-27-3-99-106
29. Polak I. F. *Kurs obshchey astronomii*: *uchebnik dlya gos. un-tov i ped. in-tov*. 7-ye izd., pererab. [General astronomy course. Textbook for state universities and pedagogical institutes.7th ed., rewrite]. Moscow, Gostekhizdat Publ., 1955. 371 p. (in Russian).
30. Polak I. F. *Astronomiya: uchebnik dlya ped. tekhnikumov.* [Astronomy: textbook for pedagogical technical schools]. Moscow, Gos. ucheb.-ped. izd-vo, 1934. 143 p. (in Russian).
31. Polak I. F. *Obshchedostupnaya astronomiya* [Public Astronomy]. Moscow, Leningrad, Gostekhizdat Publ., 1946. 279 p. (in Russian).
32. Polak I. F., Smirnov M. N., Tsvetkov K. A. *Kurs sfericheskoy astronomii* [Spherical Astronomy Course]. Moscow, Leningrad, Gos. tekhn.-teor. izd-vo, 1933. 128 p. (in Russian).
33. Polak I. F. *Programma po obshchey astronomii (dlya fiz.-mat. fak. gos. un-tov)* [Program on General Astronomy (for Phys.-math. Faculties of State Univ.)]. Kiev, Izd-vo Kiyevskogo gos. un-ta imeni T. G. Shevchenko, 1947. 7 p. (Ministry of Higher Education of the USSR) (in Russian).
34. *Astronomicheskoye otdeleniye fizicheskogo fakul'teta MGU. GAISH. Istoriya* (Astronomical Part of the Physics Department of Moscow State University. SAI. History). Available at: http://www.sai.msu.ru/ao/history/ (accessed 2 February 2020) (in Russian).
35. Trubetskova I. A. University Universe of the principal G. K. Hvorostin: The birth and the death. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2017, vol. 25, no. 2, pp. 89–103 (in Russian). DOI : 10.18500/0869-6632-2017-25-2-89-103
36. Zhelezovsky B. E. Training of teachers: years and people. *Ocherki istorii fiziko-matematicheskogo obrazovaniya v Saratovskom universitete* [Essays on the history of physical and mathematical education at the University of Saratov. Total ed. by V. M. Anikin]. Saratov, Izd-vo Saratovskogo universiteta, 2019, pp. 129–136 (in Russian).
37. *Astronomicheskoye naslediye. Sozdaniye GAISH* (Astronomical heritage. Creation of SAI). Available at: http://heritage.sai.msu.ru/history/sai_history/sai2005_04.html (accessed 2 February 2020) (in Russian).
38. *Materialy po istorii astronomii* (Materials on the History of Astronomy). Available at: http://www.astro-cabinet.ru/library/raiir/russkie-astronomy-i-ih-raboty10.htm (accessed 2 February 2020) (in Russian).
39. Stepan V. E. Observations of meteors with binoculars. *Nauka i zhizn'* [Science and Life], 1941, no. 5, p. 13 (in Russian).
40. Anikin V. M. 65 years of Faculty of Physics. *Geteromagnitnaya mikroelektronika: sb. nauch. trudov* [Heteromagnetic microelectronics: collection of scientific proceedings. Ed. A. V. Lyashenko]. Saratov, Izd-vo Saratovskogo universiteta, 2011, iss. 9: Magnitoelektronika. Mikro- i nanostruktury. Prikladnyye aspekty. Problemy fizicheskogo obrazovaniya [Magnetoelectronics. Micro- and nanostructures. Applied aspects. Problems of physical education], pp. 4–16 (in Russian).
41. Anikin V. M. Physics at Saratov University. On the 100th anniversary of the Physics Institute and the 70th anniversary of the Faculty of Physics. *Geteromagnitnaya mikroelektronika: sb. nauch. trudov* [Heteromagnetic microelectronics: collection of scientific proceedings. Ed. A. V. Lyashenko]. Saratov, Izd-vo Saratovskogo universiteta, 2014, iss. 16: Geteromagnitnaya mikro- i nanoelektronika. Metodicheskiye aspekty fizicheskogo obrazovaniya [Heteromagnetic micro- and nanoelectronics. Methodological aspects of physical education], pp. 78–84 (in Russian).
42. Usanov D. A., Anikin V. M. Scientific and Educational Physical Schools in Saratov (on the 80th Anniversary

of the Saratov Region). *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2016, vol. 16, iss. 3, pp. 178–190 (in Russian). DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-3-178-190

43. Anikin V. M. The Faculty of Physics in the XXI Century. To the 70th Anniversary of Physical Faculty of Saratov State University. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2014, vol. 14, iss. 2, pp. 65–71 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.18500/1817-3020-2014-14-2-65-71
44. Anikin V. M. Afterword to the Anniversary of the Faculty of Physics of SSU. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2016, vol. 16, iss. 4, pp. 248–252 (in Russian). DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-4-248-252
45. Anikin V. M. Faculty of Physics of SSU: memorable dates. *Voprosy prikladnoy fiziki. Mezhvuz. nauch. sb.* [Problems of Applied Physics: Interuniversity Scientific Collection]. Saratov, Izd-vo Saratovskogo universiteta, 2015, iss. 22, pp. 3–7 (in Russian).
46. Yury Andreevich Sklyarov. Ed. by A. N. Chumachenko, D. A. Usanov. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Earth Sciences*, 2014, vol. 14, separate impression. 42 p. (in Russian).
47. Rytik A. P., Anikin V. M., Bogdanov M. B., Koronovsky A. A. Society of Astronomy Lovers of Saratov University. *Pervaya Vserossiyskaya konferentsiya po kosmicheskomu obrazovaniyu "Doroga v kosmos" (Moskva, 1–4 oktyabrya 2019 g.)* [The First All-Russian Conference on Space Education "The Road to Space" (Moscow, October 1–4, 2019)]. Moscow, Institut kosmicheskikh issledovaniy Rossiyskoy akademii nauk (IKI RAN), 2019, pp. 296–300 (in Russian).

Cite this article as:

Anikin V. M. Professor of Astronomy of Saratov State University Joseph Fedorovich Polak (1881–1954). *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2020, vol. 20, iss. 2, pp. 144–159 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-2-144-159

ПОДПИСКА

Подписка на 2020 год

Индекс издания в объединенном каталоге
«Пресса России» 36015, раздел 30
«Научно-технические издания.
Известия РАН. Известия вузов»

Журнал выходит 4 раза в год

Цена свободная

Оформить подписку онлайн можно
в интернет-каталоге «Пресса по подписке» (www.akc.ru)

Адрес Издательства
Саратовского университета (редакции):
410012, Саратов, Астраханская, 83
Тел.: +7 (845-2) 51-45-49, 52-26-89
Факс: +7 (845-2) 27-85-29
E-mail: izvestiya@info.sgu.ru

Адрес редколлегии серии:
410012, Саратов, Астраханская, 83,
СГУ имени Н. Г. Чернышевского,
физический факультет
Тел./факс: +7 (845-2) 51-14-30
E-mail: fizika.sgu@bk.ru
Website: http://fizika.sgu.ru