

Оригинальная статья / Original article

УДК 535.853: 535.3: 535.37

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-3-80-90>

Применение метода спектральной селекции для анализа пространственных неоднородностей в светорассеивающих и люминесцирующих средах

П.В. Абакумов¹, И.В. Локтионова²✉

¹ Курский государственный медицинский университет
ул. К. Маркса, д. 3, г. Курск 305041, Российская Федерация

² Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: ms.chuhaeva@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Апробация метода спектральной селекции с использованием узкополосных интерференционных фильтров для анализа пространственных неоднородностей в светорассеивающих и люминесцирующих средах на примере астрофизических объектов различной природы.

Методы. Исследования проводились с использованием специализированного оптического комплекса на основе цветной охлаждаемой ПЗС-камеры QHY 533с и селективного интерференционного фильтра Svbony SV220 (линии $\text{H}\alpha$ и OIII). Применялись две оптические схемы: широкопольная конфигурация с телескопом 200 мм f/4 для изучения крупномасштабной структуры и высокорешающая конфигурация с астрографом Askar FRA 500 (500 мм f/5,6) для детального анализа морфологии. Для обработки данных использовалось специализированное программное обеспечение с реализацией алгоритмов фотометрической калибровки и мозаичного сложения.

Результаты. Для люминесцирующей среды (IC 1805) получено пространственное разрешение $\sim 0,04$ пк/пиксель, позволившее идентифицировать структуры протяженностью в десятки тысяч а.е. и оценить динамическое давление звездного ветра ($\sim 10^{-11}$ Па). Для светорассеивающей среды (LBN 667) достигнуто разрешение ~ 600 а.е./пиксель, что обеспечило выявление волокнистых структур субзвездного масштаба ($<0,1$ пк). Показана способность метода к селективному картированию различных компонентов среды с контрастом $>90\%$.

Заключение. Метод спектральной селекции демонстрирует высокую эффективность для диагностики пространственных неоднородностей и может быть адаптирован для решения задач материаловедения, включая анализ люминесцирующих покрытий, контроль дефектов в прозрачных средах и неразрушающий контроль многослойных структур. Перспективным направлением является разработка специализированных интерференционных фильтров для конкретных технологических применений.

Ключевые слова: спектральная селекция; интерференционные фильтры; пространственные неоднородности; люминесцирующие среды; светорассеивающие среды; ПЗС-визуализация.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Абакумов П.В., Локтионова И.В. Применение метода спектральной селекции для анализа пространственных неоднородностей в светорассеивающих и люминесцирующих средах // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2025. Т. 15, № 3. С. 80–90. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-3-80-90>.

Поступила в редакцию 06.08.2025

Подписана в печать 29.08.2025

Опубликована 30.09.2025

© Абакумов П.В., Локтионова И.В., 2025

Application of the spectral selection method for analyzing spatial inhomogeneities in scattering and luminescent materials

Pavel V. Abakumov¹, Inna V. Loktionova^{2✉}

¹ Kursk State Medical University
3 K. Marx Str., Kursk 305041, Russian Federation

² Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: ms.chuhaeva@mail.ru

Abstract

Purpose of research. Testing of the spectral selection method using narrow-band interference filters for the analysis of spatial inhomogeneities in light-scattering and luminescent media using the example of astrophysical objects of various nature.

Methods. The studies were carried out using a specialized optical complex based on a cooled color CCD camera QHY 533c and selective interference filter Svibony SV220 ($\text{H}\alpha$ and OIII lines). Two optical schemes were used: a wide-field configuration with a 200 mm f/4 telephoto lens for studying large-scale structure, and a high-resolution configuration with an Askar FRA 500 astrograph (500 mm f/5.6) for detailed morphology analysis. Specialized software with implemented algorithms for photometric calibration and mosaic composition was used for data processing.

Results. For the luminescent medium (IC 1805), a spatial resolution of ~ 0.04 pc/pixel was obtained, which made it possible to identify structures tens of thousands of AU long and estimate the dynamic pressure of the stellar wind ($\sim 10^{-11}$ Pa). For the light-scattering medium (LBN 667), a resolution of ~ 600 AU/pixel was achieved, which ensured the identification of fibrous structures of substellar scale (<0.1 pc). The method's capability for selective mapping of various environment components with contrast $>90\%$ has been demonstrated.

