

УДК 535.3;535.135

**РАЗРАБОТКА ЛАЗЕРНО-ОПТИЧЕСКОГО,  
СПЕКТРАЛЬНОГО И НАУЧНО-УЧЕБНОГО ОБОРУДОВАНИЯ,  
НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ НА КАФЕДРЕ  
ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКИ И СПЕКТРОСКОПИИ  
БЕЛОРУССКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**Е. С. ВОРОПАЙ<sup>1)</sup>, И. М. ГУЛИС<sup>1)</sup>, Е. А. МЕЛЬНИКОВА<sup>1)</sup>, А. Л. ТОЛСТИК<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Описаны основные разработки в области лазерно-оптического приборостроения, создания новых материалов и технологий, выполненные на кафедре лазерной физики и спектроскопии в рамках государственных научно-технических программ. Отдельные работы проводились совместно с коллективами других подразделений БГУ и научных организаций. Созданы импульсный спектрофлуориметр для кинетических исследований в наносекундном диапазоне; модульный спектрометрический комплекс для учебных и научных применений (регистрация спектров поглощения, комбинационного рассеяния и эмиссионных); гиперспектрометр, обеспечивающий

**Образец цитирования:**

Воропай ЕС, Гулис ИМ, Мельникова ЕА, Толстик АЛ. Разработка лазерно-оптического, спектрального и научно-учебного оборудования, новых материалов и технологий на кафедре лазерной физики и спектроскопии Белорусского государственного университета. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2018;3:4–19.

**For citation:**

Voropay ES, Gulis IM, Melnikova EA, Tolstik AL. Designing of optical laser and spectral equipment for research and educational applications, development of new materials and technologies at the laser physics and spectroscopy department of the Belarusian State University. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2018;3:4–19. Russian.

**Авторы:**

**Евгений Семенович Воропай** – доктор физико-математических наук, профессор; профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета.

**Игорь Михайлович Гулис** – доктор физико-математических наук, профессор; профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета.

**Елена Александровна Мельникова** – кандидат физико-математических наук, доцент; доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета.

**Алексей Леонидович Толстик** – доктор физико-математических наук, профессор; заведующий кафедрой лазерной физики и спектроскопии физического факультета.

**Authors:**

**Eugeni S. Voropay**, doctor of science (physics and mathematics), full professor; professor at the department of laser physics and spectroscopy, faculty of physics.  
*voropay@bsu.by*

**Igor M. Gulis**, doctor of science (physics and mathematics), full professor; professor at the department of laser physics and spectroscopy, faculty of physics.  
*gulis@bsu.by*

**Elena A. Melnikova**, PhD (physics and mathematics), docent; associate professor at the department of laser physics and spectroscopy, faculty of physics.  
*melnikova@bsu.by*

**Alexei L. Tolstik**, doctor of science (physics and mathematics), full professor; head of the department of laser physics and spectroscopy, faculty of physics.  
*tolstik@bsu.by*

регистрацию спектров свечения от множества точек объекта; видеомикроспектрометрический комплекс, предназначенный для анализа спектральных характеристик протяженных объектов; аппаратно-программный комплекс цифровой диагностики для объективной оценки голографических элементов защиты ценных бумаг и документов; идентификатор дифракционных структур с кодирующими элементами, сочетающими голографическую степень защиты с информационными принципами штрихового кодирования; лабораторные комплексы по лазерной физике на базе лазера на иттрийалюминиевом гранате и лазеров с перестраиваемой по частоте генерацией, позволяющие изучить различные динамические режимы и методы перестройки длины волны; лабораторный комплекс по когерентной оптике и голографии, обеспечивающий запись фазовых голограмм с использованием лазеров с диодной накачкой; учебно-научный комплекс по изучению волоконно-оптических систем передачи и обработки информации; лазерно-оптический комплекс для подготовки специалистов в области микро- и нанопотоники. Созданы фотосенсибилизатор нового поколения, применяемый при фотодинамической терапии онкозаболеваний, на основе полиметиновых красителей и фотоактивируемые антимикробные препараты для фотодинамической антимикробной терапии инфекционных заболеваний. Разработана технология послойного анализа защитных и функциональных покрытий с субмикронным разрешением, а также технология производства защитных средств для документной бумаги.

**Ключевые слова:** лазерная физика; спектроскопия; голография; волоконно-оптические системы; спектрометры; гиперспектроскопия; защита ценных бумаг; фотосенсибилизатор.

## DESIGNING OF OPTICAL LASER AND SPECTRAL EQUIPMENT FOR RESEARCH AND EDUCATIONAL APPLICATIONS, DEVELOPMENT OF NEW MATERIALS AND TECHNOLOGIES AT THE LASER PHYSICS AND SPECTROSCOPY DEPARTMENT OF THE BELARUSIAN STATE UNIVERSITY

*E. S. VOROPAY<sup>a</sup>, I. M. GULIS<sup>a</sup>, E. A. MELNIKOVA<sup>a</sup>, A. L. TOLSTIK<sup>a</sup>*

*<sup>a</sup>Belarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus*

*Corresponding author: E. S. Voropay (voropay@bsu.by)*

This paper presents the main developments in the field of optical laser instrument making, the achievements in the creation of new materials and technologies realized at the laser physics and spectroscopy department within the scope of the state financed research and engineering programs. Some developments have been realized with the colleagues from other divisions of BSU and from other research organizations. The developments include a pulsed spectrofluorimeter for kinetic studies in the nanosecond range; modular spectrometric system for educational and research applications (recording of absorption, emission, and Raman spectra); hyperspectrometer offering recording of luminescence spectra from numerous points of the object; video microspectrometric system for analysis of the spectral characteristics of extended objects; hardware and software for digital diagnostics enabling assessment of the holographic protective elements used at securities and documents; identifier of diffraction structures with the coding elements which combine the principles of holographic protection and bar coding; several laboratory complexes for practical training: in laser physics – based on an yttrium aluminum garnet laser and on lasers with frequency-tunable generation enabling studies of different dynamic modes and methods for the wave tuning; in coherent optics and holography – for recording of phase holograms with the use of diode-pumped lasers; in fiber-optical data processing and transmission; in micro- and nanophotonics. A new-generation photosensitizer for photodynamic therapy of oncologic diseases has been developed on the basis of polymethine dyes; the photoactivated antimicrobial compounds for therapy of infectious diseases have been proposed. A submicron-resolution technology for layer-by-layer analysis of protective and functional coatings has been developed; a technology to produce protective elements for debenture papers has been proposed.

**Key words:** laser physics; spectroscopy; holography; fiber-optical systems; spectrometers; hyperspectroscopy; protection of securities; photosensitizer.

Кафедра лазерной физики и спектроскопии физического факультета БГУ была создана в 1953 г. (первоначальное название – кафедра спектрального анализа). На протяжении всей истории кафедры ее преподаватели и сотрудники активно и успешно занимались научной работой. На первом этапе развития основным научным направлением кафедры стало исследование ураниловых соединений. Эта тематика была инициирована А. Н. Севченко и продолжена Л. В. Володько, по предложению которого

позднее начались работы по жидкокристаллическим материалам. С 1970-х гг. на кафедре по инициативе А. С. Рубанова и А. В. Чалея развернулись работы по физике лазеров и динамической голографии. Исследования, проводившиеся в те годы, имели главным образом фундаментальный характер. Начиная с 2000-х гг. кафедра активно включилась в выполнение государственных научных и научно-технических программ. Проекты в рамках этих программ имели не только фундаментальную, но и в значительной степени прикладную направленность и были ориентированы на создание современных приборов, новых материалов и технологий. Такой подход к выбору тематики проектов позволил кафедре существенным образом совершенствовать учебно-научную базу, поскольку полученные приборы и аппаратура эффективно использовались в учебном процессе и научных исследованиях. Ниже кратко описаны основные разработки, выполненные на кафедре в последние годы.

### Импульсный спектрофлуориметр

В рамках государственных научно-технических программ одним из первых выполнено задание по разработке и изготовлению импульсного спектрофлуориметра: проект «Создать автоматизированный модульный информационно-измерительный комплекс для спектрально-кинетического люминесцентного анализа в экспериментальной физике и биологии» по ГНТП «Разработать и изготовить уникальные приборы и установки для научных исследований». Базовый образец спектрофлуориметра используется на кафедре для учебных целей и в научных исследованиях. Прибор разрабатывался совместно с сотрудниками лаборатории спектроскопии НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» БГУ (НИИ ПФП). Авторы и разработчики: Е. С. Воропай, М. П. Самцов, К. Н. Каплевский, А. Е. Радько, К. А. Шевченко.

