УДК 535.37:621.315.592:539.1.074.3 *Краткое сообщение*

Спектрально-люминесцентные свойства Nd-содержащих перовскитных квантовых точек в матрице псевдокумола и влияние 2,5-дифенилоксазола

А.М. Пшуков, А.А. Кокоева, Д.Н. Ермоленко, Х.Р. Ахмедова, М.У. Шокумова, М.М. Шогенова

ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»
360004, Россия, Нальчик, ул. Чернышевского, 173
pshukov1959@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.926

Аннотация: Экспериментально показано, что *Nd*-содержащие смешанногалогенидные перовскитные квантовые точки сохраняют оптически активное люминесцирующее состояние после введения в матрицу псевдокумола. Сравнивали разбавления дисперсии 1:10, 1:20 и 1:30 без 2,5-дифенилоксазола и при его концентрации 2 г/л. Спектры излучения и матрицы возбуждение-эмиссия регистрировали при одинаковых настройках. Во всех составах наблюдалась доминирующая полоса 501,5-505,5 нм, а 2,5-дифенилоксазол изменял положение максимума не более чем на 1,0 нм. При введении 2,5-дифенилоксазола максимальная интенсивность и площадь полосы уменьшились соответственно на 2,2 и 2,3% для 1:10, на 20,3 и 15,9% для 1:20 и на 48,8 и 35,3% для 1:30. Следовательно, псевдокумол является работоспособной органической матрицей исследуемых квантовых точек на стадии фотолюминесцентной диагностики, тогда как 2,5-дифенилоксазол с конценрацией 2 г/л не сенсибилизирует их фотолюминесценцию. Результат задаёт условия дальнейшей оптимизации, но не заменяет измерений радиолюминесценции и γ-возбуждённого световыхода.

Ключевые слова: перовскитные квантовые точки, неодим, матрица псевдокумола, 2,5-дифенилоксазол, фотолюминесценция, перенос энергии, самопоглощение, жидкий органический сцинтиллятор.

Пшуков Адам Музарифович – к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, директор Международного центра детекторных технологий и функциональных наноматериалов ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»
Кокоева Анета Ахмедовна – к.х.н., старший научный сотрудник Международного центра детекторных технологий и функциональных наноматериалов ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»
Ермоленко Данил Николаевич – стажёр-исследователь Международного центра детекторных технологий и функциональных наноматериалов ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»
Ахмедова Хадижа Рамиз Кызы – стажёр-исследователь Международного центра детекторных технологий и функциональных наноматериалов ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»
Шокумова Мария Уматиевна – стажёр-исследователь Международного центра детекторных технологий и функциональных наноматериалов ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»
Шогенова Мария Мухамедовна – стажёр-исследователь Международного центра детекторных технологий и функциональных наноматериалов ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Short Communication

Spectral-luminescent properties of Nd-containing perovskite quantum dots in a pseudocumene matrix and the effect of 2,5-diphenyloxazole

A.M. Pshukov, A.A. Kokoeva, D.N. Ermolenko, Kh. R. Akhmedova, M.U. Shokumova, M.M. Shogenova

Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.926

Abstract: It has been experimentally demonstrated that *Nd*-containing mixed-halide perovskite

© А.М. Пшуков, А.А. Кокоева, Д.Н. Ермоленко, Х.Р. Ахмедова, М.У. Шокумова, М.М. Шогенова, 2026