Conclusion. The spectral selection method demonstrates high efficiency for diagnosing spatial inhomogeneities and can be adapted for solving materials science problems, including the analysis of luminescent coatings, defect control in transparent media, and non-destructive testing of multilayer structures. The development of specialized interference filters for specific technological applications is a promising direction.

Keywords: spectral selection; interference filters; spatial inhomogeneities; luminescent media; light-scattering media; CCD imaging.

Conflict of interest: The Authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Abakumov P.V., Loktionova I.V. Application of the spectral selection method for analyzing spatial inhomogeneities in scattering and luminescent materials. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies.* 2025;15(3):80-90. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-3-80-90>.

Received 06.08.2025

Accepted 29.08.2025

Published 30.09.2025

Введение

Развитие современных технологий синтеза и обработки материалов, включая нанокомпозиты, люминесцирующие покрытия и функциональные керамики, остро ставит задачу неразрушающего контроля их пространственной структуры и состава на микро- и наноуровне [1]. Традиционные методы анализа зачастую требуют деструктивного отбора проб и не

позволяют получить трехмерную картину внутреннего строения материала в его естественном, неизмененном состоянии. Ключевой и наиболее сложной проблемой является достоверная диагностика микронных и субмикронных неоднородностей, которые являются неотъемлемым следствием технологических процессов, но при этом кардинальным образом опре-

деляют макроскопические свойства конечного продукта [2]. К таким критически важным дефектам и особенностям структуры относятся поры и микропоры, снижающие механическую прочность и герметичность материала, границы раздела фаз между матрицей и наполнителем, от качества сцепления на которых зависит прочность композита области с вариациями плотности или локального химического состава, ведущие к внутренним напряжениям и ухудшению функциональных характеристик, таких как теплопроводность или электропроводность [3].

Особую методологическую сложность представляет анализ оптически сложных сред, к которым относятся интенсивно светорассеивающие (например, керамики с поликристаллической структурой) и люминесцирующие материалы (люминофоры, защитные покрытия). В таких случаях исследователь сталкивается с необходимостью выделить крайне слабый полезный сигнал (например, от конкретной наночастицы или дефекта кристаллической решетки) на фоне мощного фонового излучения, вызванного объемным рассеянием или собственной люминесценцией матрицы. Это требует применения высокочувствительных детекторов и усложненных алгоритмов математической обработки сигналов для подавления шумов и селективного выделения искомого параметра [4].

Эффективным подходом для решения этой задачи является метод спектральной селекции, основанный на использовании узкополосных интерференционных фильтров [5]. Данный метод позволяет изолировать монохроматическое излучение, характерное для определенных атомов, ионов или молекулярных комплексов, обеспечивая высокую контрастность и специфичность визуализации [6]. Технология изготовления интерференционных

фильтров является ярким примером практического применения нанотехнологий в оптическом приборостроении [7]. Эта технология основана на последовательном нанесении тонких диэлектрических слоев с контролируемой толщиной и показателем преломления [8]. Хотя традиционно метод находит применение в астрофизике для наблюдения туманностей [9], физические принципы, лежащие в его основе, универсальны [10]. Эти принципы переносимы на широкий класс лабораторных и технологических задач [11].

Перспективным направлением является адаптация методов спектральной селекции для решения задач материаловедения и нанотехнологий. В частности, метод может быть применен для диагностики плазменных потоков в технологических установках напыления [12]. Другой важной задачей является анализ люминесценции легированных материалов и квантовых точек [13]. Метод также эффективен для визуализации тепловых полей и неоднородностей в прозрачных средах [14] и для контроля качества оптических покрытий [15]. Отдельной задачей является выявление дефектов в многослойных структурах [16]. Важным преимуществом метода является возможность дистанционного неразрушающего контроля [17]. Это особенно ценно для исследования чувствительных и деградирующих под воздействием внешних факторов материалов [18].