В основу функционирования разработанного спектрометрического комплекса для спектрально-кинетических измерений в наносекундном временном диапазоне положен статистический одноквантовый метод временного анализа нестационарных потоков люминесценции, образующихся в результате импульсного возбуждения исследуемых объектов [1]. На основе этого метода осуществляется регистрация слабых и предельно слабых (на уровне единичных квантов) световых потоков люминесценции. Комплекс ориентирован на решение широкого круга задач спектрально-кинетического люминесцентного анализа. При разработке прибора использован ряд принципиально новых решений; соответствуя по своим характеристикам аналогичным изделиям зарубежных фирм (*Photochemical Research Associates Inc.*, Канада, и *Edinburg Instruments Ltd.*, Шотландия), он имеет значительно меньшую стоимость. Комплекс построен по модульному принципу (рис. 1), что позволяет совершенствовать его посредством замены отдельных модулей [2]. В качестве источника возбуждения в базовом варианте использована разработанная газоразрядная импульсная лампа, частота следования импульсов которой плавно регулируется [3; 4]. При необходимости через разрядный промежуток может прокачиваться воздух или азот. Длительность импульсов возбуждения по полувысоте в диапазоне от 200 до 500 нм составляет менее 1 нс, в диапазоне от 500 до 800 нм – около 2 нс, число фотонов за вспышку равно  $10^{11}$ – $10^{12}$ . В спектральном распределении излучения лампы выделяются две области: 250–450 нм (обусловленная в основном свечением газа) и 450–870 нм.

В спектрофлуориметре предусмотрены три основных режима измерения: регистрация кинетики затухания люминесценции; регистрация спектров люминесценции в определенном временном окне (мгновенных спектров); регистрация стационарных спектров флуоресценции (для более эффективной работы в данном режиме целесообразна замена импульсного источника возбуждения на непрерывный). Основные характеристики: спектральный диапазон возбуждения и регистрации 220–800 и 270–800 нм соответственно, временной диапазон 0,5–120,0 нс, минимальное время разрешения 0,2 нс.

Совместно с предприятием «ОПТРОН» разработанный прибор был освоен в производстве в виде малой серии и поставлен в ряд учебно-научных организаций страны.

### Модульный спектрометрический комплекс для учебных и научных применений

Спектрометрический комплекс разрабатывался по отраслевой научно-технической программе «Создать учебно-научные модульные комплексы для подготовки специалистов в области наукоемких, высокотехнологичных отраслей промышленности Республики Беларусь» совместно с лабораторией спектроскопии НИИ ПФП имени А. Н. Севченко БГУ (Е. С. Воропай, И. М. Гулис, К. Н. Каплевский, М. П. Самцов, А. Е. Радько, К. А. Шевченко).

Комплекс предназначен для постановки лабораторных практикумов студентов физических, химических, биологических, медицинских и инженерных специальностей по спектроскопии, лазерной физике и технике, аналитическим методам исследования и другим дисциплинам, требующим использования

спектроскопической аппаратуры [5; 6]. Возможно использование модулей комплекса при выполнении научно-исследовательских работ в указанных областях. Данные модули самостоятельно либо в различных комбинациях и сочетаниях могут образовывать (рис. 2 и 3):

- спектрометр для регистрации эмиссионных спектров различных источников (используется в зависимости от требований по спектральному разрешению, диапазону и габаритам), либо малогабаритный спектрометр с регистрацией на основе ПЗС, либо сверхкомпактный спектрометр с оптоволоконным вводом;
- спектрофотометр для измерения спектров поглощения (включает малогабаритный спектрометр с регистрацией на основе ПЗС и спектрофотометрический модуль);
- спектрофлуориметр с варьруемой длиной волны возбуждения (включает малогабаритный спектрометр с регистрацией на основе ПЗС и модуль возбуждения и светосбора люминесценции);
- спектрометр для регистрации комбинационного рассеяния (включает малогабаритный спектрометр с регистрацией на основе ПЗС и модуль комбинационного рассеяния (КР), состоящий из блока возбуждения и светосбора излучения КР, блока термостабилизированного полупроводникового лазера).

### Аппаратура для спектроскопии с пространственным разрешением

Гиперспектроскопия – область спектроскопии, изучающая возможность получения спектроскопической информации от множества точек исследуемого объекта. Информация сохраняется в виде спектрального гиперкуба, ставящего в соответствие каждому минимально разрешимому (квазиточечному) фрагменту объекта излучаемый им спектр. Некоторые области применения гиперспектрального анализа: медико-биологические исследования тканей и клеток, дистанционный мониторинг земной поверхности (геология, экология, сельское хозяйство), астрономические наблюдения.

Принципиально новые возможности для создания гиперспектральных приборов с улучшенными эксплуатационными параметрами открываются при использовании микроэлектромеханических систем, в частности пространственных модуляторов света с микрозеркальными матрицами. Это обосновывается как технологическими соображениями (серийно производятся матрицы мегапиксельных форматов с высокими скоростями переключения элементов и низким уровнем рассеянного света), так и функциональной гибкостью и удобством реконфигурирования устройств на основе микрозеркальных матриц.

Гиперспектрометр с микрозеркальной матрицей в качестве реконфигурируемой входной апертуры [7; 8] разработан сотрудниками кафедры лазерной физики и спектроскопии и лаборатории спектроскопии НИИ ПФП имени А. Н. Севченко БГУ в рамках ГНТП «Эталоны и научные приборы» (Е. С. Воропай, И. М. Гулис, А. Г. Купреев, К. Н. Каплевский, М. П. Самцов, А. Е. Радько, К. А. Шевченко).

Благодаря оригинальному конфигурационному решению при относительно небольших размерах прибора (рис. 4) получено спектральное разрешение не хуже 0,8 нм в диапазоне 400–900 нм при относительном отверстии 1 : 5. Прибор способен регистрировать как полный спектральный гиперкуб, так и одновременно спектры заранее выделенных областей объекта наблюдения. В спектрометре использована сферическая зеркальная оптика, что обеспечивает расширение диапазона на ультрафиолетовую и ближнюю инфракрасную области. Схема рассчитана с учетом минимизации aberrаций, обусловленных требованием достаточно большой светосилы, внеосевым прохождением излучения за счет наклонного падения диспергированных пучков на камерное зеркало в приборе с широким спектральным диапазоном, а также относительно большими размерами входной апертуры (микрозеркальной матрицы).

В результате в схеме с относительным отверстием 1 : 5 с выполненной коррекцией астигматизма достигаются размеры пятен рассеяния в фокальной плоскости камерного объектива до 40–50 мкм от всех точек входного поля размерами 11 × 8 мм, что обеспечивает хорошие изображающие возможности гиперспектрометра [9–11].

### Видеомикроспектрометрический комплекс

Комплекс (рис. 5) предназначен для анализа спектральных характеристик объектов большого размера со сложной неоднородной структурой с пространственным разрешением [12] и может использоваться в целях идентификации образцов в криминалистических применениях, в полиграфии, геологии, биологической и медицинской микроскопии (гистологии), а также для обучения студентов и специалистов современным методам мультizonальной (мультиспектральной) съемки и локальной спектроскопии.

Прибор разрабатывался сотрудниками лаборатории спектроскопии НИИ ПФП имени А. Н. Севченко БГУ и кафедры лазерной физики и спектроскопии в рамках ГНТП «Эталоны и научные приборы» (М. П. Самцов, А. Е. Радько, К. А. Шевченко, Л. С. Ляшенко, Д. С. Тарасов, Е. С. Воропай, И. М. Гулис, А. И. Серафимович, К. Н. Каплевский).

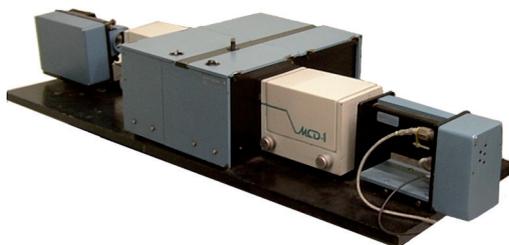


Рис. 1. Спектрофлуориметр  
 Fig. 1. Spectrofluorimeter

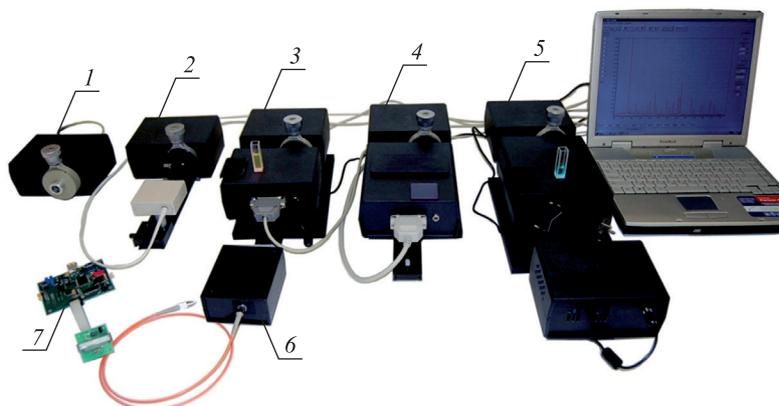


Рис. 2. Модульный спектрометрический комплекс для учебных и научных применений:  
 1 – малогабаритный спектрометр с регистрацией на основе ПЗС; 2 – малогабаритный спектрометр с тестовым источником; 3 – спектрофлуориметр с варьируемой длиной волны возбуждения; 4 – спектрофотометр для измерения спектров поглощения; 5 – спектрометр для регистрации комбинационного рассеяния; 6 – сверхкомпактный спектрометр с оптоволоконным вводом; 7 – ПЗС-камера в бескорпусном исполнении