quantum dots retain an optically active luminescent state after incorporation into a pseudocumene matrix. Dilutions of the dispersion at 1:10, 1:20, and 1:30 were compared without 2,5-diphenyloxazole and with 2,5-diphenyloxazole at a concentration of 2 g/L. Emission spectra and excitation-emission matrices were recorded under identical settings. In all compositions, a dominant band at 501,5-505,5 nm was observed and 2,5-diphenyloxazole changed the peak position by no more than 1,0 nm. Upon addition of PPO, the maximum intensity and the band area decreased by 2,2 and 2,3% for 1:10, by 20,3 and 15,9% for 1:20, and by 48,8 and 35,3% for 1:30, respectively. Consequently, pseudocumene is a viable organic matrix for the quantum dots under study during photoluminescence diagnostics, whereas 2,5-diphenyloxazole at a concentration of 2 g/L does not sensitize their photoluminescence. This result establishes the conditions for further optimization but does not replace measurements of radioluminescence and γ-excited light yield.
Keywords: perovskite quantum dots, neodymium, pseudocumene matrix, 2,5-diphenyloxazole, photoluminescence, energy transfer, self-absorption, liquid organic scintillator.

Adam M. Pshukov – Ph. D., Leading Researcher, Director of the International Center for Detector Technologies and Functional Nanomaterials, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, ORCID 0000-0003-2849-1238
Aneta A. Kokoeva – Ph. D., Senior Researcher, International Center for Detector Technologies and Functional Nanomaterials, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, ORCID 0000-0002-6583-8555
Danil N. Ermolenko – Research Intern, International Center for Detector Technologies and Functional Nanomaterials, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov
Khadizha R. Akhmedova – Research Intern, International Center for Detector Technologies and Functional Nanomaterials, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov
Mariya U. Shokumova – Research Intern, International Center for Detector Technologies and Functional Nanomaterials, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov
Mariya M. Shogenova – Research Intern, International Center for Detector Technologies and Functional Nanomaterials, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov

Поступила в редакцию/received: 22.07.2026; после рецензирования/revised: 04.09.2026; принята/accepted: 12.09.2026.

1. Введение

Жидкие органические сцинтилляторы применяются в нейтринной физике, γ-спектрометрии и исследованиях редких ядерных процессов благодаря возможности формировать большие однородные чувствительные объёмы. Введение полупроводниковых квантовых точек (КТ) позволяет управлять спектром излучения и одновременно включать в чувствительную среду элементы, представляющие интерес для регистрации редких распадов [1, 2]. Для перовскитных КТ дополнительными преимуществами являются высокая поглощающая способность, перестраиваемая фотолюминесценция и присутствие тяжёлых элементов Cs и Pb.

Результат введения органического флуорофора в КТ-содержащую среду определяется не только спектральным перекрытием, но и способом возбуждения. Для систем $CsPbX_3$ – 2,5-дифенилоксазол (PPO) в октане показано усиление радиолюминесценции при рентгеновском облучении, связанное с высокоэнергетическим переносом заряда от PPO к нанокристаллам; при ультрафиолетовом возбуждении аналогичное усиление не наблюдалось [3]. При высоком содержании $CsPbBr_3$ главным ограничением становится самопоглощение, которое удавалось уменьшить

введением длинноволнового акцептора энергии [4]. В толуольных составах с PPO и КТ, излучающими при 450-510 нм, зарегистрированы комптоновские распределения от источника ^{60}Co; при этом наблюдаемый фотоэлектронный выход существенно зависел от спектральной чувствительности фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) [5]. Исследования бинарных дисперсий $CsPbBr_3$ также показали, что нанокристаллы могут одновременно служить центрами выделения энергии и излучателями, но увеличение концентрации усиливает потери при переносе света [6].

В предыдущей работе авторов разработаны жидкие сцинтилляционные композиции на основе синтина и додекана с нафталином и PPO; для оптимизированной додекановой системы получен относительный световыход до 120% от псевдокумольного эталона [7]. Параллельно синтезированы Nd-содержащие смешанногалогенидные перовскитные КТ $CsPb(Nd)Br_{3-y}Cl_y$ [8, 9]. Для исходной коллоидной системы зарегистрированы эмиссия около 458 нм, квантовый выход фотолюминесценции до 56%, время затухания 6,6±0,9 нс и гидродинамический размер 7-9 нм [9]. Присутствие Nd подтверждено элементным анализом, однако его положение в кристаллической решётке требует дополнительного структурного доказательства.