Газопылевые туманности служат уникальным модельным объектом для отработки и демонстрации возможностей методов спектральной визуализации [19]. Эти объекты представляют собой обширные природные комплексы ионизованной плазмы и твердых частиц. Их физика хорошо изучена, а наблюдаемые процессы рекомбинации водорода, свечения ионов кислорода и рассеяния света на пылевых частицах являются аналогами свечения и

рассеяния в лабораторных условиях, но в гигантских пространственных масштабах [20]. Процессы фотоиспарения и взаимодействия излучения с веществом в туманностях имеют прямые аналоги в технологических процессах обработки материалов лазерным излучением и плазменными потоками. Таким образом, апробация методики на таких объектах позволяет верифицировать ее разрешающую способность и эффективность для последующего применения в материаловедении.

Материалы и методы

Для проведения исследований был использован специализированный комплекс для высококонтрастной спектральной визуализации. Основными компонентами системы являются цветная охлаждаемая ПЗС-камера QHY 533с (разрешение 3008×3008 пикселей, размер пикселя 3,76 мкм, термостабилизация до -20°C относительно окружающей среды) и селективный интерференционный фильтр Svbone SV220 с двумя полосами пропускания: $\text{H}\alpha$ (центральная длина волны $\lambda = 656,3$ нм, полуширина полосы пропускания $\Delta\lambda = 7$ нм; коэффициент пропускания $T > 94\%$) и OIII ($\lambda = 500,7$ нм; $\Delta\lambda = 7$ нм; $T > 90\%$). Фильтр устанавливался непосредственно перед матрицей фотоприемного устройства для минимизации паразитной засветки.

Для исследования объектов с различной пространственной протяженностью применялись две оптические схемы. Широкопольная конфигурация на основе телекомбинатора Nikon ED AF Nikkor 80–200 mm f/2,8D обеспечивала поле зрения $3,24^{\circ} \times 3,24^{\circ}$ с угловым разрешением $3,88''/\text{пиксель}$ и использовалась для исследования крупномасштабной структуры протяженных объектов. Высокоразрешающая конфигурация на основе квинтиплетного астрографа Askar FRA 500 (500 мм, f/5,6) обеспечивала поле зрения $1,3^{\circ} \times 1,3^{\circ}$ с угловым разрешением

$1,55''/\text{пиксель}$ и применялась для детального изучения мелкомасштабной морфологии компактных объектов. Для покрытия большой площади использовалась техника мозаичной съемки (4 кадра).

Система наведения и слежения реализована на основе экваториальной монтировки Juwei-17 с гармоническими приводами по обеим осям. Для компенсации ошибок ведения использовалась система автогидирования на основе гидирующего телескопа QHY miniGuideScope (130 мм, f/4,3) и монохромной камеры QHY 5-II-M. Процесс обработки данных включал калибровку кадров (вычитание темнового тока, учет плоского поля), астрометрическую привязку и фотометрическую калибровку для каждого кадра, совмещение и интегрирование данных мозаики с использованием программного обеспечения PixInsight 1,8 и реализованных в нем алгоритмов фотометрического совмещения, построение итоговых изображений и карт распределения интенсивности в линиях $\text{H}\alpha$ и OIII .

В качестве модельных объектов для апробации методики были выбраны две контрастные по физическим свойствам среды: IC 1805 (Сердце) как пример интенсивно люминесцирующей среды (область ионизованного водорода, H II область), где доминирует процесс рекомбинационного свечения, и LBN 667 (Душа) как пример светорассеивающей среды с признаками люминесценции (отражательная туманность смешанного типа), где основными механизмами являются рассеяние света на пылевых частицах и флуоресценция.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 1 представлено изображение туманности IC 1805 («Сердце»), относящейся к протяженным областям ионизованного водорода (H II-область) в созвездии Кассиопеи. Использование телекомбинатора

тива с фокусным расстоянием 200 мм и селективных фильтров в линиях $\text{H}\alpha$ (656,3 нм) и OIII (500,7 нм) позволило получить широкопольное изображение объекта. Угловая протяжённость туманности составляет около $\theta = 1,5^\circ$, что при расстоянии порядка $d = 2$ кпк соответствует линейному размеру $1,62 \cdot 10^{18}$ м или ≈ 170

световых лет, рассчитанному по формуле $L = d\theta$. Это значение полностью согласуется с [5]. Таким образом, поле зрения охватывает всю область туманности, включая центральное звёздное скопление Melotte 15.