Fig. 2. Modular spectrometric system for educational and research applications:  
 1 – compact spectrometer with CCD-based recording; 2 – compact spectrometer with a test sample; 3 – spectrofluorimeter with the varied excitation wavelength; 4 – spectrophotometer for measurements of absorption spectra; 5 – spectrometer for recording of Raman scattering; 6 – supercompact spectrometer with fiber-optic coupling; 7 – CCD-camera, discrete wafer form

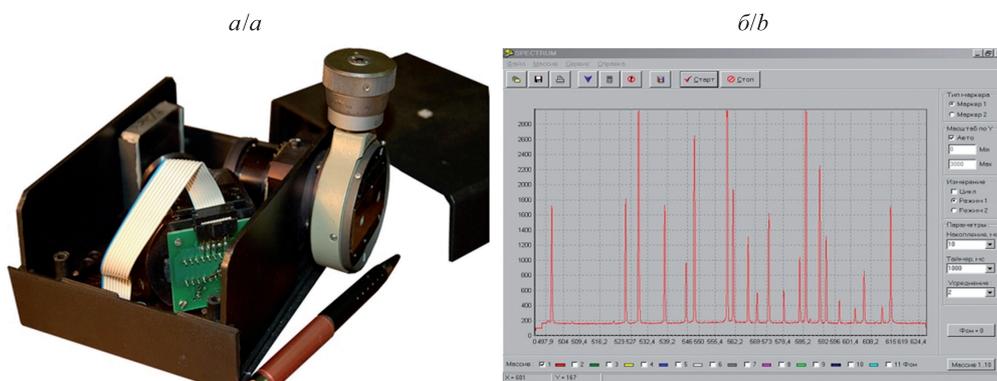


Рис. 3. Вид малогабаритного спектрометра на дифракционной решетке с регистрацией на ПЗС со снятой крышкой (а) и окно программы управления малогабаритным спектрометром (б)

Fig. 3. Appearance of a compact spectrometer with diffraction grating for CCD-based recording, removed cover (a) and a view of the control program window for the compact spectrometer (b)

Основные характеристики комплекса: размер исследуемых образцов  $300 \times 200$  мм, спектральный диапазон 400–950 нм, спектральное разрешение до 6 нм, увеличение до 250 раз, число спектральных полос в режиме мультizonальной съемки 12.

В 2015 г. разработка отмечена дипломом II степени с вручением серебряной медали в номинации «Лучший инновационный проект в области приборостроения» Петербургской технической ярмарки.

### **Аппаратно-программный комплекс цифровой диагностики для объективной оценки голографических элементов защиты ценных бумаг и документов**

Комплекс разрабатывался в рамках ГНТП «Технологии защиты и средства идентификации ценных бумаг, документов и продукции» (А. Л. Толстик, Е. А. Мельникова, Г. Д. Василенок, И. Н. Агишев, А. А. Казак).

Аппаратно-программный комплекс позволяет проводить измерения дифракционных характеристик рельефных голограмм с возможностью выделения отдельных компонент и измерения пространственного распределения дифракционной эффективности, а также контролировать качество голографической продукции в процессе производства (рис. 6) [13]. Основные характеристики комплекса: чувствительность системы измерения дифракционной эффективности 0,015 %; пространственное разрешение голографического дифрактометра 70 мкм; период контролируемых дифракционных решеток 0,5–3,0 мкм; скорость контроля в процессе тиснения голограмм 25 см/с. Аппаратно-программный комплекс внедрен в технологический процесс на ЗАО «Голографическая индустрия» и используется на этапах производства, включая запись голограмм на фоторезисте, контроль первичной мастер-матрицы, контроль параметров многопозиционной мастер-матрицы и рабочей матрицы, а также изготовление конечной продукции на этапе тиснения голографических элементов защиты.

### **Идентификатор дифракционных структур с кодирующими элементами**

В рамках ГНТП «Защита документов» на кафедре лазерной физики и спектроскопии разработаны принципиально новые средства контроля голографических изображений и идентификации кодограмм (А. Л. Толстик, Е. А. Мельникова, Г. Д. Василенок, И. Н. Агишев). Кодограммы представляют собой голографические элементы с совмещенным штрихкодом (рис. 7, а). Разработанная система на основе голографического штрихкода не имеет аналогов, при этом впервые удалось сочетать голографическую степень защиты с информационными принципами штрихового кодирования. Идентификатор кодограмм (рис. 7, б) изготовлен на основе ПЗС-линейки и имеет следующие характеристики: вид кодировки информации – Code 39, пространственное разрешение 100 мкм, размер контролируемых кодограмм не более  $14 \times 14$  мм.

На способ защиты и идентификации изделий с помощью штрихкода, идентификационную метку и идентификатор голографического штрихкода получены патенты Республики Беларусь. Идентификатор кодограмм используется в интересах Департамента государственных знаков Министерства финансов Республики Беларусь при изготовлении ценных бумаг и документов, внесен в Государственный реестр приборов для контроля подлинности ценных бумаг и документов и изготавливается по заказам предприятий, выпускающих голографические защитные элементы: ЗАО «Голографическая индустрия», РУП «Минская печатная фабрика» и др.

### **Лабораторный комплекс по лазерной физике на базе лазера на иттрийалюминиевом гранате**

Комплекс создан на основе разработанной совместно с белорусско-японским СП «ЛЮТИС ТИИ» базовой модели лазера на иттрийалюминиевом гранате LS-2132Y (рис. 8) и позволяет изучить различные динамические режимы работы, включая свободную генерацию, активную и пассивную модуляцию добротности и синхронизацию мод [14; 15]. Лабораторный комплекс разрабатывался по ГНТП «Лазерно-оптические системы и технологии» (А. Л. Толстик, Е. А. Мельникова, Г. Д. Василенок, И. Н. Агишев, В. А. Кононов, Н. Н. Васильев).

Основные характеристики лазерного излучения: длина волны излучения 1064 и 532 нм, энергия импульса в режиме свободной генерации до 300 мДж, модуляция добротности до 150 мДж, длительность импульса до 200 мкс (свободная генерация) и до 20 нс (модуляция добротности). Было изготовлено более 20 лазеров, которые поставлены в университеты Беларуси (Белорусский государственный университет, Белорусский национальный технический университет, Белорусский государственный педагогический

университет имени Максима Танка, Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины), а также зарубежных стран (Россия – 8 лазеров, Тайвань – 3, Испания – 1, Япония – 1), включая такие ведущие вузы, как Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Казанский государственный университет, Томский государственный университет, Санкт-Петербургский университет авиакосмического приборостроения, Кантабрийский университет и др.

По итогам Петербургской технической ярмарки 2012 г. лазер на иттрийалюминиевом гранате для специального практикума по лазерной физике и нелинейной оптике отмечен дипломом II степени с вручением серебряной медали в номинации «Лучший инновационный проект в области образовательных технологий». Комплекс учебного оборудования по лазерной физике в 2012 г. также отмечен премией имени А. Н. Севченко в номинации «Образование».

### **Лабораторный комплекс по когерентной оптике и голографии**

Лабораторный комплекс по когерентной оптике и голографии создан в рамках ГНТП «Оптех» (А. Л. Толстик, Е. А. Мельникова, В. В. Могильный, А. И. Станкевич, И. Н. Агишев). Особенностью комплекса является использование нового фотополимерного материала, позволяющего реализовать прямую запись (без постэкспозиционной обработки) фазовых голограмм и осуществлять голографическую запись с использованием компактных твердотельных YAG : Nd-лазеров с диодной накачкой, работающих на длине волны 532 нм (рис. 9) [16].

Разработка внедрена в производственный процесс НПРУП БГУ «Актив». Она поставлена в вузы Беларуси (Белорусский государственный университет, Гродненский государственный университет, Мозырский государственный педагогический университет имени И. П. Шамякина), а также в Федеральный университет технологий (г. Минна, Нигерия). По итогам Петербургской технической ярмарки 2012 г. комплекс был отмечен дипломом II степени с вручением серебряной медали в номинации «Лучший инновационный проект в области образовательных технологий».

### **Модульный научно-учебный лазерный комплекс с перестраиваемыми спектральными характеристиками генерации**

Комплекс разработан в соответствии с ГНТП «Эталоны и научные приборы» (А. Л. Толстик, Е. А. Мельникова, А. А. Казак, И. Н. Агишев) совместно с Институтом физики НАН Беларуси (В. А. Орлович, А. С. Грабчиков, Т. Ш. Эфендиев, В. И. Дашкевич, В. М. Катаркевич).