Цель работы – проверить сохранение люминесценции Nd-содержащих КТ после переноса в псевдокумольную матрицу и количественно установить влияние PPO (с концентрацией 2 г/л) и разбавления дисперсии на её спектральные характеристики.

2. Объекты и методика исследования

В качестве нанокомпонента использовали коллоидную дисперсию смешанногалогенидных перовскитных КТ направления $CsPb(Nd)Br_{3-y}Cl_y$, получаемых методом горячей инжекции с лигандной стабилизацией. Растворителем служил псевдокумол (1,2,4-триметилбензол). Подготовлены две серии: КТ в псевдокумоле и те же составы с PPO в концентрации 2 г/л. В каждой серии использованы номинальные объёмные разбавления исходной дисперсии 1:10, 1:20 и 1:30. Поскольку массовая концентрация сухих КТ в исходной дисперсии в данной серии не определялась, указанные отношения рассматриваются как операционные маркеры состава.

Измерения выполнены 29 апреля 2026 г. на спектрофлуориметре PerkinElmer LS 55. Напряжение ФЭУ составляло 650 В, ширина щелей возбуждения и регистрации – 2,5/2,5 нм, скорость сканирования – 200 нм/мин. Спектры излучения регистрировали в диапазоне 400-600 нм. Матрицы возбуждение-эмиссия (EEM – excitation-emission matrix) получали в режиме 30 последовательных проходов с шагом длины волны возбуждения 10 нм. Все составы сравнивали при одинаковых настройках

прибора.

Для каждой полосы определяли длину волны максимума λ_{max}, максимальную интенсивность I_{max} и интегральную площадь A. Эквивалентную спектральную ширину оценивали как отношение A / I_{max}. Влияние РРО выражали через отношение параметра смеси с РРО к соответствующему контролю без РРО. Абсолютный квантовый выход и поправка на внутренний фильтр по имеющимся данным не определялись.

3. Результаты и обсуждение

Во всех шести образцах обнаружена одна широкая спектрально-гладкая полоса зелёной люминесценции (см. рис. 1). Для систем без РРО λ_{max} изменяется от 501,5 нм при 1:10 до 505,5 нм при 1:30; после введения РРО максимум находится в интервале 502,5-505,5 нм. При фиксированном разбавлении разность λ_{max} между парными образцами составляет +1,0; -0,5 и 0,0 нм. Эти величины меньше ширины щелей 2,5 нм и без оценки межсерийной воспроизводимости не могут интерпретироваться как значимый спектральный сдвиг. Регистрация КТ-связанной полосы во всех разбавлениях подтверждает сохранение оптической активности нанокристаллов в матрице псевдокумола на момент измерения.