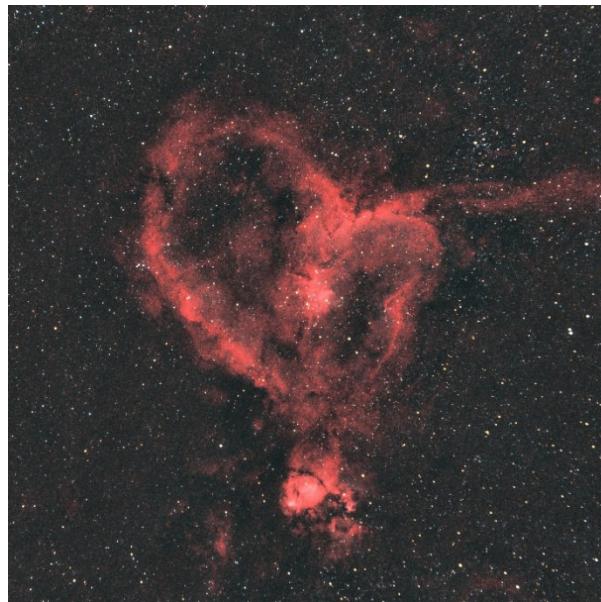


Рис. 1. Изображение туманности IC 1805 «Сердце» в линиях $\text{H}\alpha$ и OIII

Fig. 1. Image of the IC 1805 Heart Nebula in $\text{H}\alpha$ and OIII lines

Пространственное разрешение полученного изображения определяется масштабом камеры QHY 533с в данной конфигурации, составляющим 3,88" на пиксель. При расстоянии 2 кпк это соответствует линейному размеру $\sim 0,04$ пк (≈ 8000 а.е.) на один пиксель, что обеспечивает возможность различать структуры протяжённостью десятки тысяч астрономических единиц.

Фильтрация в узких диапазонах даёт дополнительное понимание физической природы объекта. В линии $\text{H}\alpha$ регистрируется протяжённое диффузное свечение, соответствующее процессам рекомбинации водорода в объёме H II -области. В линии OIII проявляются отдельные локальные структуры, что указывает на наличие

зон повышенной ионизации, формируемых ультрафиолетовым излучением горячих звёзд спектральных классов О и В. Эти различия подтверждают неоднородность межзвёздного газа и позволяют качественно выделить области с различной температурой и степенью ионизации.

На полученном изображении отчётливо видны протяжённые дуговые оболочки и яркие фронты ионизации, ориентированные по направлению к центральному звёздному скоплению. Физическая природа этих структур связана с воздействием звёздного ветра массивных звёзд на окружающий газ. Динамическое давление ветра на расстоянии r выражается формулой

$$P_w(r) = \frac{\dot{M} v}{4\pi r^2}, \quad (1)$$

где \dot{M} – скорость потери массы; v – скорость ветра. Для массивной звезды класса О обычно принимают $\dot{M} = 10^{-6}$ масс Солнца в год, а $v = 2000$ км/с [6]. Таким образом, учитывая количество массивных звезд в Melotte 15 равное 5, получаем давление ионизированного газа в H II области $P_w = 10^{-11}$ Па. Для сравнения порядка этой величины рассмотрим давление газа, создаваемое тепловым движением $p = nkT$. Приняв $n = 108$ м⁻³, $T = 8000$ К [6], получаем $p = 1,1 \cdot 10^{-11}$ Па. Это обстоятельство указывает на то, что при $r \sim 1$ пк давление ветра одной массивной звезды сравнимо с давлением плазмы, а для скопления из нескольких О-звезд оно превосходит его примерно в 4 – 5 раз. Однако обратная квадратичная зависимость динамического давления ветра от расстояния приводит к тому, что на расстоянии $r \sim 10$ пк его влияние значительно ослабевает. Таким образом, звездный ветер Melotte 15 способен эффективно формировать оболочки и дуговые структуры вблизи скопления на

масштабах до нескольких парсек, что согласуется с наблюдаемой морфологией IC 1805. На больших расстояниях доминирующую роль начинают играть давление ионизованного газа, а формирование крупномасштабной структуры определяется комбинацией таких факторов, как фотовапорация, неоднородности плотности и кумулятивное действие ударных волн.

