



УДК 535

Е. С. ВОРОПАЙ, И. М. ГУЛИС, А. И. КОМЯК, А. Л. ТОЛСТИК

РАЗВИТИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ СПЕКТРОСКОПИИ И ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКИ В БГУ

Рассматриваются основные этапы развития исследований в области спектроскопии и лазерной физики в БГУ, начиная с создания в 1953 г. кафедры спектрального анализа (в настоящее время – кафедра лазерной физики и спектроскопии). Перечень научных направлений первого полувека существования кафедры включает исследования в области теоретической оптики и спектроскопии, физики дуговых и искровых разрядов, спектроскопии паров сложных молекул, ураниловых соединений, изучение спектроскопических проявлений межмолекулярных взаимодействий в растворах сложных молекул и в сверххолодных изолированных ван-дер-ваальсовых комплексах, исследования в области динамической голографии, оптики и спектроскопии жидких кристаллов, спектроскопии биологически значимых молекул. С появлением первых лазеров на кафедре начали развиваться исследования в области лазерной физики, нелинейной оптики и нелинейной спектроскопии сложномолекулярных систем. В последнее десятилетие ведется исследование фоторефрактивных, жидких и фотонных кристаллов, многоволновых интерференционно-голографических процессов преобразования световых полей, моделирование процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом, разработка учебно-научных аппаратурных комплексов, приборов для спектроскопии, включая спектроскопию с пространственным разрешением, новых препаратов и приборов для фотодинамической терапии онкологических заболеваний, методов лазерно-эмиссионной спектроскопии для анализа биообъектов и промышленных изделий, аппаратно-программных комплексов для идентификации и контроля элементов защиты от подделки ценных бумаг и документов.

Ключевые слова: теоретическая оптика и спектроскопия; физика газового разряда; спектроскопия сложных молекул; динамическая голография; оптика и спектроскопия жидких кристаллов; лазерная физика; нелинейная оптика и спектроскопия; фотонные кристаллы; взаимодействие лазерного излучения с веществом; приборы для спектроскопии; препараты и приборы для фотодинамической терапии; лазерно-эмиссионная спектроскопия; аппаратно-программные комплексы для идентификации и контроля элементов защиты от подделки ценных бумаг и документов.

The main stages in the development of spectroscopic studies and laser physics at BSU beginning from the organization of the Spectral Analysis Chair (1953), later reformed as the Laser Physics and Spectroscopy Chair, and to the present time are considered. The research trends advanced at the Chair during a period of sixty years include theoretical optics and spectroscopy; physics of arc and spark discharge; spectroscopy of the vapors of complex molecules and of uranyl compounds; studies into a spectroscopic behavior of intermolecular interactions in solutions of complex molecules and in isolated ultracold Van der Waals complexes; investigations in the field of dynamic holography, optics and spectroscopy of liquid crystals; spectroscopy of biologically important molecules. Since the advent of lasers, the researchers have been engaged in studies associated with laser physics, nonlinear optics and nonlinear spectroscopy of complex molecular systems.

In the last decade the studies have been concerned with photorefractive, liquid, and photonic crystals; multiwave interference-holographic processes of the light-field transformation; simulation of interactions between laser radiation and material; design and manufacturing of systems for educational laboratories and of the equipment for spectroscopy, space-resolved spectroscopy including. Also, the research activities cover the high priority subjects: new substances and devices for photodynamic therapy of oncological diseases are proposed; the advanced techniques of laser emission spectroscopy are developed to realize analysis of biological objects and industrial products; systems and software are proposed to effect the identification and control of protective elements used against forging of documents and securities.

Key words: theoretical optics and spectroscopy; physics of discharge; spectroscopy of complex molecules; dynamic holography; optics and spectroscopy of liquid crystals; laser physics; nonlinear optics and spectroscopy; photonic crystals; interactions between laser radiation and material; equipment for spectroscopy; substances and devices for photodynamic therapy; laser emission spectroscopy; systems and software for the identification and control of protective elements used against forging of documents and securities.

60 лет назад с созданием в 1953 г. на физическом факультете двух оптических кафедр (кафедры спектрального анализа и кафедры физической оптики) в БГУ были начаты исследования и подготовка спе-

циалистов в области оптики, спектроскопии, а в последующем и лазерной физики, которые во многом определили развитие этого направления в республике. Статья посвящена обзору научных исследований, выполненных на кафедре спектрального анализа, которая впоследствии была переименована в кафедру спектроскопии и квантовой электроники и в настоящее время носит название кафедры лазерной физики и спектроскопии. Целый ряд известных ученых, руководителей организаций и предприятий оптического профиля являются ее выпускниками.

В создании оптического и спектроскопического научных направлений в Беларуси выдающуюся роль сыграли академики А. Н. Севченко и Б. И. Степанов, ставшие основоположниками научных школ, получивших впоследствии широкое признание. Б. И. Степанов был первым заведующим кафедрой, а с 1957 г. одновременно возглавлял Институт физики АН БССР. Уже с первых лет кафедра в своей работе взяла четкий курс на подготовку кадров, в которых нуждалась страна, – специалистов в области спектроскопии и спектрального анализа для исследовательских и заводских лабораторий, разработчиков новых методов и аппаратуры. Научные исследования, выполнявшиеся в тесном содружестве с Институтом физики, были нацелены как на развитие фундаментальных основ спектроскопии, а позднее и лазерной физики, так и на практические применения. Перечень научных направлений первого полувека существования кафедры включает исследования в передовых областях спектроскопической науки.

Б. И. Степанов был инициатором и руководителем работ в области *теоретической оптики и спектроскопии*, которые в пятидесятые годы велись на кафедре, а впоследствии получили развитие в Институте физики. Во время работы в БГУ Б. И. Степановым была создана теория люминесценции сложных молекул, позволившая дать целостное описание основных закономерностей процессов люминесценции не только в молекулярных системах, но и в полупроводниках [1]. Им установлено ставшее хрестоматийным соотношение между спектрами поглощения и испускания молекулярных систем, получившее в литературе название универсального соотношения Степанова. В эти же годы Б. И. Степанов разработал теоретические основы нового научного направления – спектроскопии отрицательных световых потоков [2]. В пятидесятые годы на кафедре активно велись работы в области *физики дуговых и искровых разрядов*, послужившие впоследствии основой для развития методов атомно-эмиссионной спектроскопии и организации подготовки специалистов в области спектрального анализа. С начала 1960-х гг. под руководством Н. А. Борисевича, читавшего лекции на кафедре спектрального анализа, велись исследования в области *спектроскопии свободных молекул*, в результате которых были установлены фундаментальные механизмы преобразования электронной и колебательной энергии в сложных молекулах в газовой фазе, имеющие принципиальное значение для молекулярной фотофизики и фотохимии [3].

Широкую научную известность получили исследования в области *спектроскопии ураниловых соединений*, начатые под руководством А. Н. Севченко и его ученика Л. В. Володько. Существенный вклад в развитие этого направления внесли А. И. Комяк и его ученики – М. Р. Последович, А. И. Серафимович, А. П. Зажогин. Комплексы тяжелых металлов и материалы на их основе находят все более широкое применение в различных областях науки и техники. В связи с этим спектроскопические исследования на кафедре спектрального анализа были направлены в первую очередь на выяснение роли кристаллической решетки в процессах электронного поглощения и люминесценции, а также установление особенностей урана как комплексообразователя, анализ электронно-колебательных спектров с точки зрения определения взаимосвязи количественных характеристик фотофизических процессов и их механизмов со структурой координационных соединений уранила. Результатом этих работ явилось решение принципиальных спектрально-структурных задач комплексных систем и кристаллов, установление природы электронных переходов, интерпретация тонкой структуры спектров ураниловых соединений при низких температурах, включая и гелиевые (4,2 К), систематика электронных состояний в видимой и ультрафиолетовой областях. Исследования позволили разделить в кристаллах эффекты Давыдова и кристаллического поля, выяснить роль дефектов решетки в появлении головных «мультиплетов», зависимость формы и ширины линий от температуры. Результаты исследований обобщены в монографии [4]. Установлено, что контуры электронно-колебательных полос могут быть описаны сверткой гауссова и лоренцевого контуров и определяются ангармоническим взаимодействием колебаний, структурой энергетических состояний и их заселенностью, наличием водородной связи, структурой образованного сольвата за счет окружения. В 1980–1990-х гг. установлены корреляции между положением полос в спектрах электронного поглощения и люминесценции комплексов уранила в растворах и электронно-донорной способностью нейтральных лигандов, предложен метод определения состава первой координационной сферы в ураниловых комплексах, находящихся в растворе или кристалле. Рассмотрен вибранный механизм активации химических реакций. Показано, что реакционная способность координационных соединений уранила обусловлена тем, что при возбуждении тяжелый атом урана оказывается в переходном состоянии, являющемся суперпозицией шести- и пятивалентного состояния (А. И. Комяк, А. П. Зажогин).

В 1980–1990-е гг. на кафедре активно проводились исследования *влияния флуктуаций микроокружения в растворах сложных органических молекул на динамику фотофизических процессов* (И. М. Гулис, А. И. Комяк, С. К. Горбачевич). Работы проводились в сотрудничестве с НИИ ПФП имени А. Н. Севченко БГУ (Е. С. Воропай, В. А. Гайсёнок и др.) и с Институтом физики НАН Беларуси (А. Н. Рубинов, В. И. Томин, Б. А. Бушук). Была разработана модель, описывающая стационарные и кинетические характеристики флуоресценции твердых полярных растворов сложных молекул, в основу которой положено рассмотрение переноса энергии в ансамбле молекул с неоднородно уширенными уровнями энергии [5]. Решена задача нахождения функции неоднородного уширения и описания ориентационной релаксации в полярных растворах дипольных молекул (И. М. Гулис, С. К. Горбачевич). Установлено влияние неоднородного уширения уровней энергии на спектрально-кинетические характеристики замедленного свечения [6]. Изучены спектроскопические проявления неоднородного уширения уровней и ориентационно-релаксационных процессов в реакциях фотопереноса протона (И. М. Гулис, Ю. И. Миксюк) в полярных растворах сложных молекул. Установлено, что наряду с наносекундной, диффузионно-лимитированной стадией имеет место сверхбыстрая (субнаносекундная) стадия фотопереноса [7].

Выполнен анализ проявлений межмолекулярной ориентационной релаксации при воздействии на раствор интенсивного резонансного излучения (Е. С. Воропай, В. А. Гайсёнок и др.). Показана перспективность использования светового тушения как для изучения межмолекулярной ориентационной релаксации, так и для управления молекулярной динамикой и параметрами неоднородного уширения уровней энергии в растворах [8, 9].