Созданный комплекс (рис. 10) предназначен для обучения студентов методам перестройки частоты лазерной генерации с применением лазера на красителе с дисперсионным резонатором, лазера с распределенной обратной связью (РОС) и лазера на вынужденном комбинационном рассеянии (ВКР) [17; 18]. Параметры генерации разработанных лазеров позволяют использовать их при проведении научных исследований в области лазерной физики и нелинейной оптики. Так, например, с помощью ВКР-лазера можно одновременно получать генерацию на шести длинах волн; спектральный диапазон перестройки частоты лазера на красителе не менее 100 нм, эффективность преобразования лазерного излучения до 25 %, минимальная ширина линии генерации для РОС-лазера 0,01 нм.

По итогам Петербургской технической ярмарки 2014 г. модульный научно-учебный лазерный комплекс с перестраиваемыми спектральными характеристиками генерации был отмечен дипломом II степени с вручением серебряной медали в номинации «Лучший инновационный проект в области образовательных технологий».

### **Учебно-научный комплекс по изучению волоконно-оптических систем передачи информации**

Комплекс разработан по отраслевой научно-технической программе «Создать учебно-научные модульные комплексы для подготовки специалистов в области наукоемких, высокотехнологичных отраслей промышленности Республики Беларусь» (А. Л. Толстик, Е. А. Мельникова, И. Н. Агишев, Г. Д. Василенок, И. А. Гончаренко, А. А. Казак). Данный комплекс (рис. 11) предназначен для обучения студентов современным информационным технологиям, основанным на оптической передаче и обработке информации [19; 20]. Разработка внедрена в производственный процесс НПРУП БГУ «Актив». В 2010 г. выполнен контракт с Федеральным университетом технологий по постановке лабораторного практикума.



Рис. 4. Гиперспектрометр (спектрометрический модуль и компьютер)  
Fig. 4. Hyperspectrometer (spectrometric block and computer)

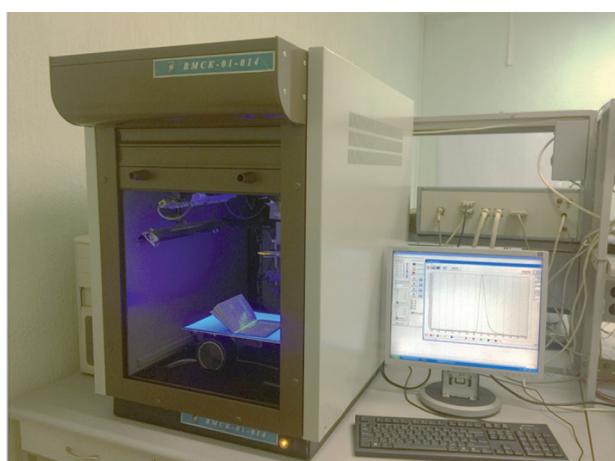


Рис. 5. Видеомикроспектрометрический комплекс  
Fig. 5. Video microspectrometric system

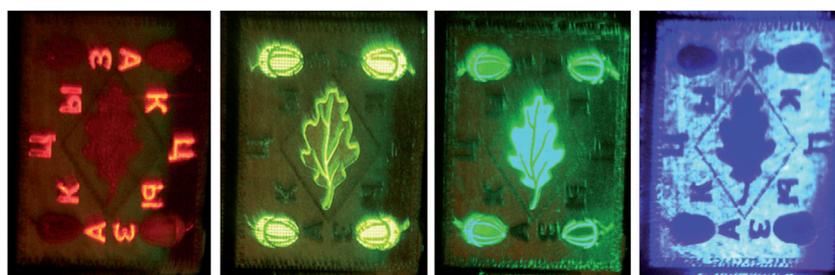
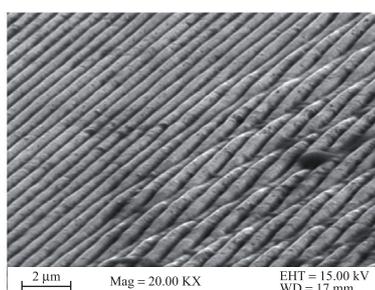
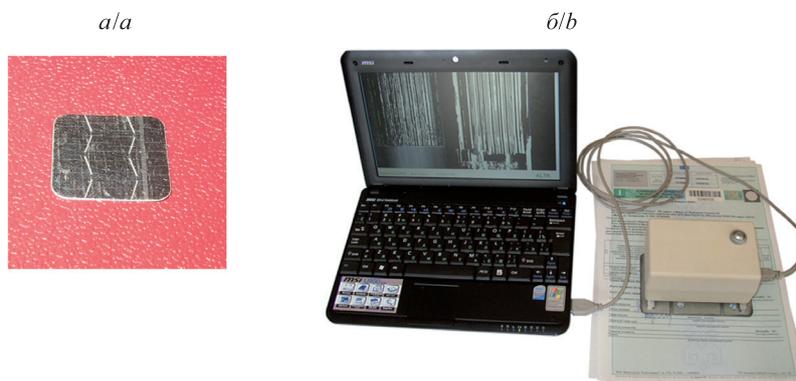


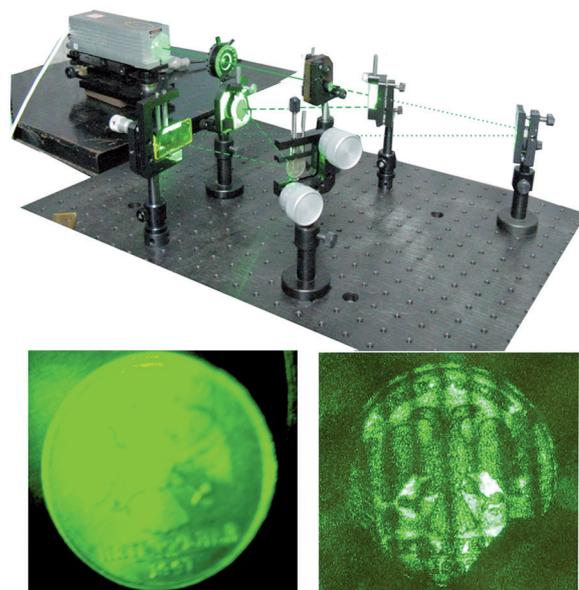
Рис. 6. Спектральная селекция комбинированных голографических изображений с использованием аппаратно-программного комплекса цифровой диагностики для объективной оценки показателей голографических элементов защиты  
Fig. 6. Spectral selection of combined holographic images with the use of the specially developed hardware and software for digital diagnostics



*Рис. 7.* Дифракционная структура с голографическими и цифровыми кодирующими элементами (а) и техническое средство идентификации кодограмм (б)  
*Fig. 7.* Diffraction structure with holographic and digital coding elements (a); technical means for identification of codegrams (b)



*Рис. 8.* Лабораторный комплекс по лазерной физике на базе лазера на иттрийалюминиевом гранате  
*Fig. 8.* Laboratory complex in laser physics based on an yttrium aluminum garnet laser



*Рис. 9.* Запись голограмм на фотополимерном материале и реализация метода голографической интерферометрии  
*Fig. 9.* Hologram recording on a photopolymeric material and realization of the holographic interferometry method



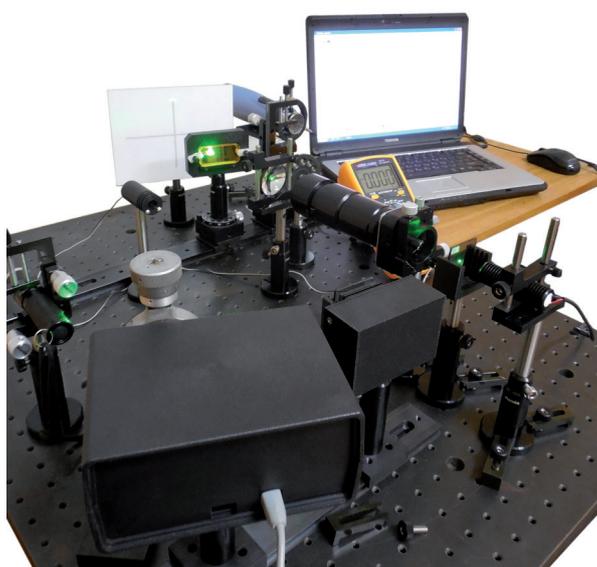
*Рис. 10.* Модульный научно-учебный лазерный комплекс с перестраиваемыми спектральными характеристиками генерации  
*Fig. 10.* Modular system with the tunable spectral characteristics of lasing for research and educational applications



*Рис. 11.* Оборудование комплекса по волоконной оптике  
*Fig. 11.* Equipment for practical works in fiber optics



*Рис. 12.* Лазер с диодной накачкой  
*Fig. 12.* Diode-pumped laser



*Рис. 13.* Лазерно-оптический комплекс для подготовки специалистов в области микро- и нанофотоники  
*Fig. 13.* Optical laser system used for training in the field of micro- and nanophotonics