Для исследования отражательной туманности LBN 667 «Душа» (рис. 2) был использован астрограф Askar FRA 500 с фокусным расстоянием 500 мм и камеры QHY 533с, что обеспечило угловое разрешение 1,55"/пиксель и поле зрения 1,3° × 1,3°. Для покрытия всей площади туманности и прилегающих областей было получено и смонтировано 4 перекрывающихся кадра (мозаика 2×2). Процесс совмещения и сшивки кадров выполнялся с использованием специализированного программного обеспечения PixInsight 1.8 для обработки данных, обеспечивающего точную астрометрическую привязку и фотометрическую калибровку каждого кадра перед их интегрированием [21].



Рис. 2. Изображение туманности LBN 667 «Душа» в линиях H α и OIII

Fig. 2. Image of the LBN 667 "Soul" nebula in the H α and OIII lines

Повышение углового разрешения до $1,55''/\text{пиксель}$ по сравнению с широкопольной конфигурацией позволило детально исследовать морфологию мелко-масштабных структур. При предполагаемом расстоянии до LBN 667 порядка $d \approx 400 \text{ пк}$ [22] данное разрешение соответствует линейному масштабу $\sim 600 \text{ а.е.}$ на пиксель. Это открывает возможность изучения структур субзвёздного размера.

Несмотря на то, что LBN 667 классифицируется преимущественно как отражательная туманность (сияющая за счёт рассеяния излучения близлежащих звёзд на пылевых частицах), применение узкополосных фильтров выявило наличие собственной эмиссии. Зарегистрированное свечение в линии $\text{H}\alpha$ указывает на присутствие локальных зон ионизованного водорода, что позволяет классифицировать объект как комплексную туманность смешанного типа. Свечение в линии OIII оказалось значительно слабее, что свидетельствует об отсутствии звёзд с жёстким УФ-излучением (спектральных классов O или ранних B), способных ионизовать кислород.

На полученной мозаике чётко видна волокнистая структура туманности. Анализ ориентации пылевых волокон и градиентов поверхностной яркости позволяет идентифицировать возможный источник ионизации и подсветки – звезду HD 15004 спектрального класса B9, расположенную в непосредственной близости от яркого ядра туманности. Относительно низкая температура такой звезды ($\sim 10\,500 \text{ К}$) объясняет слабое свечение в линии OIII и доминирование механизма флуоресценции (свечение в линии $\text{H}\alpha$) и рассеяния.

Физической основой формирования наблюдаемой волокнистой структуры являются, вероятно, процессы фотоиспарения плотных газопылевых глобул под воздействием УФ-излучения звезды HD 15004. Давление ионизованного газа на поверхности плотного облака согласно (1)

можно оценить как $\approx 1,1 \cdot 10^{-10} \text{ Па}$. Это давление действует на границу раздела между ионизованной и нейтральной средой, приводя к абляции материала и формированию ярких ионизационных фронтов и кометообразных глобул, хвосты которых ориентированы от источника излучения [17]. Меньший, по сравнению с IC 1805, линейный масштаб структур LBN 667 (менее 0,1 пк) и их морфология полностью согласуются с данной моделью.

Выводы

Проведенные исследования демонстрируют высокий потенциал метода спектральной селекции для решения широкого круга задач диагностики материалов. Апробированные режимы работы (широкопольный и высокого разрешения) соответствуют типовым задачам макро- и микрохарактеризации.