С 1987 г. на кафедре проводились исследования в области *спектроскопии и фотофизики охлажденных в сверхзвуковой струе молекул и их ван-дер-ваальсовых комплексов* (И. М. Гулис, А. И. Комяк, К. А. Саечников). Исследования фотофизических процессов в сложных молекулах и их ван-дер-ваальсовых комплексах, охлажденных в сверхзвуковой струе, могут рассматриваться как модельные по отношению к растворам и открывают большие перспективы для понимания механизмов фотофизических процессов и спектроскопических проявлений межмолекулярных взаимодействий. Для этих исследований был создан уникальный лазерный спектрометр, позволяющий получать спектры возбуждения и люминесценции сверххолодных изолированных сложных молекул и комплексов с участием простых молекул и атомов инертных газов. Определены значения спектральных сдвигов при формировании комплексов с рядом полярных и неполярных лигандов (молекулы галогензамещенных углеводородов, вода, аммиак, ацетоннитрил и др.). Установлено существование структурных изомеров комплексов, выявлена корреляция величин сдвигов с молекулярными параметрами лигандов. Проанализировано влияние межмолекулярных взаимодействий на вероятности безызлучательных переходов в комплексах антрацена с атомами аргона. В частности, установлены механизмы влияния комплексообразования на вероятности интеркомбинационной конверсии. Исследованы процессы внутримолекулярного перераспределения и колебательной преддиссоциации [10]. В 1994 г. за цикл работ «Флуктуации микроструктуры и фотофизика растворов сложных органических соединений» Государственная премия Республики Беларусь в области науки и техники присуждена коллективу ученых Академии наук Беларуси и физикам-оптикам Белорусского государственного университета (Б. А. Бушук, Е. С. Воропай, В. А. Гайсёнок, И. М. Гулис, А. Н. Рубинов, В. И. Томин).

В 1960-х гг. в проблемной лаборатории при кафедре спектрального анализа при непосредственном участии Л. В. Володько развернулись исследования *жидких кристаллов*. Были изучены эфиры коричных кислот (Л. В. Володько, Н. Р. Последович), образующих различные типы жидких кристаллов. Установлено, что вращательная изомерия в жидких кристаллах обусловлена не только изомерией метильных групп в алкильной цепи молекулы, но также и ориентацией этой цепи в целом по отношению к положению бензольных колец (длинной оси молекулы). Показано, что фазовый переход «изотропная жидкость – жидкий кристалл» характеризуется изменением ориентации молекулы в целом. Разработана методика измерения оптических постоянных жидких кристаллов при различных температурах в широком спектральном интервале с использованием методов отражения и пропускания (В. И. Науменко). В 1980-х гг. на кафедре создан интерференционный эллипсометр (Г. И. Боровков), который позволил объединить достоинства методов интерферометрии и эллипсометрии, разработаны методы определения двулучепреломления, дихроизма и шага спирали в планарно ориентированных слоях хирально-нематических жидких кристаллов с точностью, превышающей более чем на порядок известные методы. Позднее исследования жидких кристаллов активно велись в лаборатории оптики конденсированных сред НИИ ПФП БГУ, которую после Л. В. Володько возглавил его ученик А. А. Минько. По инициативе А. С. Рубанова на кафедре исследовались структуры, состоящие из рельефной решетки на полимере в контакте с жидким кристаллом (И. В. Сташкевич, Е. А. Мельникова), перспективные для создания электрически управляемых дифракционных элементов. Совместно с российскими учеными

Физического института имени П. Н. Лебедева РАН (ФИАН) проводились работы по созданию управляемых фокусаторов излучения с использованием жидких кристаллов.

Начиная с 1960-х гг. на кафедре были развернуты работы по *синтезу полимерных материалов на основе фенолов*. Были изучены электрофизические характеристики продуктов поликонденсации двухатомных фенолов с формальдегидом, структурные превращения полимеров при термической обработке и установлены температурные границы этих превращений (М. А. Ксенофонов). На основании разработанных методов и выполненных исследований предложены новые материалы: комплексы, олигомеры, сетчатые и вспененные полимеры, которые широко внедряются как теплоизоляционные материалы в промышленности Республики Беларусь.

После создания на физическом факультете проблемной научно-исследовательской лаборатории (1961 г.) под руководством Л. В. Володько была организована группа в составе медиков и биологов, которые вместе с физиками начали заниматься *физико-биологическими проблемами*. Разрабатывались противоопухолевые препараты на основе производных бензохинонов. Спектроскопические исследования биологически значимых соединений (парабензохиноны, триптофан, белки, нуклеиновые кислоты, элементы крови и заменяющие ее компоненты) были продолжены и на кафедре биофизики под руководством А. И. Комяка, который возглавлял эту кафедру в период с 1973 по 1979 г.

Выпускниками оптических кафедр БГУ (Е. С. Воропай, В. А. Гайсёнок, А. П. Клищенко, И. И. Жолнеревич) под руководством А. М. Саржевского в конце 1960-х начаты исследования *нелинейно-оптических процессов в сложных молекулярных системах*. Установлены особенности проявлений концентрационной деполяризации люминесценции, возбуждаемой излучением высокой интенсивности [11]. Пионерские результаты получены при исследованиях двухфотонно-возбуждаемой люминесценции (ДФВЛ) сложных молекул в растворах [12, 13]. Важнейшая информация об этих процессах может извлекаться из анализа поляризационных характеристик люминесценции. Е. С. Воропаем и А. М. Саржевским получены выражения, связывающие степень поляризации при двухфотонном возбуждении с ориентацией дипольных моментов переходов с поглощением и испусканием [13]. Данные соотношения полностью применимы также и для описания люминесценции из высоких возбужденных состояний при их двухступенчатом возбуждении. Подобная методика исследования более высоких, чем S_1 , состояний в настоящее время находит широкое применение, в частности, при изучении «синей» люминесценции, а также «горячей» люминесценции из непрорелаксированных состояний. Экспериментально и теоретически доказано существенное влияние электронно-колебательного взаимодействия на спектральные зависимости поляризационных характеристик ДФВЛ. Выполнены исследования светового тушения люминесценции, в частности особенности его ориентационной селективности [14]. Полученные экспериментальные и теоретические результаты позволили сделать заключение, что для сложных молекул, в том числе и красителей, наиболее актуальным является механизм тушения, обусловленный переходами на колебательные подуровни основного состояния. Практическая значимость исследований ДФВЛ определяется расширяющимся в связи с внедрением в науку и технологии лазеров сверхкоротких импульсов использованием двухфотонного возбуждения в микроскопии с субдифракционным разрешением, в фотохимии, разделении изотопов.

В 1980–1990-е гг. на кафедре лазерной физики и спектроскопии и в лаборатории нелинейной спектроскопии НИИ ПФП БГУ проводились исследования *фотофизических и фотохимических свойств полиметиновых красителей (ПК)* и дицианометиленовых производных пирана, а также изучались *особенности генерации лазерного излучения активными средами* на их основе (Е. С. Воропай, М. П. Самцов, А. А. Кирсанов, А. П. Луговский). Были получены новые соединения, эффективные в качестве активных лазерных сред для ближней ИК-области спектра, превосходящие лучшие аналоги для сопоставимых спектральных областей по генерационным параметрам (область перестройки частоты, КПД генерации) и особенно по их фотостабильности [15].

Проведены исследования взаимосвязи спектрально-люминесцентных свойств и *фотоактивности полиметиновых красителей в биологических системах (in vitro и in vivo) при введении в качестве фотосенсибилизаторов для фототерапии злокачественных опухолей* (Е. С. Воропай, М. П. Самцов, А. П. Луговский) совместно с учеными НИИ ОМР им. Н. М. Александрова (Э. А. Жаврид, Ю. П. Истомин, Е. Н. Александрова) [16, 17]. Показано, что при введении красителей в нетоксичной дозе 0,5 мг/мл достигается достаточно высокая их концентрация в опухолевых клетках, для разных препаратов она колеблется в диапазоне от 10^{-11} до $2,1 \times 10^{-9}$ молей на миллион клеток. Наибольшей фототоксичностью для клеточных культур обладают полиметиновые красители с индолениновыми концевыми группами и заместителями, способствующими их накоплению в клетках. Для полиметиновых красителей различного строения определены квантовые выходы генерации синглетного кислорода в растворах. В результате анализа фототоксичности красителей в отношении клеток HeLa, их способности генерировать синглетный кислород и накапливаться в клетках выявлено несоответствие между квантовым выходом образования синглет-

ного кислорода и долей погибших опухолевых клеток после фотовоздействия. Учитывая полученные результаты, была осуществлена модификация молекул красителей по созданию соединений с заместителями, способствующими накоплению фотосенсибилизаторов в опухолевых клетках, а не высокой эффективности образования синглетного кислорода. В экспериментах на животных установлено, что новые индолениновые полиметиновые красители имеют более высокую фотоактивность по сравнению с другими исследованными соединениями, выражающуюся в тотальной гибели опухолевых узлов на всю глубину (до 14 мм).

В 1980-х гг. на кафедре по инициативе А. С. Рубанова и под руководством А. В. Чалая, а затем А. Л. Толстика сформировалась группа ученых, основным направлением научных исследований которой стал широкий круг нелинейно-оптических явлений, таких как *динамическая голография, обращение волнового фронта, эффекты самоорганизации в нелинейных системах и оптическая обработка информации*. Выполненный в 1980–1990-х гг. на кафедре цикл работ включает экспериментальные и теоретические исследования процессов взаимодействия световых полей сложной пространственной структуры в реальном масштабе времени на основе светоиндуцированных динамических решеток в резонансных средах. Для записи динамических голограмм была использована схема вырожденного по частоте четырехволнового взаимодействия (ЧВВ), сопровождающегося обращением волнового фронта (ОВФ). На основе предложенных многоуровневых моделей резонансной среды была разработана теория четырехволнового взаимодействия лазерного излучения в резонансных средах, в том числе с учетом нелинейного поглощения и перекачки энергии между всеми взаимодействующими волнами (А. Л. Толстик совместно с В. В. Кабановым) [18]. Совместно с лабораторией оптической голографии Института физики были получены приоритетные результаты при реализации ЧВВ в усиливающих растворах красителей. С использованием ряда полиметиновых красителей было получено ОВФ с коэффициентом отражения сигнальной волны выше 100 %, причем плотность энергии волн накачки составила всего 1 мДж/см², что было существенно меньше энергии просветления слоя красителя. При этом была достигнута рекордная чувствительность раствора красителя к четырехволновому ОВФ в условиях наносекундного быстрого действия ($\sim 10^{-5}$ Дж/см²). Теоретическое рассмотрение встречного ЧВВ с учетом параметрического энергообмена между взаимодействующими волнами позволило определить условия наблюдения гистерезисной зависимости коэффициента отражения обращенной волны от интенсивности накачки и режима оптической бистабильности. Были предложены, теоретически и экспериментально исследованы схемы управления дифракционной эффективностью динамических голограмм с помощью дополнительного пространственно однородного светового пучка (оптической подкачки), который непосредственно не взаимодействует с волнами, записывающими голограммы, но влияет на формирование дифракционных решеток [19]. Было реализовано увеличение коэффициента отражения обращенной волны в несколько раз при интенсивностях подкачки всего несколько МВт/см².