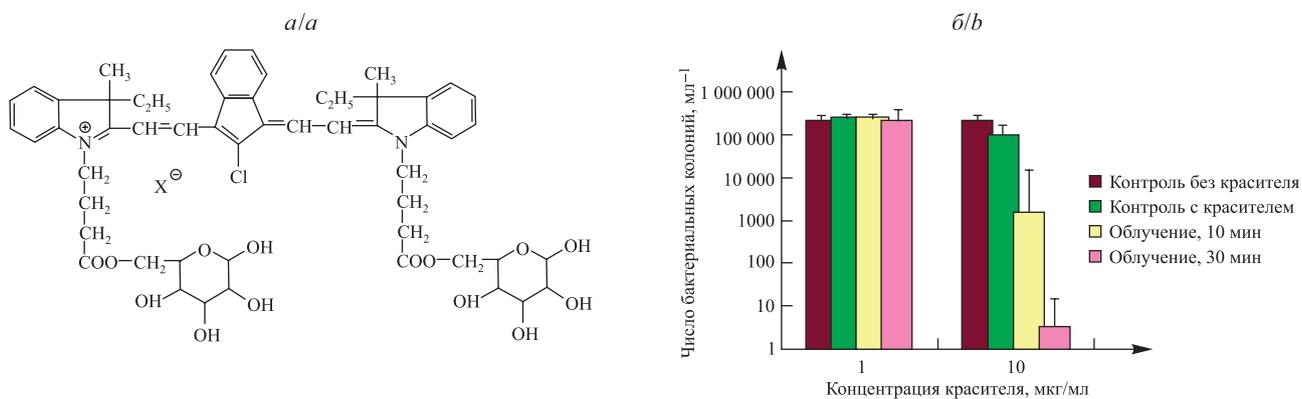


Рис. 14. Структурная формула (а) и результаты биологических испытаний (б) фотоактивируемого противомикробного препарата

Fig. 14. The structural formula (a) and the results of biological tests (b) with the use of a photoactivated antimicrobial agent

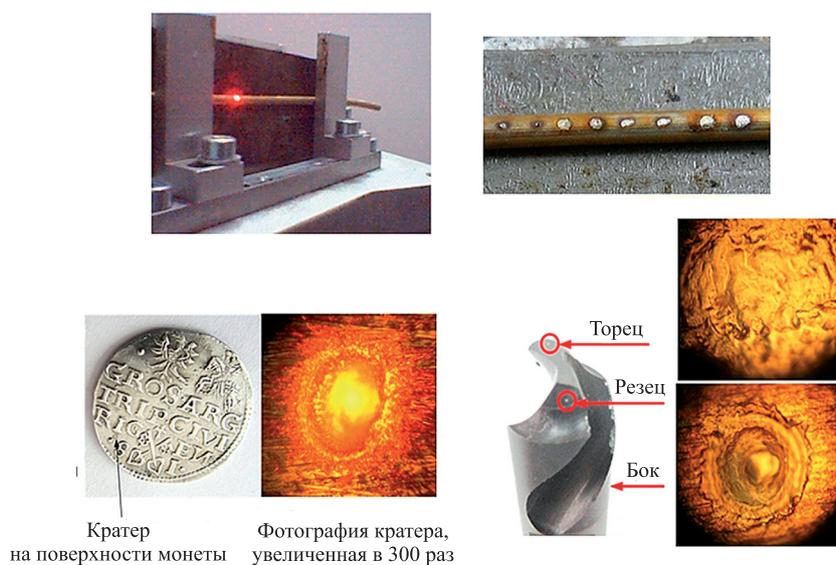


Рис. 15. Технология послойного анализа защитных и функциональных покрытий с субмикронным разрешением

Fig. 15. Technology of a layer-by-layer analysis of protective and functional coatings at the submicron-range resolution

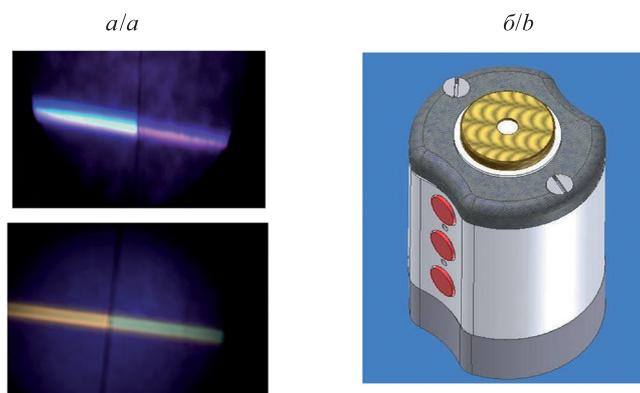


Рис. 16. Разделение цвета люминесцентного свечения отдельных участков волокна (а); малогабаритный поляризационный микроскоп (б)

Fig. 16. Color selection of luminescence emission at the particular sections of a fiber (a); small-size polarization microscope (b)

### Учебно-исследовательский модульный комплекс на основе лазера с диодной накачкой

Учебно-исследовательский комплекс (рис. 12) разработан в рамках ГНТП «Эталоны и научные приборы» (Е. А. Мельникова, А. Л. Толстик, И. В. Сташкевич, И. Н. Агишев). Он обеспечивает выполнение ряда лабораторных работ по изучению особенностей диодной накачки твердотельного лазера, получению режимов свободной генерации, пассивной модуляции добротности и внутриврезонаторной генерации второй гармоники. Параметры генерации разработанного лазера позволяют использовать его при проведении научных исследований в области лазерной физики и нелинейной оптики [21].

### Научно-учебный лазерно-оптический комплекс для подготовки специалистов в области микро- и нанофотоники

Комплекс разработан в соответствии с ГНТП «Эталоны и научные приборы» (А. Л. Толстик, Е. А. Мельникова, В. В. Могильный, А. В. Трофимова, А. И. Станкевич, И. Н. Агишев) и рассчитан на студентов и магистрантов классических и технических университетов. Лазерно-оптический комплекс (рис. 13) позволяет осуществить формирование и исследование дифракционных и волноводных микроструктур и демонстрирует возможности использования лазерно-оптических и голографических методов при создании наноструктурированных материалов [22]. Предназначен для обучения студентов и магистрантов, специализирующихся в области микрооптики и нанофотоники.

### Фотосенсибилизатор нового поколения для фотодинамической терапии онкозаболеваний

Сотрудниками кафедры лазерной физики и спектроскопии и лаборатории спектроскопии НИИ ПФП имени А. Н. Севченко БГУ совместно с сотрудниками РНПЦ онкологии и медицинской радиологии имени Н. Н. Александрова и Института биоорганической химии НАН Беларуси ведутся работы по созданию фотосенсибилизатора нового поколения для фотодинамической терапии онкозаболеваний. Препарат представляет собой трикарбоцианиновый краситель, химически связанный с полиэтиленгликолем [23; 24]. Наиболее эффективная его длинноволновая полоса поглощения (734 нм) расположена в области терапевтического окна [25; 26], что обеспечивает возможность лечения более глубоко расположенных опухолей по сравнению с применяемыми в настоящее время препаратами. Использование нового типа фотосенсибилизатора и переход в связи с этим к источникам возбуждения с длинами волн 667; 740; 750 и 780 нм позволили примерно в 10 раз улучшить обнаружительную способность и диагностировать области локализации опухолей на большей глубине (~20–30 мм). Некоторые характеристики фотосенсибилизатора:

Время максимального накопления в опухоли	60–120 мин
Индекс контрастности накопления (опухоль/здоровая ткань)	5–7
Концентрация 50 % выживаемости LD <sub>50</sub>	110–200 мг/кг
Терапевтическая концентрация в опытах <i>in vivo</i>	5–10 мг/кг
Глубина некрозов в опытах <i>in vivo</i>	20–30 мм
Излеченность в опытах <i>in vivo</i>	100 %

Основными разработчиками являются Е. С. Воропай, М. П. Самцов, А. П. Луговский, А. А. Луговский, Л. С. Ляшенко и соавторы патентов [24; 25]. В 2014 г. за разработку сенсибилизатора нового поколения на конкурсе лучших инновационных проектов и лучших научно-технических разработок года в Санкт-Петербурге получен диплом I степени с вручением золотой медали.

### Фотоактивируемые антимикробные препараты

В основе лечения множества инфекционных болезней лежит использование антибиотиков. После изобретения последних особенно опасным стало появление сопротивляемости широкого диапазона болезнетворных организмов лекарственным средствам, что приводит к росту инфекционных заболеваний, которые в прошлом были тривиальны для лечения. Кроме того, локализованные инфекции не следует лечить препаратами, влияющими на весь организм, если существует эффективная альтернатива. Проблема резистентности микроорганизмов к противомикробным лекарствам становится все более значимой как в клиническом, так и в экспериментальном плане.

Основной особенностью фотоактивируемой антибактериальной терапии является то, что при применении препарата, обладающего определенной антимикробной активностью, его эффективность значительно возрастает при воздействии светового излучения. В результате такого воздействия один и тот же терапевтический эффект обеспечивается при использовании значительно меньшей концентрации лекарственного средства. В последнее время на кафедре лазерной физики и спектроскопии совместно с лабораторией спектроскопии НИИ ПФП имени А. Н. Севченко БГУ ведется разработка препарата, активация которого может обеспечиваться излучением, приходящимся на область максимальной прозрачности биотканей, поскольку в этом случае есть возможность воздействовать на очаги инфекции, расположенные в глубине биоткани [27; 28].