Полученное пространственное разрешение ($\sim 600 \text{ а.е.}$ для LBN 667) в модельном эксперименте экстраполируется на возможность детектирования неоднородностей субмикронного и микронного размера в лабораторных условиях при использовании соответствующей оптики. Способность метода избирательно регистрировать излучение конкретных ионов ($\text{H}\alpha$, OIII) напрямую переносится на задачи анализа люминесценции легированных материалов, макроскопических дефектов и фазовых границ в прозрачных средах.

Методика построения мозаичных изображений может быть применена для послойного неразрушающего контроля крупногабаритных образцов и покрытий. Таким образом, комплекс на основе узкополосных фильтров и ПЗС-камер с охлаждением представляет собой универсальный инструмент для диагностики пространственных неоднородностей в светорассеивающих и люминесцирующих средах различной природы.

Список литературы

1. Третьяков В.В., Карпушкин С.В. Неразрушающий контроль микроструктуры композиционных материалов современными оптическими методами // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87, № 3. С. 45–53. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2021-87-3-45-53>.
2. Осколкова К.И., Фролов Д.Ю. Люминесцентные методы анализа дефектов в наноструктурированных покрытиях // Вестник Московского университета. Серия 2: Химия. 2020. Т. 61, № 4. С. 254–261. <https://doi.org/10.3103/S0027131420040067>.
3. Smirnov A.N., Petrov V.G. Non-destructive testing of structural inhomogeneities in transparent ceramics using light scattering tomography // Journal of the European Ceramic Society. 2022. Vol. 42, is. 4. P. 1359–1367. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.12.022>.
4. Johnson K.L., Brown M.P. Imaging of phase boundaries and defect structures in functional nanomaterials // Materials Characterization. 2019. Vol. 158. P. 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.109117>.
5. Иванов А.А., Сидоров Д.В. Методы подавления фонового излучения при люминесцентной микроскопии высокого разрешения // Оптика и спектроскопия. 2021. Т. 129, № 5. С. 612–619. <https://doi.org/10.21883/OS.2021.05.50988.34-21>.
6. Macleod H.A. Thin-film optical filters. 4th ed. CRC Press, 2010. 792 p. <https://doi.org/10.1201/9781420073027>.
7. Волков П.В., Белов М.Л. Современные интерференционные светофильтры для задач спектральной селекции // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 5. С. 112–118. <https://doi.org/10.7868/S0032816218050174>.
8. Smith J., Johnson K. High-contrast imaging techniques for luminescent materials analysis // Materials Characterization. 2020. Vol. 165. P. 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110118>.
9. Fedorov A.V., Volkov P.V. Nanotechnology approaches in modern interference filters design // Journal of Nanomaterials. 2022. Vol. 15, no. 3. P. 112–125. <https://doi.org/10.1155/2022/4567891>.
10. The One-hundred-deg² DECam imaging in narrowbands (ODIN): Survey design and science goals / K.-S. Lee, E. Gawiser, C. Park , Y. Yang, F. Valdes, D. Lang // The Astrophysical Journal. 2024. Vol. 962, no. 2. P. 163–178. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad165e>.
11. Narrowband Lyman-continuum imaging of galaxies at z ~ 2.85 / R.E. Mostardi, A.E. Shapley, D.B. Nestor, C.C. Steidel, N.A. Reddy, R.F. Trainor // The Astrophysical Journal. 2013. Vol. 779, no. 1. P. 65–74. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/779/1/65>.
12. Chen L., Wang H., Zhang Y. Optical diagnostics of plasma streams in surface treatment technologies // Surface and Coatings Technology. 2021. Vol. 405. P. 126–134. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126534>.
13. Григорьев Е.И., Соколов А.С. Спектрально-люминесцентные методы исследования легированных оксидных наноматериалов // Журнал прикладной спектроскопии. 2019. Т. 86, № 2. С. 245–251. <https://doi.org/10.1007/s10812-019-00806-3>.
14. Kuznetsov V.I., Fedorov A.A. Visualization of thermal fields in transparent media using Raman scattering spectroscopy // Quantum Electronics. 2017. Vol. 47, no. 9. P. 831–837. <https://doi.org/10.1070/QEL16345>
15. Kuznetsova E.V., Smirnov I.P. Defect analysis in multilayer optical coatings using spectral imaging // Optical Materials Express. 2021. Vol. 11, no. 7. P. 2045–2058. <https://doi.org/10.1364/OME.424567>.