Второе направление исследований группы нелинейной оптики связано с анализом *кооперативных процессов и эффектов самоорганизации в нелинейных интерферометрах и жидкокристаллических оптоэлектронных системах* (А. С. Рубанов, А. В. Чалей, А. Л. Толстик, Н. А. Иванова, Е. А. Мельникова, И. Н. Агишев, О. Г. Романов). Сочетание бистабильных свойств нелинейного интерферометра с параметрическим энергообменом между световыми пучками при многоволновом смешении перспективно для расширения возможностей интерференционно-голографических методов преобразования световых полей. Были рассмотрены различные варианты внутрирезонаторного взаимодействия, когда на вход интерферометра Фабри – Перо подаются две световые волны, а новые волны получаются как за счет отражения от зеркал резонатора, так и при перерассеянии на формирующихся в объеме среды дифракционных динамических решетках. Впервые была показана возможность реализации пульсаций интенсивности в интерферометре Фабри – Перо за счет конкуренции оптических нелинейностей, связанных с заселением различных энергетических состояний молекул, а также возможность управления динамическими режимами работы интерферометра с помощью независимого светового пучка – оптической накачки [20]. Анализ ЧВВ в нелинейном интерферометре с учетом нестационарного энергообмена между световыми пучками и поперечного дифракционного механизма взаимодействия позволил продемонстрировать возможность реализации разнообразных режимов регулярных и хаотических самопульсаций интенсивности. В условиях проявления эффекта самофокусировки наблюдается формирование связанных резонаторных солитонов, пространственным положением которых можно управлять путем подачи управляющего оптического импульса на один из пучков. Результаты теоретических исследований по данной тематике обобщены в монографии О. Г. Романова и А. Л. Толстика [21].

Для экспериментальной реализации бистабильного режима и самопульсаций интенсивности были предложены жидкокристаллические системы с оптоэлектронной обратной связью [22]. На основе ЖК-ячейки с запаздывающей оптоэлектронной обратной связью был реализован режим самопульсаций выходной интенсивности при постоянной интенсивности на входе. Аналогичные бистабильные и ав-

токолебательные жидкокристаллические системы были созданы на основе ЖК-ячеек, работающих на твист-эффекте, а также на основе электрически управляемой системы «рельефная решетка – жидкий кристалл». Важным шагом в разработке принципов и систем оптической обработки информации явилась реализация на основе оптоэлектронных ЖК-ячеек логических операций, включая функционально полные наборы булевой алгебры.

В новое тысячелетие кафедра лазерной физики и спектроскопии вступила со сложившейся научной тематикой и коллективом специалистов, способным решать сложные научные задачи в области современной оптики, спектроскопии и лазерной физики. В то же время тенденции развития науки и расширение инновационного компонента в экономике требуют усиления прикладной направленности проводимых исследований. Большой опыт и накопленный потенциал в фундаментальных исследованиях составляют базу для успешного развития перспективных прикладных разработок. Кафедра динамично откликается на современные тенденции в развитии научных направлений. В последнее десятилетие ведется исследование фоторефрактивных, жидких и фотонных кристаллов, моделирование процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом, разработка учебно-научных комплексов, приборов для спектроскопии, включая спектроскопию с пространственным разрешением, новых препаратов и приборов для фотодинамической терапии онкологических заболеваний, методов лазерно-эмиссионной спектроскопии.

Под руководством А. Л. Толстика на кафедре выполняются исследования по различным направлениям нелинейной оптики, среди которых можно выделить интерференционно-голографические методы преобразования световых полей, формирование пространственных солитонов и сингулярных световых пучков, исследование их взаимодействия, моделирование процессов лазерного воздействия на вещество и микрообъекты, разработку лазерно-оптического оборудования для идентификации и контроля голографических элементов защиты ценных бумаг и документов, создание учебно-научных комплексов по лазерной физике, когерентной, нелинейной и волоконной оптике. В этих направлениях работают Е. А. Мельникова, О. Г. Романов, И. В. Сташкевич, Д. В. Горбач, А. А. Казак, И. Н. Агишев. Начиная с 2000 г. проведены теоретические и экспериментальные исследования, опытно-конструкторские работы по выполнению программ ГПФИ «Когерентность», «Динамика нелинейных систем», ГКПНИ «Фотоника», «Кристаллические и молекулярные структуры», ГПНИ «Электроника и фотоника», «Конвергенция», ГНТП «Лазерные системы», «Оптотех», «Идентификация», «Защита документов», ОНТП «Учебно-научный комплекс», грантов БРФФИ, а также совместных проектов с Московским государственным университетом имени М. В. Ломоносова, Томским государственным университетом систем управления и радиоэлектроники (Россия), Йенским университетом имени Ф. Шиллера (Германия), Кантабрийским университетом (Испания), Австралийским национальным университетом.

Одно из активно разрабатываемых направлений относится к *многоволновым взаимодействиям гауссовых и сингулярных световых пучков*. Интерес к многоволновым взаимодействиям, которые реализуются в резонансных средах при проявлении нелинейностей пятого и более высоких порядков, определяется существенным расширением возможностей дифракционных методов преобразования световых полей и методов нелинейной спектроскопии. Показано, что нелинейная зависимость светоиндуцированного изменения показателя преломления (коэффициента поглощения) резонансной среды от интенсивности приводит к искажению профиля штриха решетки, которая перестает быть синусоидальной. Рассеяние на различных гармониках решетки определяет дифракцию во второй и более высокие порядки. При выполнении условия объемности динамических голограмм угловая селективность решетки позволяет независимо восстанавливать волны, дифрагированные в различные порядки, изменяя направление распространения считывающей волны или ее частоту. Использование многоволновых взаимодействий дает возможность также выполнить преобразование пространственной структуры волнового фронта [23].

Экспериментальная реализация вырожденного по частоте многоволнового взаимодействия в растворах красителей была осуществлена с использованием стандартной геометрии четырехволнового взаимодействия при изменении направления распространения считывающей волны. При изменении угла считывания в растворе красителя родамин-6Ж экспериментально реализовано шести-, восьми- и десятиволновое взаимодействие на нелинейностях пятого, седьмого и девятого порядков соответственно. Для реализации невырожденного по частоте многоволнового взаимодействия использовалась брэгговская дифракция лазерного излучения на удвоенной частоте в растворе полиметинового красителя № 3274У, имеющего полосу поглощения на основной частоте генерации лазера на иттриево-алюминиевом гранате ($\lambda = 1,064$ мкм) и практически прозрачного на частоте второй гармоники ($\lambda = 0,532$ мкм), что позволяет записывать динамические голограммы в ИК-области спектра и восстанавливать их в видимой области. Реализовано четырех- и шестиволновое взаимодействие с удвоением частоты. Полученные значения дифракционной эффективности на три порядка превышают значения, достигнутые в более ранних работах при шестиволновом взаимодействии в полимерах с использованием резонанс-

ного двухфотонного механизма поглощения. Существенно, что при невырожденном шестиволновом взаимодействии и использовании удвоенной частоты для восстановления голограммы реализуется обращение волнового фронта, что перспективно для визуализации сложных ИК-изображений [24].

Цикл работ «Многоволновые взаимодействия лазерного излучения в резонансных средах», выполненный совместно сотрудниками кафедры лазерной физики и спектроскопии и лаборатории оптической голографии Института физики, отмечен премией НАН Беларуси в 2001 г. за лучшую научную работу. Результаты исследований по данной тематике обобщены в монографии А. Л. Толстика [19].

Установлен новый механизм проявления оптической восприимчивости пятого и более высокого порядков в поглощающих средах, связанный с нелинейностью термооптического коэффициента и зависимостью от температуры плотности и теплоемкости растворителя (И. Н. Агишев, А. Л. Толстик). Использование указанного механизма нелинейного взаимодействия позволило на два порядка повысить эффективность энергообмена между световыми пучками при шестиволновом смешении в сравнении с известными мировыми аналогами и перейти к практическому использованию методов многоволновых нелинейно-оптических преобразований. Предложена методика определения термооптического коэффициента второго порядка чистых органических жидкостей на основе схемы невырожденного по частоте шестиволнового смешения [25].

Значительное внимание группа нелинейной оптики уделяет исследованиям процессов распространения и взаимодействия сингулярных световых пучков (оптических вихрей) в средах с различными типами нелинейности (Д. В. Горбач, О. Г. Романов, А. Л. Толстик). Свойства сингулярных пучков позволяют использовать их для оптической передачи информации, захвата и манипуляции микрообъектами, анализа турбулентных явлений в атмосфере и др. Разработана теория преобразования сингулярных световых полей динамическими голограммами, теоретически обоснован и экспериментально реализован новый метод преобразования топологической структуры сингулярных световых пучков при многоволновом взаимодействии в средах с резонансной нелинейностью [26]. Впервые экспериментально выполнено мультиплицирование топологического заряда сингулярного пучка в условиях многоволнового смешения. Показано, что введение фазовых сингулярностей в опорный и (или) считывающий пучки заметно усложняет картину многоволновых взаимодействий, но и расширяет возможности управления топологическим зарядом. Предложено использовать преобразования световых пучков при многоволновых взаимодействиях для реализации алгебраических операций с топологическими зарядами, что позволяет ввести топологический заряд в качестве нового информационного параметра [27]. Предложен и экспериментально осуществлен метод инвертирования топологического заряда сингулярных световых пучков с их одновременным частотным преобразованием, основанный на реализации многоволновых взаимодействий в средах с резонансной и тепловой нелинейностью [28]. Для одновременного преобразования топологической и поляризационной структуры оптических вихрей предложено использовать поляризационные динамические голограммы, сформированные импульсными гауссовыми и сингулярными ортогонально поляризованными световыми пучками в растворах красителей [29].