Проведено изучение противомикробной активности симметричных трикарбоцианиновых красителей, содержащих в качестве гетероциклических концевых групп 2-хинолино-, 4-хинолино- и индолениновые циклы как в отношении тест-микробов, так и в отношении клинических изолятов. Было установлено, что исследуемые соединения (структурная формула одного из них приведена на рис. 14, *a*) являются эффективными препаратами для фотоактивируемой антибактериальной терапии. Синтезированное соединение характеризуется высокой растворимостью в водной и водно-спиртовой среде, выраженной антистафилококковой и противогрибковой активностью при воздействии лазерного излучения ближнего инфракрасного диапазона, и перспективно для применения в фотоактивируемой антимикробной терапии.

Экспериментальные данные биологических испытаний представлены на рис. 14, *б*. Видно, что при концентрации 10 мкг/мл при облучении в течение 30 мин обеспечивается практически полное подавление бактериальных колоний (их число уменьшается в  $2 \cdot 10^4$  раз).

Работа выполнена сотрудниками кафедры лазерной физики и спектроскопии и лаборатории спектроскопии НИИ ПФП имени А. Н. Севченко БГУ совместно с сотрудниками РНПЦ эпидемиологии и микробиологии – соавторами патентов [28; 29].

В 2017 г. за созданный фотоактивируемый антибактериальный препарат на конкурсе лучших инновационных проектов и лучших научно-технических разработок года в Санкт-Петербурге получен диплом II степени с вручением серебряной медали.

### **Технология послойного анализа защитных и функциональных покрытий с субмикронным разрешением методом двухимпульсной лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии на основе лазерного двухимпульсного спектрометра LSS-1 (ЛОТИС ТИИ)**

Разработана технология лазерного микроанализа функциональных и защитных покрытий с субмикронным разрешением (А. П. Зажогин, К. Ф. Ермалицкая, Е. С. Воропай) (рис. 15). Вариацией плотности мощности посредством дефокусировки обеспечивается изменение толщины слоя [30; 31].

Основные параметры: толщина анализируемого слоя 0,3–3,0 мкм; диаметр кратера на поверхности 50–200 мкм; чувствительность анализа до  $10^{-4}$ ; время анализа менее 1 мин; размер шага 10–15 нм. Важной особенностью является отсутствие необходимости пробоподготовки.

### **Технология производства защитных средств для документной бумаги**

Разработано и создано защитное средство высокого уровня для ценных бумаг на основе нового поколения криптометок – люминесцентных волокон с существенно усложненными характеристиками люминесцентного свечения, воспроизведение (подделка) которых представляется затруднительным и маловероятным (Е. С. Воропай, И. М. Гулис, И. Г. Гулис, А. И. Серафимович).

Продукция представляет собой указанные волокна, предназначенные для внедрения по обычной технологии в бумажную массу. Они позволяют получить уверенно обнаруживаемое разделение цвета люминесцентного свечения отдельных участков волокна (рис. 16, *a*) при визуальном наблюдении в разработанном малогабаритном поляризационном микроскопе (рис. 16, *б*) с полем зрения, разделенным на участки, отвечающие различным ориентациям электрического вектора пропускаемого излучения (поляризационное цветоразделение).

На технологию защиты получен евразийский патент [32]. Выпуск люминесцентных волокон с поляризационно-контролируемым чередованием цвета свечения организован на базе ПО «Химволокно» (г. Светлогорск). Бумага документная с криптометками изготавливается на УП «Бумажная фабрика» Гознака, объем выпуска 1500 т в год.

На конкурсе лучших инновационных проектов и лучших научно-технических разработок 2016 г. в Санкт-Петербурге получен диплом I степени с вручением золотой медали.

## Библиографические ссылки

1. Воропай ЕС, Самцов МП, Каплевский КН, Радько АЕ, Шевченко АК. Импульсный спектрофлуориметр наносекундного диапазона. *Вестник БГУ. Серия 1, Физика. Математика. Информатика*. 2002;3:7–13.
2. Воропай ЕС, Ермалицкий ФА, Каплевский КН, Радько АЕ. Компактный электронный блок для одноквантовых измерений кинетики свечений в диапазоне 0,1 нс – 100 мкс. *Приборы и техника эксперимента*. 2016;4:156–157. DOI: 10.7868/S0032816216040157.
3. Воропай ЕС, Дмитриев СМ, Ермалицкий ФА. Интенсивная субнаносекундная газоразрядная лампа для флуорометрии. *Приборы и техника эксперимента*. 1985;3:231.
4. Воропай ЕС, Самцов МП, Радько АЕ, Шевченко КА, Ляшенко ЛС, авторы; Белорусский государственный университет, правообладатель. Устройство для создания импульсов света наносекундной длительности. Беларусь U 2808. 1 марта 2006.
5. Воропай ЕС, редактор. *Спектральные приборы для аналитических применений. Перспективные разработки*. Минск: БГУ; 2005. 196 с.
6. Воропай ЕС, Гулис ИМ, Комяк АИ, Толстик АЛ, Чалей АВ. *Спектроскопия и лазерная физика в БГУ. Кафедре лазерной физики и спектроскопии 60 лет*. Минск: БГУ; 2013. 232 с.
7. Воропай ЕС, Гулис ИМ, Купреев АГ, Костюкевич АГ. Перспективные оптические схемы гиперспектрометров и мультиобъектных спектрометров. В: *Приборостроение-2010. Материалы III Международной научно-технической конференции; 10–12 ноября 2010 г.; Минск, Беларусь*. Минск: БНТУ; 2010. с. 46–47.
8. Воропай ЕС, Гулис ИМ, Купреев АГ, Каплевский КН, Костюкевич АГ, Радько АЕ и др. Мультиобъектный спектрометр с микрозеркальной матрицей. *Журнал прикладной спектроскопии*. 2010;77(2):305–312.
9. Воропай ЕС, Гулис ИМ, Купреев АГ. Метод коррекции астигматизма в спектральных приборах с помощью наклонной плоскопараллельной пластинки. *Вестник БГУ. Серия 1, Физика. Математика. Информатика*. 2007;3:12–18.
10. Воропай ЕС, Гулис ИМ, Купреев АГ, авторы; Белорусский государственный университет, правообладатель. Спектрометр с коррекцией астигматизма. Беларусь 13450. 26 апреля 2010.
11. Воропай ЕС, Гулис ИМ, Купреев АГ. Коррекция астигматизма светосильного дисперсионного спектрометра. *Журнал прикладной спектроскопии*. 2008;75(1):143–148.
12. Воропай ЕС, Каплевский КН, Самцов МП, Гулис ИМ, Серафимович АИ, Шевченко КА и др. Лазерный видео-микроспектрометрический комплекс для анализа характеристик пространственно сложных объектов. В: *Приборостроение-2013. Материалы VI Международной научно-технической конференции; 20–22 ноября 2013 г.; Минск, Беларусь*. Минск: БНТУ; 2013. с. 61–63.
13. Танин ЛВ, Моисеенко ПВ, Бобореко АГ, Толстик АЛ, Мельникова ЕА, Василенок ГД и др. Аппаратно-программный комплекс цифровой диагностики для объективной оценки показателей голографических элементов защиты. В: *HOLOEXPO-2009. Сборник трудов VI Международной конференции; 1–2 июля 2009 г.; Киев, Украина*. Киев: [издатель неизвестен]; 2009. с. 6–10.
14. Агишев ИН, Мельникова ЕА, Толстик АЛ. Базовая модель лазера для специального практикума по лазерной физике и нелинейной оптике. В: *Современный физический практикум. Труды VIII Международной учебно-методической конференции; 22–24 июня 2004 г.; Москва, Россия*. Москва: [издатель неизвестен]; 2004. с. 184.
15. Толстик АЛ, Мельникова ЕА, Васильев НН, Агишев ИН. Учебно-научные лабораторные комплексы по лазерной физике. *Вестник БГУ. Серия 1, Физика. Математика. Информатика*. 2013;1:3–10.
16. Мельникова ЕА, Толстик АЛ, Мармыш ДН, Могильный ВВ, Станкевич АИ. Фотополимерные материалы в учебном практикуме по голографии. В: *HOLOEXPO-2009. Сборник трудов VI Международной конференции; 1–2 июля 2009 г.; Киев, Украина*. Киев: [издатель неизвестен]; 2009. с. 188–191.
17. Агишев ИН, Казак АА, Толстик АЛ. Перестраиваемые лазеры на красителях в лабораторном практикуме. В: *Физика в системе современного образования. Материалы XIII Международной конференции; 1–4 июня 2015 г.; Санкт-Петербург, Россия*. Санкт-Петербург: РГПУ имени А. И. Герцена; 2015. с. 33.
18. Казак АА, Толстик АЛ. Перестраиваемые лазеры на основе вынужденного комбинационного рассеяния в лабораторном практикуме. В: *Физика в системе современного образования. Материалы XIII Международной конференции; 1–4 июня 2015 г.; Санкт-Петербург, Россия*. Санкт-Петербург: РГПУ имени А. И. Герцена; 2015. с. 98.
19. Толстик АЛ, Агишев ИН, Мельникова ЕА. Лабораторный комплекс по лазерной физике и волоконной оптике. В: *Физика в системе современного образования. Материалы IX Международной конференции; 4–8 июня 2007 г.; Санкт-Петербург, Россия*. Санкт-Петербург: РГПУ имени А. И. Герцена; 2007. Том 1. с. 146–149.
20. Tolstik AL, Melnikova EA, Vasilenak ND, Agishev IN. Laboratory works to study fiberoptic communication and processing systems. *Photonics, Devices and Systems III*. 2006;6180:2G-1–2G-5.
21. Мельникова ЕА, Назаров СА, Толстик АЛ. Твердотельный Nd : YAG лазер с диодной накачкой в специальном физическом практикуме. В: *Современные информационные технологии в системе научного и учебного эксперимента: опыт, проблемы, перспективы. Материалы III Международной научно-методической конференции; 14–15 мая 2015 г.; Гродно, Беларусь*. Гродно: ГрГУ; 2015. с. 9092.
22. Агишев ИН, Мельникова ЕА, Толстик АЛ. Научно-учебный лазерно-оптический комплекс для подготовки специалистов в области микро- и нанопотоники. В: *Физика в системе современного образования. Материалы XIV Международной научной конференции; 17–22 сентября 2017 г.; Ростов-на-Дону, Россия*. Ростов-на-Дону: ДГТУ; 2017. с. 40–43.
23. Воропай ЕС, Самцов МП, Мельников ДГ, Ляшенко ЛС, Луговский АА, Истомин ЮП. Спектрально-люминесцентные свойства индотрикарбонацианинового красителя в биотканях. *Журнал прикладной спектроскопии*. 2010;77(3):438–444.
24. Самцов МП, Луговский АП, Воропай ЕС, Петров ПТ, Луговский АА, Демид ДИ, Ляшенко ЛС, Александрова ЕН, Истомин ЮП, авторы; Белорусский государственный университет, правообладатель. Фотосенсибилизатор для фотодинамической терапии злокачественных опухолей. Беларусь 15767. 30 декабря 2012.
25. Самцов МП, Луговский АП, Луговский АА, Петров ПТ, Воропай ЕС, Истомин ЮП, Каплевский КН, Демид ДИ, Тарасов ДС, авторы; Белорусский государственный университет, НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета, правообладатели. Модифицированный полиэтиленгликолем водорастворимый фотосенсибилизатор для фотодинамической терапии злокачественных опухолей. Беларусь 21252. 30 августа 2017.