16. Johnson M.K., Thompson R.L. Non-destructive testing of functional materials by spectral contrast enhancement // *Materials Characterization*. 2023. Vol. 195. P. 112532. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.112532>.

17. Hubble space telescope WFPC2 Imaging of M16: Photoevaporation and emerging young stellar objects / J.J. Hester, P. Scowen, R. Sankrit, T.R. Lauer, E.A. Ajhar, W.A. Baum // *The Astronomical Journal*. 1996. Vol. 111. P. 2349–2357. <https://doi.org/10.1086/117968>.

18. Predictions for mass-loss rates and terminal wind velocities of massive O-type stars / L.E. Muijres, J.S. Vink, A. de Koter, P.E. Mueller, N. Langer // *Astronomy & Astrophysics*. 2011. Vol. 526. P. 106–115. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201015712>.

19. An optical and infrared photometric study of the young open cluster IC 1805 in the giant H II region W4 / H. Sung, M.S. Bessell, M.-Y. Chun, J. Yi, Y. Naze, B. Lim [et al.] // *The Astrophysical Journal*. 2017. Vol. 836, no. 1. P. 61–75. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/836/1/61>.

20. Petrov V.G., Sokolov A.A. Laser-matter interaction: from astrophysical processes to materials processing applications // *Journal of Applied Physics*. 2022. Vol. 131, no. 15. P. 150901. <https://doi.org/10.1063/5.0083456>.

21. Compact strange stars with a medium dependence in gluons at finite temperature / M. Bagchi, S. Ray, M. Dey, J. Dey // *Astronomy & Astrophysics*. 2006. Vol. 450, no. 2. P. 431–435. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20053732>.

22. Dobashi K. Atlas and catalog of dark clouds based on the 2 Micron All-Sky Survey // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. 2005. Vol. 57, no. SP1. P. S1–S386. <https://doi.org/10.1093/pasj/57.sp1.S1>.

References

1. Tret'yakov V.V., Karpushkin S.V. Non-destructive testing of the microstructure of composite materials using modern optical methods. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial Laboratory. Materials Diagnostics*. 2021;87(3):45-53. (In Russ.) <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2021-87-3-45-53>.
2. Oskolkova K.I., Frolov D.Yu. Fluorescent methods for analyzing defects in nanostructured coatings. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 2: Khimiya = Moscow University Chemistry Bulletin*. 2020;61(4):254-261. (In Russ.) <https://doi.org/10.3103/S0027131420040067>.
3. Smirnov A.N., Petrov V.G. Non-destructive testing of structural inhomogeneities in transparent ceramics using light scattering tomography. *Journal of the European Ceramic Society*. 2022;42(4): 1359-1367. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.12.022>.
4. Johnson K.L., Brown M.P. Imaging of phase boundaries and defect structures in functional nanomaterials. *Materials Characterization*. 2019;158:109-117. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.109117>.
5. Ivanov A.A., Sidorov D.V. Methods for suppressing background radiation in high-resolution fluorescence microscopy. *Optika i Spektroskopiya = Optics and Spectroscopy*. 2021;129(5):612-619. (In Russ.) <https://doi.org/10.21883/OS.2021.05.50988.34-21>.
6. Macleod H.A. Thin-Film Optical Filters. 4th ed. *CRC Press*. 2010. P. 792. <https://doi.org/10.1201/9781420073027>.
7. Volkov P.V., Belov M.L. Modern interference filters for spectral selection tasks. *Pribory i tekhnika eksperimenta = Instruments and Experimental Techniques*. 2018;(5):112-118. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0032816218050174>.