В содружестве с учеными МГУ (профессор А. П. Сухоруков) выполнен цикл работ по нелинейному отражению световых пучков и формированию оптических волноводов в средах с тепловой и резонансной нелинейностью. Определены условия формирования под действием импульсного излучения (пучок накачки) пространственной области с отрицательным изменением показателя преломления, что определило возможность реализации эффекта полного внутреннего отражения для сигнального светового пучка. Показано, что при нелинейном отражении наблюдается преобразование пространственной структуры сигнального пучка. Использование в качестве накачки мощного пучка с фазовой сингулярностью позволило определить условия, при которых имеет место режим волноводного распространения сигнального светового пучка [30].

Разработана теоретическая модель расчета изменения термодинамических и оптических характеристик поглощающих жидкостей под действием импульсного излучения (О. Г. Романов). Она основана на численном решении уравнений движения среды в форме Лагранжа, уравнения теплопроводности и использовании связи между плотностью среды и показателем преломления в виде формулы Лорентц – Лоренца. Проанализированы процессы развития светоиндуцированных акустических и тепловых возмущений в пространстве и времени в микро- и нанометровых масштабах. Теоретически исследованы процессы воздействия импульсных световых пучков различной пространственной структуры (гауссовых, бесселевых, сингулярных) на поглощающие жидкости.

Выполнен цикл работ по реализации *нелинейных эффектов в фоторефрактивных кристаллах* на основе легированных кристаллов теллурида кадмия (И. Н. Агишев, Е. А. Мельникова, А. Л. Толстик), перспективных для использования в волоконно-оптических линиях связи, а также для ограничения мощности ИК-излучения с целью защиты сенсоров. Исследованы условия образования и динамика

пространственных солитонов в фоторефрактивных кристаллах семейства силленитов (силикат и титанат висмута) при прохождении через кристалл излучения гелий-неонового лазера микро- и нановаттной мощности. Исследована динамика развития и релаксации фотоиндуцированного поглощения в кристаллах $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ в видимой и ближней инфракрасной области спектра при облучении кристаллов пикосекундным, наносекундным и непрерывным излучением с $\lambda = 532$ нм [31]. Установлена зависимость величины фотохромного эффекта в фоторефрактивных кристаллах семейства силленитов от интенсивности лазерного излучения при сохранении дозы облучения. Показано, что, используя излучение различной интенсивности и на разных длинах волн, можно управлять скоростью процесса затемнения или просветления кристалла. Для объяснения установленных закономерностей предложена феноменологическая модель, основанная на применении эффектов каскадного либо двухфотонного поглощения.

В последние годы разворачиваются исследования в области *оптики фотонных кристаллов*. Разработаны теоретические и компьютерные модели распространения оптического излучения в средах с периодической и квазипериодической модуляцией показателя преломления на основе использования численного решения уравнений Максвелла методом конечно-разностной аппроксимации в пространственной и временной областях (О. Г. Романов). Построена теоретическая модель распространения световых пучков в средах с пространственной модуляцией показателя преломления и проанализированы особенности волноводного распространения световых пучков в пространственно структурированном жидкокристаллическом материале. Проанализированы особенности распространения электромагнитных волн в фотонных структурах с лабиринтоподобным распределением показателя преломления.

Разработана теория, позволяющая рассмотреть процессы, протекающие при воздействии импульсного и непрерывного лазерного излучения на поглощающую пространственно неоднородную жидкую среду (О. Г. Романов совместно с Г. И. Желтовым и Г. С. Романовым). Развита теоретическая и численные модели преобразования световых полей при рассеянии на диэлектрических микро- и нанобъектах. Построена теория процессов воздействия сверхкоротких лазерных импульсов на сферические металлические наночастицы, помещенные в жидкость, и исследована кинетика возбуждения и затухания акустических колебаний в наночастицах золота. Совместно с Кантабрийским университетом (профессор Хосе Луис Арсе Диего) установлены закономерности распространения оптического излучения в рассеивающей среде, состоящей из случайно расположенных сферических микрочастиц со статистически изменяющимся размером (микроскопическая модель биологической ткани). Результаты исследований перспективны для анализа процессов взаимодействия излучения с веществом в различных сферах применения импульсных лазеров, таких как медицина (оптико-акустическая томография), метрология, технологии неразрушающего контроля, и нашли свое отражение в спецкурсах для студентов кафедры лазерной физики и спектроскопии «Моделирование процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом» и «Нанопотоника».

Разработаны *электрически управляемые дифракционные и волноводные жидкокристаллические структуры*, позволяющие формировать световые поля с заданными свойствами и осуществлять переключение между волноводными каналами. Разработанные дифракционные ЖК-элементы представляют собой плоские стеклянные капилляры, заполненные жидким кристаллом с пространственно модулированной ориентацией директора ЖК, создающей тонкую фазовую дифракционную решетку. Для задания начальной ориентации директора ЖК использовался ориентирующий фотополимерный материал, синтезируемый на кафедре физической оптики БГУ. Под действием поляризованного УФ-излучения на поверхности фотополимера наводилась оптическая анизотропия, в результате чего поверхность приобрела свойства ЖК-ориентанта. Засветка фотополимерного слоя одной из подложек проводилась через специально созданную микроструктурированную маску-транспарант. В качестве ориентирующего покрытия второй подложки использовался фотополимер, равномерно засвеченный излучением, поляризованным ортогонально относительно излучения, засвечивающего первый фотополимерный слой. В результате в объеме жидкого кристалла создавалась промодулированная в пространстве ориентация директора, соответствующая чередованию планарной и закрученной (твист) структуры жидкого кристалла. Как следствие этого, в ЖК-элементе наводилась модуляция показателя преломления для поляризованного излучения и такая ЖК-структура представляла собой дифракционную фазовую решетку. Наличие электродов на стеклянных подложках позволяло управлять дифракционной эффективностью ЖК-элемента посредством подачи внешнего переменного напряжения [32].

Разработаны ЖК-элементы, формирующие сингулярные оптические пучки. Для решения этой задачи было предложено использование амплитудной маски-транспаранта, которая содержала характерную «вилку», отвечающую интерференции плоской волны с оптическим вихрем. Показано, что использование второго и более высоких порядков дифракции позволяет осуществлять мультиплицирование топологического заряда. При этом пучки, дифрагированные в $+N$ и $-N$ порядки дифракции,

имеют противоположные знаки топологического заряда. Таким образом, разработанная ЖК-структура представляет собой электрически управляемый дифракционный элемент, позволяющий одновременно формировать сингулярные пучки с различными топологическими зарядами.

С использованием технологии наведенной поверхностной анизотропии фотополимерного слоя для различной топологии ориентации ЖК посредством использования маски-транспаранта также была разработана электрически управляемая ЖК-линза Френеля.

Создан ЖК-элемент, позволяющий преобразовывать линейно-поляризованный лазерный пучок в пучок с радиальной или азимутальной поляризацией. Формирование анизотропной ЖК-структуры осуществлялось посредством пространственно неоднородной ориентации молекул ЖК фотополимерным ориентирующим покрытием при засветке фотополимера ультрафиолетовым излучением с заданным пространственным распределением поляризации. Одна из подложек ЖК-ячейки засвечивалась пространственно однородным линейно-поляризованным излучением, а вторая подложка разбивалась на сектора, и каждый сектор засвечивался излучением с заданной поляризацией (радиальной или азимутальной) через никелевую маску-транспарант. В местах засветки фотополимера пространственно модулированным УФ-излучением создавалась твист-структура (T -деформация ЖК), которая поворачивала плоскость поляризации падающего излучения на заданный угол. На выходе ЖК-ячейки линейно-поляризованный световой пучок приобретал поляризацию в соответствии с распределением поляризации засвечивающего излучения.

Для создания перестраиваемых жидкокристаллических волноводов использован метод формирования электрически управляемой границы раздела двух различных топологий ориентации директора ЖК. Изготовлена ЖК-ячейка, состоящая из двух стеклянных подложек с прозрачными электродами из окиси индия, один из них частично стравливался, используя фоторезист, который засвечивался через маску, закрывающую половину подложки. Затем последовательно проводилось стравливание фоторезиста и электрода. Для придания ориентирующих свойств фотополимерное покрытие засвечивалось УФ-поляризованным излучением. В объеме ячейки создавалась планарная ориентация директора ЖК. Толщина ЖК-слоя задавалась спейсерами и для удобства ввода лазерного излучения через торец ячейки составляла 200 мкм. При воздействии внешнего электрического поля происходила переориентация молекул ЖК в той части ячейки, в которой оставался электрод после травления. В другой части ячейки, где электрод был стравлен, сохранялась планарная ориентация молекул ЖК. Области с разными ориентациями директора ЖК (планарной и гомеотропной) формировали границу раздела двух нематических фаз с определенными зависимостями показателя преломления от поляризации падающего излучения, которое вводилось в ЖК-ячейку под углом, обеспечивающим полное внутреннее отражение для разности показателей преломления $\Delta n = 0,17$. В отсутствие электрического напряжения граница раздела областей ЖК с разными показателями преломления не наблюдается для вертикальной поляризации света и излучение проходит прямо, не испытывая отражения. При включении напряжения появляется граница раздела. Луч с вертикальной поляризацией входит в ЖК-слой с показателем преломления, соответствующим необыкновенной волне. На границе раздела двух мезофаз показатель преломления меняется и определяется показателем преломления для обыкновенной волны. Вследствие того, что в используемом ЖК показатель преломления для обыкновенной волны меньше, чем для необыкновенной, наблюдается эффект полного внутреннего отражения. На описанном принципе созданы волноводные электрически управляемые ЖК-элементы с периодической модуляцией ориентации директора ЖК.

Ведутся также экспериментальные исследования динамических голограмм, формируемых при четырехволновом взаимодействии в ориентированном слое нематического жидкого кристалла, активированного красителем. Предложена схема электрически управляемого дифракционного элемента на основе активированных жидкокристаллических сред. За счет изменения взаимной ориентации дипольного момента молекул и вектора поляризации, формирующего решетку излучения, осуществлено двукратное изменение дифракционной эффективности динамических голограмм.

Одним из важных прикладных направлений, развиваемых на кафедре с 2000 г., является разработка *лазерно-оптического оборудования для идентификации и контроля голографических элементов защиты ценных бумаг и документов*, а также создание *учебно-научных комплексов по лазерной физике, когерентной, нелинейной и волоконной оптике*. Эти работы выполнялись под руководством профессора А. Л. Толстика в рамках ГНТП «Лазерные системы», «Оптотех», «Идентификация», «Защита документов», ОНТП «Учебно-научный комплекс». Активное участие в них принимали Е. А. Мельникова, И. В. Сташкевич, О. Г. Романов, Д. В. Горбач, А. А. Казак, И. Н. Агишев, Г. Д. Василёнок.