26. Воропай ЕС, Самцов МП, Петров ПТ. Перспективные фотосенсибилизаторы для фотодинамической лазерной терапии. *ARS MEDICA*. 2012;11(66):89–93.
27. Lugovskii A, Samtsov M, Kaplevskiy K, Petrov P, Voropay E, Tarasau D, et al. Istomin Novel indotricarbocyanine dyes covalently bonded to polyethylene glycol for theranostics. *Journal of Photochemistry and Photobiology A*. 2016;316:31–36.
28. Титов ЛП, Ермакова ТС, Самцов МП, Луговский АП, Мельников ДГ, Луговский АА, Воропай ЕС, Ляшенко ЛС, авторы; государственное учреждение «Республиканский научно-практический центр эпидемиологии и микробиологии», Белорусский государственный университет, правообладатели. Активируемое инфракрасным светом средство подавления стафилококковой и грибковой активности. Беларусь 15152. 30 декабря 2011.
29. Самцов МП, Луговский АП, Луговский АА, Ляшенко ЛС, Воропай ЕС, Ермакова ТС, Титов ЛП, авторы; Белорусский государственный университет, правообладатель. Водорастворимый цианиновый краситель в качестве фотоактивного анти-микробного препарата. Беларусь 18028. 30 июня 2011.
30. Ласковнев АП (редактор), Иванов ЮФ, Петрикова ЕА, Коваль НН, Углов ВВ, Черенда НН и др. *Модификация структуры и свойств эвтектического селенида электронно-ионно-плазменной обработкой*. Минск: Беларуская навука; 2013. 287 с.
31. Воропай ЕС, Ермалицкая КФ, Зажогин АП. Двухимпульсная лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия бронзовых сплавов и покрытий. *Журнал прикладной спектроскопии*. 2010;77(2):165–172.
32. Воропай ЕС, Гулис ИМ, Гулис ИГ, Серафимович АИ, Гореленко АЯ, Плипка СП, Корочкин ЛС, Губарева ЕГ, авторы; республиканское научно-техническое унитарное предприятие «Криптотех» Департамента государственных знаков Министерства финансов Республики Беларусь (РУП «Криптотех» Гознака), Белорусский государственный университет, правообладатели. Способ защиты и идентификации документов. Евразийский патент 200700864. 2 апреля 2007.

## References

1. Voropay ES, Samtsov MP, Kaplevskii KN, Rad'ko AE, Shevchenko AK. Nanosecond-range pulsed spectrofluorimeter. *Vestnik BGU. Seriya 1, Fizika. Matematika. Informatika*. 2002;3:7–13. Russian.
2. Voropay ES, Ermalitsky FA, Kaplevskii KN, Rad'ko AE. Kompaktnyi elektronnyi blok dlya odnokvantovykh izmerenii kinetiki svechenii v diapazone 0.1 ns – 100 mks [The compact electronic block for single-quantum measurements of luminescence kinetics in the range 0.1 ns – 100 μs]. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and experimental techniques]. 2016;4:156–157. Russian. DOI: 10.7868/S0032816216040157.
3. Voropay ES, Dmitriev SM, Ermalitsky FA. Intensivnaya subnanosekundnaya gazorardnaya lampa dlya fluorometrii [High-intensity subnanosecond discharge lamp for fluorometry]. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and experimental techniques]. 1985;3:231. Russian.
4. Voropay ES, Samtsov MP, Rad'ko AE, Shevchenko KA, Lyashenko LS, authors; Belarusian State University, assignee. The device to generate nanosecond light pulses. Belarus U 2808. 2006 March 1. Russian.
5. Voropay ES, editor. *Spektral'nye pribory dlya analiticheskikh primenenii. Perspektivnye razrabotki* [Spectral devices for analytical applications. Advanced developments]. Minsk: BSU; 2005. 196 p. Russian.
6. Voropay ES, Gulis IM, Komyak AI, Tolstik AL, Chalei AV. *Spektroskopiya i lazernaya fizika v BGU. Kafedre lazernoi fiziki i spektroskopii 60 let* [Spectroscopy and laser physics at BSU. The 60<sup>th</sup> anniversary of the laser physics and spectroscopy department]. Minsk: BSU; 2013. 232 p. Russian.
7. Voropay ES, Gulis IM, Kupreev AG, Kostyukevich AG. Perspektivnye opticheskie skhemy giperspektrometrov i mul'tiob'ektnykh spektrometrov [Advanced optical schemes of hyperspectrometers and multiobject spectrometers]. In: *Priboostroenie-2010. Materialy III Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii; 10–12 noyabrya 2010 g.; Minsk, Belarus'* [Instrument making-2010. Proceedings of the III International science and technology conference; 2010 November 10–12; Minsk, Belarus]. Minsk: BNTU; 2010. p. 46–47. Russian.
8. Voropay ES, Gulis IM, Kupreev AG, Kaplevskii KN, Kostyukevich AG, Rad'ko AE, et al. Multiobject spectrometer with the micromirror matrix. *Journal of Applied Spectroscopy*. 2010;77(2):305–312. Russian.
9. Voropay ES, Gulis IM, Kupreev AG. The astigmatism correction method in spectral devices using a tilted plane-parallel plate. *Vestnik BGU. Seriya 1, Fizika. Matematika. Informatika*. 2007;3:12–18. Russian.
10. Voropay ES, Gulis IM, Kupreev AG, authors; Belarusian State University, assignee. The spectrometer with astigmatism correction. Belarus 13450. 2010 April 26. Russian.
11. Voropay ES, Gulis IM, Kupreev AG. Astigmatism correction of a high-transmission dispersive spectrometer. *Journal of Applied Spectroscopy*. 2008;75(1):143–148. Russian.
12. Voropay ES, Kaplevskii KN, Samtsov MP, Gulis IM, Serafimovich AI, Shevchenko KA, et al. Lazernyi video-mikrospektrometricheskii kompleks dlya analiza kharakteristik prostranstvenno slozhnykh ob'ektov [Laser video spectrometric system to analyze the characteristics of spatially complex objects]. In: *Priboostroenie-2013. Materialy VI Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii; 20–22 noyabrya 2013 g.; Minsk, Belarus'* [Instrument making-2013. Proceedings of the VI International science and technology conference; 2013 November 20–22; Minsk, Belarus]. Minsk: BNTU; 2013. p. 61–63. Russian.
13. Tanin LV, Moiseenko PV, Boboreko AG, Tolstik AL, Melnikova EA, Vasilenak HD, et al. Apparato-programmnyi kompleks tsifrovoi diagnostiki dlya ob'ektivnoi otsenki pokazatelei golograficheskikh elementov zashchity [Hardware and software for digital diagnostics of the objective estimates of holographic protection elements]. In: *HOLOEXPO-2009. Sbornik trudov VI Mezhdunarodnoi konferentsii; 1–2 iyulya 2009 g.; Kiev, Ukraina* [HOLOEXPO-2009. Collection of materials VI International conference; 2009 July 1–2; Kiev, Ukraine]. Kiev: [publish unknow]; 2009. p. 6–10. Russian.
14. Agishev IN, Melnikova EA, Tolstik AL. Bazovaya model' lazera dlya spetsial'nogo praktikuma po lazernoi fizike i nelineinoi optike [The basic model of a laser for specialized laboratory works in laser physics and nonlinear optics]. In: *Sovremennyyi fizicheskii praktikum. Trudy VIII Mezhdunarodnoi uchebno-metodicheskoi konferentsii; 22–24 iyunya 2004 g.; Moskva, Rossiya* [Current state of physical practical works. Collected papers of the VIII International practical and methodological conference; 2004 June 22–24; Moscow, Russia]. Moscow: [publish unknow]; 2004. p. 184. Russian.
15. Tolstik AL, Melnikova EA, Vasiliev NN, Agishev IN. Laboratory systems in laser physics for educational and research applications. *Vestnik BGU. Seriya 1, Fizika. Matematika. Informatika*. 2013;1:3–10. Russian.