8. Smith J., Johnson K. High-contrast imaging techniques for luminescent materials analysis. *Materials Characterization*. 2020;165:110-118. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110118>.
9. Fedorov A.V., Volkov P.V. Nanotechnology approaches in modern interference filters design. *Journal of Nanomaterials*. 2022;15(3):112-125. <https://doi.org/10.1155/2022/4567891>.
10. Lee K.-S., Gawiser E., Park C., Yang Y., Valdes F., Lang D. The one-hundred-deg² DECam imaging in narrowbands (ODIN): Survey design and science goals. *The Astrophysical Journal*. 2024;962(2):163-178. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad165e>.
11. Mostardi R.E., Shapley A.E., Nestor D.B., Steidel C.C., Reddy N.A., Trainor R.F. Narrow-band Lyman-continuum imaging of galaxies at $z \sim 2.85$. *The Astrophysical Journal*. 2013;779(1):65-74. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/779/1/65>.
12. Chen L., Wang H., Zhang Y. Optical diagnostics of plasma streams in surface treatment technologies. *Surface and Coatings Technolog*. 2021;405:126-134. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126534>.
13. Grigor'ev E.I., Sokolov A.S. Spectral-luminescent methods for studying doped oxide nanomaterials. *Zhurnal prikladnoy spektroskopii – Journal of Applied Spectroscopy*. 2019;86(2):245-251. (In Russ.) <https://doi.org/10.1007/s10812-019-00806-3>.
14. Kuznetsov V.I., Fedorov A.A. Visualization of thermal fields in transparent media using Raman scattering spectroscopy. *Quantum Electronics*. 2017;47(9):831-837. <https://doi.org/10.1070/QUE16345>.
15. Kuznetsova E.V., Smirnov I.P. Defect analysis in multilayer optical coatings using spectral imaging. *Optical Materials Express*. 2021;11(7): 2045-2058. <https://doi.org/10.1364/OME.424567>.
16. Johnson M.K., Thompson R.L. Non-destructive testing of functional materials by spectral contrast enhancement. *Materials Characterization*. 2023;195:112532. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.112532>.
17. Hester J.J., Scowen P.A., Sankrit R., Lauer T.R., Ajhar E.A., Baum W.A. Hubble space telescope WFPC2 imaging of M16: photoevaporation and emerging young stellar objects. *The Astronomical Journal*. 1996;111:2349-2357. <https://doi.org/10.1086/117968>.
18. Muijres L.E., Vink J.S., Koter A. de, Mueller P.E. Langer predictions for mass-loss rates and terminal wind velocities of massive O-type stars. *Astronomy & Astrophysics*. 2011;526:106-115. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201015712>.
19. Sung H., Bessell M.S., Chun M.-Y., Yi J., Naze Y., Lim B., et al. An optical and infrared photometric study of the young open cluster IC 1805 in the Giant H II Region W4. *The Astrophysical Journal*. 2017;836(1):61-75. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/836/1/61>.
20. Petrov V.G., Sokolov A.A. Laser-matter interaction: from astrophysical processes to materials processing applications. *Journal of Applied Physics*. 2022;131,(15):150901. <https://doi.org/10.1063/5.0083456>.
21. Bagchi M., Ray S., Dey M., Dey J. Compact strange stars with a medium dependence in gluons at finite temperature. *Astronomy & Astrophysics*. 2006;450(2):431-435. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20053732>.
22. Dobashi K. Atlas and catalog of dark clouds based on the 2 Micron All-Sky Survey. *Publications of the Astronomical Society of Japan*. 2011;63(sp1):S1-S386. <https://doi.org/10.1093/pasj/63.sp1.S1>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Абакумов Павел Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики, информатики и математики, Курский государственный медицинский университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: abakumovpavel18@gmail.com, ORCID: 0009-0009-1055-4019

Локтионова Инна Владимировна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ms.chuhaeva@mail.ru, ORCID: 0009-0005-7272-2939

Pavel V. Abakumov, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Physics, Informatics and Mathematics Department, Kursk State Medical University, Kursk, Russian Federation, e-mail: abakumovpavel18@gmail.com, ORCID: 0009-0009-1055-4019

Inna V. Loktionova, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ms.chuhaeva@mail.ru, ORCID: 0009-0005-7272-2939