На основании созданных методик анализа голографических изображений разработан и изготовлен аппаратно-программный комплекс цифровой диагностики для объективной оценки показателей

голографических элементов защиты. 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 на тиснильной машине. Аппаратно-программный комплекс внедрен в технологический процесс на предприятии «Голографическая индустрия» и используется в Департаменте государственных знаков Министерства финансов Республики Беларусь при изготовлении ценных бумаг и документов.

Разработаны принципиально новые средства контроля голографических изображений и идентификации кодограмм, которые представляют собой голографические элементы с совмещенным штрихкодом. Разработанная система на основе голографического штрихкода не имеет аналогов, при этом впервые удалось сочетать голографическую степень защиты с информационными принципами штрихового кодирования. Идентификатор кодограмм внесен в Государственный реестр приборов для контроля подлинности ценных бумаг и документов, изготавливается по заказам предприятий, выпускающих голографические защитные элементы: ЗАО «Голографическая индустрия», РУП «Минская печатная фабрика» и др.

Используя результаты исследований физических принципов создания объемных, включая голографические, изображений, создан цилиндрический растр для получения объемных и динамических эффектов. Разработка предполагает значительное увеличение размеров стереограммы за счет замены фоторегистрации компьютерным синтезом изображения с получением твердой копии на цветном принтере, что позволяет достичь параметров, необходимых для применения в визуальной рекламе.

Разработаны оригинальные учебно-научные комплексы оборудования, позволившие на современном научно-техническом уровне поставить циклы лабораторных работ по лазерной физике, нелинейной и волоконной оптике, голографии. Приборной основой лабораторных практикумов служат импульсно-периодические лазеры на иттрий-алюминиевом гранате и диодные лазеры. Комплексы также включают системы регистрации временных и энергетических характеристик генерации, скоростные фотоприемные устройства, генераторы тока светодиодов и лазерных диодов, измерители тока фото диода, оригинальные наборы механических, оптических и оптоволоконных элементов. Спецпрактикум по физике лазеров и нелинейной оптике включает семь лабораторных работ, позволяющих реализовать и исследовать режимы свободной генерации, активной и пассивной модуляции добротности и синхронизации мод, способы перестройки частоты лазерной генерации с использованием лазеров на красителе с дисперсионным резонатором, а также наиболее известные нелинейно-оптические явления – генерацию второй гармоники и вынужденное комбинационное рассеяние. Учебно-научное оборудование для изучения волоконно-оптических систем передачи оптических сигналов предназначено для обучения студентов современным информационным технологиям. Разработан также не имеющий аналогов лабораторный практикум по когерентной оптике и голографии на основе нового фотополимерного материала, который не требует дополнительной постэкспозиционной обработки и позволяет студентам в реальном времени наблюдать запись тонких и объемных голографических решеток. Методические указания к лабораторным работам подготовлены также на английском языке, что обеспечило возможность продвижения созданного оборудования на зарубежный рынок. Лабораторные практикумы на базе научно-учебного оборудования поставлены в университеты как нашей республики, так и зарубежных стран. Общий объем реализованной научно-технической продукции составил более 400 тыс. долл. США. В 2012 г. комплекс учебного оборудования по лазерной физике отмечен Премией имени А. Н. Севченко в номинации «Образование». В составе авторского коллектива – А. Л. Толстик, Е. А. Мельникова, И. Н. Агишев, Н. Н. Васильев.

С конца 1990-х гг. под руководством профессора И. М. Гулиса и заведующего кафедрой профессора Е. С. Воропая разрабатываются новые *приборы для аналитической спектроскопии и гиперспектральной спектроскопии* (спектроскопии с пространственным разрешением), обладающие при малых габаритах улучшенными характеристиками по разрешению и светосиле, которые могут быть успешно использованы в промышленности, полевых условиях, медицине, а также в аэрокосмическом мониторинге земной поверхности.

Перспективным для применения в лазерной кинетической спектроскопии пикосекундного разрешения является создание перестраиваемых по частоте и простых в конструкции лазеров на красителях, работающих в режиме накачки от доступных источников импульсов наносекундной длительности (И. М. Гулис, Е. Н. Ермилов). Теоретически и экспериментально показано, что в РОС-лазерах с двухкомпонентной активной средой и в короткорезонаторных лазерах с комбинированным резонатором в предложенных режимах, основанных на переключении генерации на насыщающийся поглотитель, возможно получение одиночных пикосекундных импульсов при накачке импульсами наносекундной длительности. Малые пороговые плотности мощности, требуемые для реализации указанных режимов, открывают возможность накачки маломощными квазинепрерывными DPSS-лазерами с пассивной мо-

дуляцией добротности и тем самым создания недорогих компактных перестраиваемых пикосекундных источников с высокой частотой следования для спектроскопических применений.

Разработан ряд принципиальных и схемных решений компактной спектрометрической аппаратуры [33, 34], в которой используются массивы светодиодных источников и системы регистрации на основе многоэлементных фотоприемников (Е. С. Воропай, И. М. Гулис, А. Г. Купреев, Д. В. Глушков, К. Н. Каплевский, М. П. Самцов, К. Н. Шевченко, А. Е. Радько). Так, предложены, проанализированы и экспериментально апробированы два варианта спектрофотометра-колориметра; в обоих вариантах отсутствует движение оптико-механических деталей. Первый из них базируется на использовании полихроматического источника с узкополосной селекцией большого набора узких спектральных интервалов и системой регистрации на основе фотодиодного приемника. Во втором используется набор относительно широкополосных светодиодных источников (30–60 нм) и система регистрации на основе малогабаритного спектрометра с ПЗС-линейкой. Созданы макетные образцы спектрофотометров в обоих вариантах. На базе полихроматического светодиодного источника могут быть созданы дешевые и удобные колориметры для аналитических применений с улучшенными характеристиками по степени монохроматичности излучения и набору возможных длин волн.

Разработан модульный спектрометрический комплекс для учебных и научных приложений, который предназначен для выполнения лабораторных практикумов студентами физических, химических, биологических, медицинских и инженерных специальностей по спектроскопии, лазерной физике и технике, по аналитическим методам исследования и другим дисциплинам, требующим использования спектроскопической аппаратуры, а также для выполнения научно-исследовательских работ. Комплекс включает набор компактных модулей: малогабаритный спектрометр с регистрацией на основе ПЗС; сверхкомпактный спектрометр с оптоволоконным вводом; ПЗС-камеру (в бескорпусном исполнении); спектрофотометрический модуль; люминесцентный модуль; модуль комбинационного рассеяния.

Разработаны варианты построения светосильных малогабаритных спектрометров, в которых улучшение характеристик по спектральному разрешению достигается за счет существенного снижения оптических aberrаций, в первую очередь связанных с наклонным падением пучков на вогнутые коллиматорные и камерные зеркала, – астигматизма и комы (А. Г. Купреев, И. М. Гулис). Детально проанализированы два подхода. В первом [35, 36] сокращение астигматизма достигается модификацией схемы Черни – Тернера путем введения в расходящийся пучок на участке между входной щелью и коллиматорным объективом плоскопараллельной пластинки с соответствующими толщиной и наклоном к оптической оси, чем достигается компенсация астигматизма, вносимого наклонным падением пучка на зеркала спектрометра. Во втором варианте [37] предложена новая оптическая схема светосильного компактного спектрометра, построенного на основе сферической зеркальной оптики и предназначенного для работы с линейным фотоприемником (диодная или ПЗС-линейка) и оптоволоконным вводом излучения, в котором резко снижены aberrации астигматизма и комы за счет применения осесимметричного прохождения пучков и вывода пучков, идущих к фотоприемнику, из плоскости дисперсии прибора. Разработана также оптическая схема дисперсионного решеточного спектрометра, позволяющая в 2–3 раза уменьшить линейные размеры спектрометров при сохранении светосилы и спектрального разрешения. Схема основана на использовании призмных расширителей пучков камерного и коллиматорного объективов, обеспечивающих сокращение расходимости пучков в плоскости дисперсии и тем самым увеличение «эффективных» фокусных расстояний при практически неизменных геометрических. Новые спектральные приборы с улучшенными характеристиками перспективны для использования в малогабаритных (в том числе портативных) спектрометрах для аналитических применений в атомно-эмиссионном спектральном анализе, а также в качестве модулей малогабаритных систем для КР-спектроскопии.

Разработан спектрометрический комплекс для спектрально-кинетических измерений в наносекундном временном диапазоне (Е. С. Воропай, М. П. Самцов, Ф. А. Ермалицкий, К. Н. Каплевский, А. Е. Радько, К. Н. Шевченко). В основу его функционирования положен статистический одноквантовый метод временного анализа нестационарных потоков люминесценции, которая возбуждается излучением импульсного источника. Структурно спектрофлуориметр состоит из трех функционально законченных частей: оптико-электронной системы, электронного блока и персонального компьютера. В качестве источника возбуждения в базовом варианте использована газоразрядная импульсная лампа оригинальной конструкции, частота следования импульсов которой может плавно регулироваться. Основные характеристики комплекса: спектральный диапазон возбуждения 220–800 нм, регистрации 270–800 нм, временной диапазон 0,5–120 нс, минимальное время разрешения 2×10^{-10} с. Совместно с предприятием «Оптрон» освоена малая серия приборов. На основе разработанной конструкторской документации комплекс производится по заказам потребителей.

Совместно с ЗАО «Спектроскопические системы» создан атомно-эмиссионный спектрометр ЭМАС-200Д – многоканальный спектрометр с дуговым, искровым или плазменным источником возбуждения спектра; он позволяет одновременно регистрировать до 200 линий и фоновых областей в спектре, что практически снимает проблему межэлементной интерференции и дает возможность использовать прибор для определения элементов в материалах сложного состава (металлы, сплавы, почва, вода, биологические и пищевые продукты и т. п.). Спектрометр аттестован как средство измерения в Государственном комитете по стандартизации Республики Беларусь и обеспечивает одновременный анализ спектров 70 элементов таблицы Менделеева, обладает пределом чувствительности 10^{-5} % при времени выполнения определения не более 5 мин.