16. Melnikova EA, Tolstik AL, Marmysh DN, Mahilny UV, Stankevich AI. Fotopolimernye materialy v uchebnom praktikume po golografii [Photopolymeric materials used for practical works in holography]. In: *HOLOEXPO-2009. Sbornik trudov VI Mezhdunarodnoi konferentsii; 1–2 iyulya 2009 g.; Kiev, Ukraina* [HOLOEXPO-2009. Collection of materials VI International conference; 2009 July 1–2; Kiev, Ukraine]. Kiev: [publish unknow]; 2009. p. 188–191. Russian.
17. Agishev IN, Kazak AA, Tolstik AL. Perestraivaemye lazery na krasitelyakh v laboratornom praktikume [Tunable dye lasers for laboratory works]. In: *Fizika v sisteme sovremennogo obrazovaniya. Materialy XIII Mezhdunarodnoi konferentsii; 1–4 iyunya 2015 g.; Sankt-Peterburg, Rossiya* [Physics in a system of modern education. Proceedings of the XIII International conference; 2015 June 1–4; Saint Petersburg, Russia]. Saint Petersburg: A. I. Herzen University; 2015. p. 33. Russian.
18. Kazak AA, Tolstik AL. Perestraivaemye lazery na osnove vynuzhdenno kombinatsionnogo rasseyaniya v laboratornom praktikume [Tunable lasers based on stimulated Raman scattering for laboratory works]. In: *Fizika v sisteme sovremennogo obrazovaniya. Materialy XIII Mezhdunarodnoi konferentsii; 1–4 iyunya 2015 g.; Sankt-Peterburg, Rossiya* [Physics in a system of modern education. Proceedings of the XIII International conference; 2015 June 1–4; Saint Petersburg, Russia]. Saint Petersburg: A. I. Herzen University; 2015. p. 98. Russian.
19. Tolstik AL, Agishev IN, Melnikova EA. Laboratornyi kompleks po lazernoi fizike i volokonnoi optike [Laboratory complex in laser physics and fiber optics]. In: *Fizika v sisteme sovremennogo obrazovaniya. Materialy IX Mezhdunarodnoi konferentsii; 4–8 iyunya 2007 g.; Sankt-Peterburg, Rossiya* [Physics in a system of modern education. Proceedings of the IX International conference; 2007 June 4–8; Saint Petersburg, Russia]. Saint Petersburg: A. I. Herzen University; 2007. Volume 1. p. 146–149. Russian.
20. Tolstik AL, Melnikova EA, Vasilenak HD, Agishev IN. Laboratory works to study fiberoptic communication and processing systems. *Photonics, Devices and Systems III*. 2006;6180:2G-1–2G-5.
21. Melnikova EA, Nazarov SA, Tolstik AL. Tverdotel'nyi Nd : YAG lazer s diodnoi nakachkoi v spetsial'nom fizicheskom praktikume [Solid-state diode-pumped Nd : YAG laser for specialized practical works in physics]. In: *Sovremennyye informatsionnyye tekhnologii v sisteme nauchnogo i uchebnogo eksperimenta: opyt, problemy, perspektivy. Materialy III Mezhdunarodnoi nauchno-metodicheskoi konferentsii; 14–15 maya 2015 g.; Grodno, Belarus* [Modern information technologies in a system of research and educational experiments: experience, problems, prospects. Proceedings of the III International scientific and methodological conference; 2015 May 14–15; Grodno, Belarus]. Grodno: Grodno University; 2015. p. 9092. Russian.
22. Agishev IN, Melnikova EA, Tolstik AL. Nauchno-uchebnyi lazerno-opticheskii kompleks dlya podgotovki spetsialistov v oblasti mikro- i nanofotoniki [Optical laser complex for research and educational applications in the field of micro- and nanophotonics]. In: *Fizika v sisteme sovremennogo obrazovaniya. Materialy XIV Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii; 17–22 sentyabrya 2017 g.; Rostov-na-Donu, Rossiya* [Physics in a system of modern education. Papers of the XIV International scientific conference; 2017 September 17–22; Rostov-on-Don, Russia]. Rostov-on-Don: DSTU; 2017. p. 40–43. Russian.
23. Voropay ES, Samtsov MP, Melnikov DG, Lyashenko LS, Lugovsky AA, Istomin YuP. Spectral and luminescent properties of indotricarbocyanine dye in biotissues. *Journal of Applied Spectroscopy*. 2010;77(3):438–444. Russian.
24. Samtsov MP, Lugovsky AP, Voropay ES, Petrov PT, Lugovsky AA, Demid DI, Lyashenko LS, Aleksandrova EN, Istomin YuP, authors; Belarusian State University, assignee. The photosensitizer for photodynamic therapy of malignant tumors. Belarus 15767. 2012 December 30. Russian.
25. Samtsov MP, Lugovsky AP, Lugovsky AA, Petrov PT, Voropay ES, Istomin YuP, Kaplevskii KN, Demid DI, Tarasov DS, authors; Belarusian State University, A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of the Belarusian State University, assignees. The polyethylene glycol modified water-soluble photosensitizer for photodynamic therapy of malignant tumors. Belarus 21252. 2017 August 30. Russian.
26. Voropay ES, Samtsov MP, Petrov PT. Perspektivnyye fotosensibilizatory dlya fotodinamicheskoi lazernoi terapii [Promising photosensitizers for photodynamic laser therapy]. *ARS MEDICA*. 2012;11(66):89–93. Russian.
27. Lugovski A, Samtsov M, Kaplevsky K, Petrov P, Voropay E, Tarasau D, et al. Istomin Novel indotricarbocyanine dyes covalently bonded to polyethylene glycol for theranostics. *Journal of Photochemistry and Photobiology A*. 2016;316:31–36.
28. Titov LP, Ermakova TS, Samtsov MP, Lugovsky AP, Melnikov DG, Lugovsky AA, Voropay ES, Lyashenko LS, authors; The Republican Research and Practical Center for Epidemiology and Microbiology, Belarusian State University, assignees. The red light activated agent to suppress staphylococcus and fungal activity. Belarus 15152. 2011 December 30. Russian.
29. Samtsov MP, Lugovsky AP, Lugovsky AA, Lyashenko LS, Voropay ES, Ermakova TS, Titov LP, authors; Belarusian State University, assignee. The water-soluble cyanine dye as a photoactive antimicrobial agent. Belarus 18028. 2011 June 30. Russian.
30. Laskovnev AP (editor), Ivanov YuF, Petrikova EA, Koval NN, Uglov VV, Cherenda NN, et al. *Modifikatsiya struktury i svoystv evtekticheskogo silumina elektronno-ionno-plazmennoi obrabotkoi* [Modification of the structure and properties of eutectic silumin by electron and ion plasma treatment]. Minsk: Belaruskaya navuka; 2013. 287 p. Russian.
31. Voropay ES, Ermalitskaya KF, Zajogin AP. Double-pulse laser atomic-emission spectrometry of bronze alloys and coatings. *Journal of Applied Spectroscopy*. 2010;77(2):165–172. Russian.
32. Voropay ES, Gulis IM, Gulis IG, Serafimovich AI, Gorelenko AY, Pliska SP, Korochkin LS, Gubareva EG, authors; RUE «Cryptotech» of Goznak, Belarusian State University, assignees. The method to protect and identify documents. The Eurasian patent 200700864. 2007 April 2. Russian.