На кафедре ведутся работы по созданию аппаратуры для *спектроскопии с пространственным разрешением*, которая обеспечивает возможность получения для каждой малой области изображения объекта оптического спектра, характеризующего данную область. Методы получения гиперспектральных изображений, мультizonальной (мультиспектральной) съемки являются исключительно высокоинформативными и широко распространены в медицинской диагностике, дистанционном мониторинге земной поверхности, сельском хозяйстве, криминалистике, полиграфии, текстильной промышленности, цветометрии, искусствоведении, астрономии, военных целях. Принципиально новые возможности для создания гиперспектрометров открываются на основе использования микроэлектромеханических систем (МЭМС), в частности пространственных модуляторов света с микрозеркальными матрицами. На базе выполненных исследований создан гиперспектрометр с управляемой входной апертурой, в котором в качестве оперативно реконфигурируемого пространственного модулятора света использована МЭМС на основе микрозеркальной матрицы (1024×768 элементов) [38, 39]. Прибор обеспечивает работу в спектральном диапазоне 400÷900 нм с разрешением до 0,8 нм, имеет два канала (спектроскопический и наблюдательный) с регистрацией изображений на КМОП-матрицах и позволяет в интерактивном режиме регистрировать как гиперспектр исследуемой области в целом, так и наборы спектров от произвольно задаваемых фрагментов.

Еще одно развиваемое на кафедре направление в области спектроскопии с пространственным разрешением – разработка монохроматоров изображения, позволяющих проводить регистрацию квазимонохроматических изображений исследуемых объектов для перспективного использования в системах авиационно-космического дистанционного зондирования. Предложен метод регистрации мультizonальных снимков с варьируемым спектральным разрешением и выбором спектральных полос, основанный на использовании дисперсионного двойного монохроматора с вычитанием дисперсии в режиме обратного прохождения [40]. Основные характеристики прибора: рабочий спектральный диапазон 400–800 нм; число регистрируемых спектральных интервалов – 30–40 при ширине выделяемой спектральной полосы 10–12 нм. Другое решение системы, позволяющей получать набор квазимонохроматических изображений объекта как последовательно по времени (в режиме монохроматора изображения), так и одновременно (в режиме «спектрометра изображения» – регистратора гиперкуба), основано на схеме, в которой коллиматорный объектив дисперсионного спектрометра выполняет функции входного объектива системы формирования изображения объекта; оно локализуется вблизи диспергирующего элемента, а затем передается камерным и изображающим объективами на двумерный фотоприемник таким образом, что картина входного поля наблюдается через узкую щель монохроматора.

В стадии разработки находятся конфокальный микроспектрометр с адресацией зондирующего луча и управлением полевой апертурой при помощи микрозеркальной матрицы (МЗМ) – перспективный для медико-биологических исследований, а также монохроматор-спектросинтезатор, в котором выбор «открытых» столбцов на равномерно освещенной широкополосным источником МЗМ формирует набор спектральных компонент, при этом малое время переключения микрозеркал (≈ 30 мкс) обеспечивает реализацию динамических режимов работы спектросинтезатора (спектроскопия ближнего ИК-диапазона, колориметрия, метрология).

Ведутся работы по созданию видео-микроспектрометрического комплекса, предназначенного для анализа спектральных характеристик объектов большого размера и сложной неоднородной структуры с пространственным разрешением в целях идентификации образцов в криминалистике, полиграфии, геологии, биологической и медицинской микроскопии (гистологии), а также для обучения студентов и специалистов современным методам мультizonальной (мультиспектральной) съемки и локальной спектроскопии.

В рамках задания ГКНТ создан принципиально новый, не имеющий отечественных и зарубежных аналогов метод защиты полиграфической продукции от фальсификации, основанный на использовании люминесцентных защитных волокон с поляризационно-контролируемым чередованием цвета свечения. Промышленный выпуск люминесцирующих волокон в количестве 1,5 т в год осуществляется на опытной установке ПО «Химволокно» (г. Светлогорск). Унитарное предприятие «Бумажная фабрика»

Гознака (г. Борисов) изготавливает в год 1500 т документной бумаги, содержащей разработанные волокна. Создан также прибор для идентификации люминесцентного волокна с поляризационно-контролируемым чередованием цвета свечения. Разработана конструкторская документация портативного поляризационного люминесцентного микроскопа ППЛМ-02-05 и произведен промышленный выпуск малой серии прибора.

Под руководством заведующего кафедрой профессора Е. С. Воропая активно ведутся исследования по созданию *новых фотоактивных препаратов для фотодинамической терапии онкозаболеваний*. Фотодинамическая лазерная терапия относится к числу особо перспективных методов лечения, ее развитию уделяется большое внимание в ведущих онкологических центрах мира. Метод основан на использовании препаратов (фотосенсибилизаторов), которые, будучи относительно нетоксичными, приобретают выраженные цитотоксические свойства при возбуждении светом. В настоящее время фототерапия злокачественных новообразований с использованием в качестве фотосенсибилизаторов в основном соединений порфиринового ряда широко используется во многих странах. Дальнейшие успехи фототерапии связывают с использованием нового поколения фототерапевтических препаратов, полосы поглощения которых находятся в области «фототерапевтического окна» в спектральном диапазоне 650–1000 нм. В этой области поглощение света компонентами биотканей, такими как гемоглобин, меланин и вода, минимально, а глубина проникновения света в ткань лимитируется в основном рассеянием. Поэтому использование для фототерапии излучения данного спектрального состава обусловлено ориентацией на высокую эффективность лечения не только поверхностных, но и глубоко расположенных опухолей.

Перспективными для создания новых типов фотосенсибилизаторов являются трикарбоцианиновые красители, которые относятся к классу полиметиновых (цианиновых). Исследования этих соединений выполнялись несколькими группами ученых: из БГУ и НИИ ПФП БГУ (Е. С. Воропай, М. П. Самцов, А. П. Луговский, К. Н. Каплевский, А. А. Луговский, Л. С. Ляшенко, Д. Г. Мельников, А. Е. Радько, К. Н. Шевченко); из НИИ ОМР (Э. А. Жаврид, Ю. П. Истомин, Е. Н. Александрова, Г. И. Коробцова, В. Н. Чалов). Отдельные работы проводились совместно с НФЦ УП «Белмедпрепараты» (Т. Н. Трухачева и др. под общим руководством П. Т. Петрова), а также с французскими исследователями из Онкологического центра имени Алексиса Вотрена (Ф. Гийоме, Ж. Диделон, Л. Болотина) [41–43]. В последнее время основные работы по доведению препаратов до практического использования выполняются сотрудниками БГУ и НИИ ПФП БГУ, НИИ ОМР, а также специалистами ИБОХ НАН Беларуси под руководством П. Т. Петрова [44].

Разрабатываемые полиметиновые красители (ПК) имеют преимущества перед используемыми в настоящее время соединениями порфиринового ряда. Цианиновые красители характеризуются максимальным поглощением света в более длинноволновой области (700–900 нм), высоким молярным коэффициентом поглощения ($>10^5 \text{ M}^{-1} \text{ см}^{-1}$); некоторые соединения этого ряда проявляют выраженные фототоксические свойства и способность избирательного накопления в опухолевых клетках. Синтезированные соединения представляют собой красители с тремя виниленовыми группами в полиметиновой цепочке и различными заместителями [45, 46]. Синтез некоторых соединений проводился также на базе НФЦ «Белмедпрепараты». Основной объем проведенных исследований относится к красителю с условным названием ТИКС (трикарбоцианиновый индолениновый краситель-фотосенсибилизатор), на основе катиона этого красителя синтезированы три соединения с анионами I, Vg и VF_4 .

Для определения механизмов взаимодействия красителей с различными биоструктурами были проведены исследования спектрально-люминесцентных характеристик молекул в различных растворителях и с разными физическими свойствами (полярностью, вязкостью и др.). Катионные ПК могут находиться в растворах в виде равновесной смеси различных ионных форм (свободных ионов, контактных и сольватно разделенных ионных пар) и не полностью ионизированных молекул. Равновесие между этими формами может сдвигаться в сторону одной из них при изменении температуры, природы растворителя, при замене аниона, введении в раствор ионных и сольватирующих добавок. Проведенный анализ позволил заключить, что индотрикарбоцианиновые красители в малополярных растворителях могут находиться в виде различных ионных форм, которые проявляются в электронных спектрах поглощения и испускания, спектрах возбуждения испускания, поляризационных спектрах, во влиянии на квантовый выход и длительность флуоресценции. Присутствие в растворах равновесной смеси контактных ионных пар и свободных ионов влияет на положение и вероятности переходов не только первого возбужденного, но и более высоких синглетных состояний катионных трикарбоцианиновых красителей. Установлено, что состояние ионных равновесий полиметиновых красителей в малополярных средах может в значительной степени повлиять на фотостабильность этих соединений. В растворах, где равновесие в большей степени смещено в сторону ПК в виде контактных ионных пар, наблюдаются более высокие значения квантового выхода фотодеструкции и генерации синглетного кислорода.

Детально исследованы особенности флуоресценции ПК в биотканях, что явилось основой для разработки методов диагностики областей локализации новообразований и определения эффективности фотовоздействия.

Собственная люминесценция биологических тканей в спектральном диапазоне 700–900 нм существенно затрудняет корректную регистрацию спектра флуоресценции ПК в таких системах. Успешное решение этой проблемы может быть обеспечено выбором фотосенсибилизатора и длины волны источника возбуждающего излучения. Так, в спектре флуоресценции опухолевой ткани интактной крысы имеется ярко выраженный максимум на длине волны 705 нм, обусловленный наличием эндогенных порфиринов, молекулы которых достаточно эффективно возбуждаются излучением с длиной волны 632,8 нм. Сигнал биоткани сопоставим с сигналом флуоресценции фотосенсибилизатора. При возбуждении более длинноволновым излучением ($\lambda = 683$ нм) наблюдается уменьшение мешающего фонового сигнала не менее чем в 10 раз.

В экспериментах *in vitro* было установлено, что максимальное накопление ПК в клетках наблюдается спустя 2 часа после начала инкубации, падение концентрации красителя в процессе фотовоздействия связано с его фотодеструкцией, а уменьшение плотности мощности возбуждающего излучения способно существенно повысить фототоксичность ПК при постоянной дозе света.

Важной особенностью фотосенсибилизаторов на основе ПК является сохранение их фотоактивности в условиях гипоксии. С помощью методов фемтосекундной спектроскопии были установлены процессы сверхбыстрого переноса заряда в контактных ионных парах, вследствие чего происходит образование свободных радикалов, которые, вероятнее всего, и обуславливают фотоактивность препаратов в условиях гипоксии.

Наиболее существенной характеристикой ПК в качестве препаратов для фотодинамической фототерапии онкозаболеваний является возможность применения излучения, для которого пропускание биотканей максимально. Установлено, что при фотовоздействии на трикарбоцианиновые красители в клетках *HeLa* квантами света разной энергии при обеспечении условия поглощения фотосенсибилизатором одинакового количества фотонов в единицу времени повреждение клеток происходит с одинаковой эффективностью. В экспериментах на животных *in vivo* для двух штаммов опухолей при изменении длины волны фотовоздействия в диапазоне от 668 до 780 нм и поддержании одинакового числа поглощенных квантов света в единицу времени в единицу объема опухолей глубина их повреждения возрастает в 3 раза. Наблюдаемые изменения связаны как с различием в пропускании тканей *in vivo* при увеличении длины волны светового излучения, так и с ростом локальной концентрации кислорода. *In vivo* показано, что средняя глубина повреждения перевиваемых опухолей штамма Са М-1 крыс при фотодинамической терапии растет с увеличением длины волны возбуждающего света. Отличия в глубине повреждения опухолей при использовании источников с разными длинами волн определяются как различием в пропускании тканей, так и различной эффективностью фотодиссоциации комплексов гемоглобина в кровеносных сосудах. Таким образом, показана высокая эффективность воздействующего излучения с максимумом на 780 нм при проведении фотохимиотерапии с трикарбоцианиновым красителем.

Для регистрации спектров флуоресценции в видимом и ближнем ИК-диапазоне разработан комплекс аппаратуры, ориентированный на применение в условиях *in vivo*. В стандартной комплектации в качестве источника света используется полупроводниковый лазер с длиной волны 682 нм. При таком возбуждении при применении препаратов на основе индотрикарбоцианиновых красителей аппаратура позволяет проводить флуоресцентную диагностику области локализации злокачественных опухолей как на поверхности, так и на глубине до 10–20 мм в тканях тела. Реализованы следующие основные режимы работы комплекса: регистрация спектров излучения в спектральном диапазоне 400–950 нм; регистрация интенсивности излучения на трех длинах волн; управление параметрами источника света. Аппаратура выполнена в виде настольного прибора, работающего под управлением персонального компьютера. Разработанное оборудование предназначено для определения области локализации раковых опухолей в биологических объектах, которая диагностируется по регистрации флуоресценции фотосенсибилизатора.

На кафедре совместно с НИИ ПФП БГУ создан комплекс для фотохимиотерапии, позволяющий проводить анализ распределения фотосенсибилизаторов с флуоресценцией в спектральном диапазоне 700–950 нм в состоянии *in vivo* и управлять источником излучения для фототерапевтического воздействия. Источник на основе специального светодиода позволил использовать излучение в полосе поглощения фотосенсибилизатора, находящейся в окне прозрачности биологических тканей. Для наблюдения за динамикой накопления фотосенсибилизатора в опухолевых узлах с помощью спектрометра с оптоволоконным вводом излучения ведутся регистрации и анализ спектров флуоресценции. В настоящее время разработанный комплекс аппаратуры применяется в работах по созданию

перспективного отечественного фотосенсибилизатора на основе индотрикарбоцианиновых красителей. Работы ведутся в БГУ совместно с ИБОХ НАН Беларуси и НИИ ОМР в рамках ГПНИ «Фундаментальная и прикладная медицина».

С 2007 г. под руководством профессоров А. П. Загогина и Е. С. Воропая ведутся исследования и методические разработки в области *лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии* – метода элементного анализа состава многокомпонентных объектов, основанного на испарении вещества и возбуждении эмиссионных спектров атомов излучением лазерных импульсов. Исследования проводятся на двухимпульсном лазерном атомно-эмиссионном спектрометре LSS-1 (производство совместного белорусско-японского предприятия «LOTIS-Tii»), в создании которого непосредственное участие принимал А. П. Загогин, а также выпускники кафедры В. А. Кононов, Н. Н. Васильев, С. Н. Исаков. Характерной особенностью данного прибора является возможность работать как в одноимпульсном, так и в двухимпульсном режиме, что позволяет детально исследовать особенности взаимодействия распространяющейся плазмы с лазерным излучением. Кроме того, использование сдвоенных лазерных импульсов позволяет значительно повысить уровень аналитического сигнала без существенного увеличения деградации поверхности образца, что приводит к повышению чувствительности анализа и снижению его погрешности. Установлено, что использование сдвоенных лазерных импульсов, разделенных микросекундными интервалами, обеспечивает ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами возбуждения спектров (высокая локальность отбора пробы; малые – $\sim 10^{-11} \div 10^{-10}$ г – количества вещества, испаряемого за один лазерный импульс; незначительная зависимость процесса испарения материала от физико-химических свойств вещества; возможность анализа без предварительной химической и механической обработки образцов; применимость метода к широкому классу веществ, в том числе и неметаллов; высокая чувствительность $\sim 10^{-4}$ %. Эти особенности делают двухимпульсную лазерную атомно-эмиссионную спектроскопию предпочтительным методом малодеструктивного анализа биообъектов, предметов искусства, артефактов, ювелирных изделий, готовых промышленных изделий, функциональных и защитных тонких покрытий.

А. П. Загогиным и М. П. Патапович совместно с сотрудниками Ботанического сада НАН Беларуси разработаны методы определения содержания тяжелых металлов, а также компонентов противогололедных реагентов в коре деревьев и проведен сравнительный анализ образцов из мест с различной экологией (Ботанический сад НАН Беларуси, Березинский биосферный заповедник, центральные улицы г. Минска). Разрабатываются методы анализа продуктов питания, как животного, так и растительного происхождения, без предварительной пробоподготовки. Для создания перспективных методов экспресс-анализа состояния обмена макро- и микроэлементов в организме совместно с сотрудниками РНПЦ психического здоровья и РНПЦ неврологии и нейрохирургии проводятся экспериментальные исследования распределения элементов в образцах волос по их длине с помощью локального лазерно-эмиссионного спектрального анализа.

Технологический контроль процессов переработки жидких радиоактивных отходов требует постоянного аналитического сопровождения. Использование метода со сдвоенными лазерными импульсами для образцов в форме высушенных на бумажном фильтре растворов соединений урана показало, что он перспективен для количественного анализа сухих остатков различных растворов, содержащих уран, и дает возможность определения содержания урана с высокой чувствительностью (порядка $10^{-2} \div 10^{-4}$ % U).

Установлено, что при использовании методов двухимпульсного лазерного воздействия при различных углах падения на мишень и плазму возможно одновременное проведение высокочувствительного спектрального анализа, контроля концентрации возбужденных и заряженных частиц плазмы и управления составом плазмы, направляемой на подложку. Подход основан на применении высокоинтенсивных сдвоенных лазерных импульсов для распыления (абляции) исходной мишени непосредственно в воздухе. Возникающий плазменный факел характеризуется высокой температурой, давлением и способен обеспечить интенсивный поток частиц желаемой энергии на близко расположенную подложку при минимальном влиянии окружающей атмосферы. С технологической точки зрения отказ от вакуумного оборудования позволяет не только упростить и удешевить процесс, но и существенно расширяет возможности нанесения покрытий на изделия большого размера и/или сложной геометрии. Определены условия получения методом абляции сериями сдвоенных лазерных импульсов алюминиевых мишеней в воздушной атмосфере нанокластеров алюминия и/или соединений алюминия типа AlN, AlO для использования в технологиях напыления тонких пленок. Аналогичные работы ведутся и для получения нитридов и окислов Ti.

В ходе исследования процессов, происходящих в распространяющейся плазме, возбуждаемой сдвоенными лазерными импульсами, была обнаружена пространственная и временная неоднородность многокомпонентного абляционного парогазового облака, установлены закономерности разлета элемен-

тов в зависимости от их теплофизических свойств, выявлены особенности образования многозарядовых ионов, кластеров и фрактальных комплексов в плазме [47].

К. Ф. Ермалицкой и А. П. Зажогиним разработаны методы, позволяющие определять содержание бериллия в бериллиевых бронзах, кремния и углерода в сталях. Созданы методики малодеструктивного количественного анализа готовых промышленных изделий сложной формы из специальных латуней, оловянистых и бериллиевых бронз, дюралюминия, углеродистых сталей и чугунов. Предложен метод управления толщиной испаряемого слоя путем изменения плотности потока излучения при расфокусировке лазерного луча. Показана возможность регистрации сигнала от плазмы, испаренной с большой ($\sim 1 \div 3$ мм²) площади поверхности, в этом случае аналитический сигнал в несколько раз превышает уровень фона даже при толщине испаряемого слоя в 0,1 мкм, что позволяет проводить послойный анализ тонких слоев материала с субмикронным разрешением. А. П. Зажогин, К. Ф. Ермалицкая разработали метод прямого послойного анализа с субмикронным разрешением микронных латунных и бронзовых покрытий стальной бортовой проволоки и металлокорда (производство РУП «Белорусский металлургический завод», г. Жлобин), используемый при изготовлении автомобильных шин. Предложена методика анализа с субмикронным разрешением многослойного TiAlN/TiN-покрытия сверлильного и режущего инструмента (Guhring, Германия). К. Ф. Ермалицкой разработана аналитическая методика и проведен анализ серебряных монет XVI в., изготовленных на Рижском монетном дворе.

Кафедра лазерной физики и спектроскопии встречает свое 60-летие как динамично развивающийся коллектив, состоящий из авторитетных и активно работающих профессоров и молодых преподавателей и сотрудников. На кафедре выполняются проекты фундаментальной и прикладной направленности в рамках широкого круга научных и научно-технических программ, а также международные проекты. По результатам исследований публикуется более 120 статей в год, представляется более 60 докладов на конференции и совещания, свыше 80 % – совместно с аспирантами, магистрантами, студентами. Все это позволяет с оптимизмом оценивать перспективы кафедры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Степанов Б. И. Люминесценция сложных молекул. Минск, 1955.
2. Степанов Б. И. Основы спектроскопии отрицательных световых потоков. Минск, 1961.
3. Борисевич Н. А. Возбужденные состояния сложных молекул в газовой фазе. Минск, 1967.
4. Володько Л. В., Комяк А. И., Умрейко Д. С. Ураниловые соединения. Минск, 1981.
5. Гулис И. М., Комяк А. И., Томин В. И. Перенос энергии электронного возбуждения в условиях неоднородного уширения уровней // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1978. Т. 42. № 2. С. 307.
6. Горбачевич С. К., Гулис И. М., Комяк А. И., Миксюк Ю. И. Особенности спектрально-кинетических характеристик замедленного свечения сложных молекул в условиях неоднородного уширения уровней энергии // Журн. прикл. спектр. 1982. Т. 37. № 1. С. 92.
7. Гулис И. М., Комяк А. И., Миксюк Ю. И., Цвирко В. А. Пикосекундная динамика реакции фотопереноса протона в полярных растворах органических красителей // Журн. прикл. спектр. 1992. Т. 56. № 1. С. 54.
8. Бутько А. И., Воропай Е. С., Гайсёнок В. А., Саечников В. А., Саржевский А. М. Особенности проявления межмолекулярной релаксации в спектрально-люминесцентных характеристиках растворов сложных молекул в условиях светового тушения люминесценции // Опт. и спектр. 1982. Т. 52. № 2. С. 253–257.
9. Бахшиев Н. Г., Воропай Е. С., Гайсёнок В. А., Гирин О. П., Саржевский А. М. Влияние процессов межмолекулярной релаксации на спектры поглощения и излучения растворов при интенсивном оптическом возбуждении // Опт. и спектр. 1981. Т. 50. № 6. С. 1117–1123.
10. Гулис И. М., Комяк А. И., Саечников К. А. Фотофизика ван-дер-ваальсовских комплексов сложных молекул в сверхзвуковой струе // Журн. прикл. спектр. 1995. Т. 62. № 6. С. 140.
11. Воропай Е. С., Гайсёнок В. А., Дударев И. А., Колев И. Н., Саржевский А. М. Концентрационная деполаризация флуоресценции при возбуждении интенсивными световыми потоками // Журн. прикл. спектр. 1977. Т. 26. № 4. С. 678–686.
12. Воропай Е. С., Саржевский А. М. Поляризация двухфотонно-возбуждаемой флуоресценции // Опт. и спектр. 1972. Т. 33. № 3. С. 486–489.
13. Воропай Е. С., Жолнеревич И. И., Саржевский А. М. Расчет поляризации двухфотонно-возбуждаемой флуоресценции при произвольной ориентации осцилляторов поглощения и испускания // Журн. прикл. спектр. 1973. Т. 19. № 4. С. 730–733.
14. Воропай Е. С., Саечников В. А. Световое тушение люминесценции сложных органических молекул и его изменение (обзор) // Журн. прикл. спектр. 1989. Т. 51. № 3. С. 382–402.
15. Воропай Е. С., Кирсанов А. А., Самцов М. П. Влияние температуры на генерацию полиметиновых красителей // Журн. прикл. спектр. 1993. Т. 58. № 3-4. С. 484–488.
16. Воропай Е. С., Самцов М. П., Чалов В. Н., Жаврид Э. А. Флуоресценция полиметинового красителя ТИКС и диагностика рака // Журн. прикл. спектр. 2001. Т. 68. № 3. С. 359–362.
17. Voropay E. S., Samtsov M. P., Lugovskiy A. P., Zhavrid E. A., Aleksandrova E. N., Zhuravkin I. N. Evaluation of five new trikarbocyanine dyes for photodynamic therapy // Experimental Oncology. 1997. № 1. P. 56–60.
18. Kabanov V. V., Rubanov A. S., Tolstik A. L., Chaley A. V. Optical multistability from four-wave mixing in a resonant medium // Opt. Commun. 1989. Vol. 71. № 3-4. P. 219–223.
19. Толстик А. Л. Многоволновые взаимодействия в растворах сложных органических соединений. Минск, 2002.
20. Agishev I. N., Ivanova N. A., Tolstik A. L. Control of optical bistability and complex dynamics of a nonlinear interferometer // Opt. Commun. 1998. Vol. 156. № 3. P. 199–209.

21. Романов О. Г., Толстик А. Л. Пространственно-временные структуры световых полей в нелинейных интерферометрах. Минск, 2009.
22. Мельникова Е. А., Сташкевич И. В., Толстик А. Л., Чалей А. В. Динамические режимы работы оптоэлектронной системы связанных дифракционных элементов // Изв. РАН. Сер. физ. 1992. Т. 56. № 8. С. 87–90.
23. Rubanov A. S., Tolstik A. L., Karpuk S. M., Ormachea O. Nonlinear formation of dynamic holograms and multiwave mixing in resonant media // Opt. Commun. 2000. Vol. 181. № 1-3. P. 183–190.
24. Ormachea O., Romanov O. G., Tolstik A. L., Arce Diego J. L., Fanjul Vélez F., Pereda Cubián D. Frequency up-conversion of coherent images by intracavity nondegenerate four-wave mixing // Opt. Express. 2006. Vol. 14. № 18. P. 8298–8304.
25. Агишев И. Н., Толстик А. Л. Высокоэффективная дифракция на тонких и объемных динамических голограммах в линейных поглотителях // Изв. РАН. Сер. физ. 2008. Т. 72. № 12. С. 1735–1738.
26. Романов О. Г., Толстик А. Л. Многоволновые взаимодействия сингулярных световых пучков в резонансных средах // Опт. и спектр. 2008. Т. 105. № 5. С. 812–817.
27. Толстик А. Л. Динамическая голография сингулярных световых пучков // Весці НАН Беларусі. 2013. № 2. С. 44–48.
28. Gorbach D. V., Tolstik A. L., Romanov O. G. Transformation of topological structure of optical vortices upon frequency non-degenerate four-wave mixing // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. 2009. Vol. 12. № 1. P. 68–74.
29. Романов О. Г., Горбач Д. В., Толстик А. Л. Преобразование оптических вихрей поляризаационными динамическими голограммами // Опт. и спектр. 2013. Т. 115. № 3. С. 383–388.
30. Горбач Д. В., Романов О. Г., Сухоруков А. П., Толстик А. Л. Формирование динамических волноводных структур в средах с тепловой и резонансной нелинейностью // Изв. РАН. Сер. физ. 2011. Т. 75. № 12. С. 1733–1736.
31. Matusевич А., Толстик А., Kisteneva M., Shandarov S., Matusевич V., Kiessling A., Kowarschik R. Investigation of photo-induced absorption in a $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ crystal // Appl. Phys. B. 2008. Vol. 92. № 2. P. 219–224.
32. Казак А. А., Мельникова Е. А., Толстик А. Л., Могильный В. В., Станкевич А. И. Управляемые дифракционные жидко-кристаллические структуры на основе полимерного фотоориентанта // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. № 20. С. 1–7.
33. Воропай Е. С., Гулис И. М., Глушков Д. В., Каплевский К. Н., Купреев А. Г. Спектрофотометр с многоэлементным светодиодным источником // Вестн. БГУ. Сер. 1. 2006. № 2. С. 3–7.
34. Воропай Е. С., Гулис И. М., Серафимович А. И., Глушков Д. В., Каплевский К. Н., Купреев А. Г., Василёнок Г. Д. Компактный спектрометр комбинационного рассеяния // Спектральные приборы для аналитических применений. Перспективные разработки. Минск, 2005. С. 10–21.
35. Воропай Е. С., Гулис И. М., Купреев А. Г. Метод коррекции астигматизма в спектральных приборах с помощью наклонной плоскопараллельной пластинки // Вестн. БГУ. Сер. 1. 2007. № 3. С. 12–18.
36. Воропай Е. С., Гулис И. М., Купреев А. Г. Коррекция астигматизма светосильного дисперсионного спектрометра // ЖПС. 2008. Т. 75. № 1. С. 143–148.
37. Гулис И. М., Купреев А. Г. Светосильные дисперсионные спектрометры с зеркальными объективами // Вестн. БГУ. Сер. 1. 2008. № 3. С. 11–15.
38. Воропай Е. С., Гулис И. М., Купреев А. Г., Каплевский К. Н., Костюкевич А. Г., Радько А. Е., Шевченко К. А. Дисперсионный гиперспектрометр с реконфигурируемой входной апертурой на основе микрозеркальной матрицы // Вестн. БГУ. Сер. 1. 2009. № 3. С. 31–35.
39. Воропай Е. С., Гулис И. М., Купреев А. Г., Каплевский К. Н., Костюкевич А. Г., Радько А. Е., Шевченко К. А. Мультиобъектный спектрометр с микрозеркальной матрицей // ЖПС. 2010. Т. 77. № 2. С. 305–312.
40. Гулис И. М., Купреев А. Г., Костюкевич А. Г. Двойной монохроматор изображения с вычитанием дисперсии // Вестн. БГУ. Сер. 1. 2011. № 2. С. 19–23.
41. Voropaу E. S., Istomin Y. P., Alexandrova E. N., Zhavrid E. A., Samtsov M. P., Kaplevsky K. N., Lugovsky A. A. The effect of hypoxia on photocytotoxicity of TICS tricarbo-cyanine dye in vitro // Experimental oncology. 2006. Vol. 28. № 1. P. 80–82.
42. Воропай Е. С., Самцов М. П., Каплевский К. Н., Мельников Д. Г., Ляшенко Л. С. Фотодинамическая лазерная терапия и диагностика областей локализации на основе новых типов фотосенсибилизаторов // Изв. РАН. Сер. физ. 2007. Т. 71. № 1. С. 145–149.
43. Самцов М. П., Воропай Е. С., Ляшенко Л. С., Мельников Д. Г., Каплевский К. Н., Луговский А. П. Флуоресценция фотосенсибилизатора на основе индотрикарбоцианинового красителя при фотохимиотерапии // Журн. прикл. спектр. 2011. Т. 78. № 1. С. 121–127.
44. Воропай Е. С., Самцов М. П., Петров П. Т. Перспективные фотосенсибилизаторы для фотодинамической лазерной терапии // Ars. Medica. 2012. Т. 66. № 11. С. 89–93.
45. Патент на изобретение № 15767 ВУ. Фотосенсибилизатор для фотодинамической терапии злокачественных опухолей / М. П. Самцов, А. П. Луговский, Е. С. Воропай, П. Т. Петров, А. А. Луговский, Д. И. Демид, Л. С. Ляшенко, Е. Н. Александрова, Ю. П. Истомин // Нац. центр інтелектуал. уласнасці. 2012. № 2. С. 105.
46. Патент на изобретение № 15152 ВУ. Активируемое инфракрасным светом средство подавления стафилококковой и грибковой активности / Л. П. Титов, Т. С. Ермакова, М. П. Самцов, А. П. Луговский, Д. Г. Мельников, А. А. Луговский, Е. С. Воропай, Л. С. Ляшенко // Нац. центр інтелектуал. уласнасці. 2011. Т. 83. № 6. С. 73.
47. Voropaу E. S., Ermalitskaia K. F. Spatial heterogeneity of double pulse laser induced plasma of copper alloys // European Phys. J. D. 2011. Vol. 64. P. 453–458.

Поступила в редакцию 24.05.13.

Евгений Семенович Воропай – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой лазерной физики и спектроскопии.

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

Анатолий Иванович Комяк – доктор физико-математических наук, профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии.

Алексей Леонидович Толстик – доктор физико-математических наук, профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии, проректор по учебной работе.