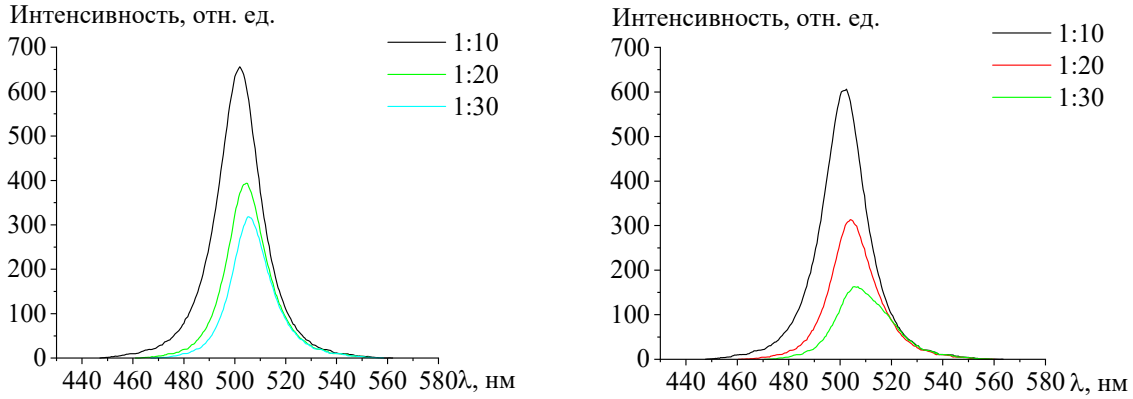

Рис. 1. Спектры излучения дисперсий перовскитных КТ в псевдокумоле: а – без РРО, б – с РРО с концентрацией 2 г/л. В каждой панели кривые с убывающей интенсивностью соответствуют разбавлениям 1:10, 1:20 и 1:30.

Сохранение положения полосы показывает, что конечное излучающее состояние после введения РРО остаётся связанным преимущественно с КТ. Самостоятельная интенсивная полоса РРО в диапазоне 400-600 нм не зарегистрирована. Количественные параметры приведены в Таблице 1.

Наиболее важная закономерность состоит в усилении подавляющего действия РРО при уменьшении доли КТ. Для 1:10 введение РРО снижает I_{max} на 2,2%, а площадь полосы на 2,3%. Для 1:20 уменьшение достигает

соответственно 20,3 и 15,9%, для 1:30 – 48,8 и 35,3% (см. Таблицу 1). Следовательно, PPO с концентрацией 2 г/л не сенсибилизирует стационарную зелёную люминесценцию исследованной системы.

Таблица 1. Параметры основной полосы люминесценции исследованных составов.

Состав	λ_{max}, нм	I_{max}, отн. ед.	A, отн. ед.	A / I_{max}, нм
1:10 без PPO	501,5	620,2	14 491	23,4
1:10 PPO 2 г/л	502,5	606,4	14 155	23,3
1:20 без PPO	504,5	396,6	8 521	21,5
1:20 PPO 2 г/л	504,0	316,1	7 163	22,7
1:30 без PPO	505,5	315,6	6 573	20,8
1:30 PPO 2 г/л	505,5	161,7	4 251	26,3

При постоянной концентрации PPO отношение PPO/КТ возрастает в ряду 1:10-1:30. Поэтому наблюдаемая закономерность согласуется с конкурентным поглощением возбуждающего света, усилением внутреннего фильтра либо адсорбцией PPO на поверхности КТ. Рост A / I_{max} до 26,3 нм для состава 1:30 с PPO может отражать относительное уширение полосы, но при пониженном отношении сигнал/шум этот вывод нуждается в проверке. Стационарные спектры не позволяют однозначно разделить оптическое экранирование, статическое комплексообразование и динамическое тушение.

Для серии без PPO отношение площадей 1:10:1:20:1:30 равно 1,000:0,588:0,454 вместо ожидаемого при идеальном разбавлении 1,000:0,500:0,333. Отклонение допускает самопоглощение или концентрационное тушение в 1:10.

EEM-карты подтверждают сохранение основной области эмиссии около 500-510 нм (см. рис. 2). Узкие максимумы вдоль диагонали $\lambda_{em} \approx \lambda_{ex}$ относятся преимущественно к рэлеевскому рассеянию, а не к дополнительным электронным переходам. Из-за раздельной нормировки панелей количественное сравнение выполнено по одномерным спектрам, I_{max} и площади полосы.

Максимум жидких смесей 501,5-505,5 нм отличается от эмиссии около 458 нм, зафиксированной для исходной Nd-содержащей смешанногалогенидной системы [9]. Причинами могут быть изменение Br / Cl и размерного распределения, агрегация, сольватация или селективное самопоглощение. Этот сдвиг нельзя однозначно связывать с переходами Nd^{3+} Nd^{3+} без единого паспорта партии, измерений поглощения в ультрафиолетовой и видимой областях, определения гидродинамического

размера методом динамического светорассеяния и регистрации спектров в ближней инфракрасной области.

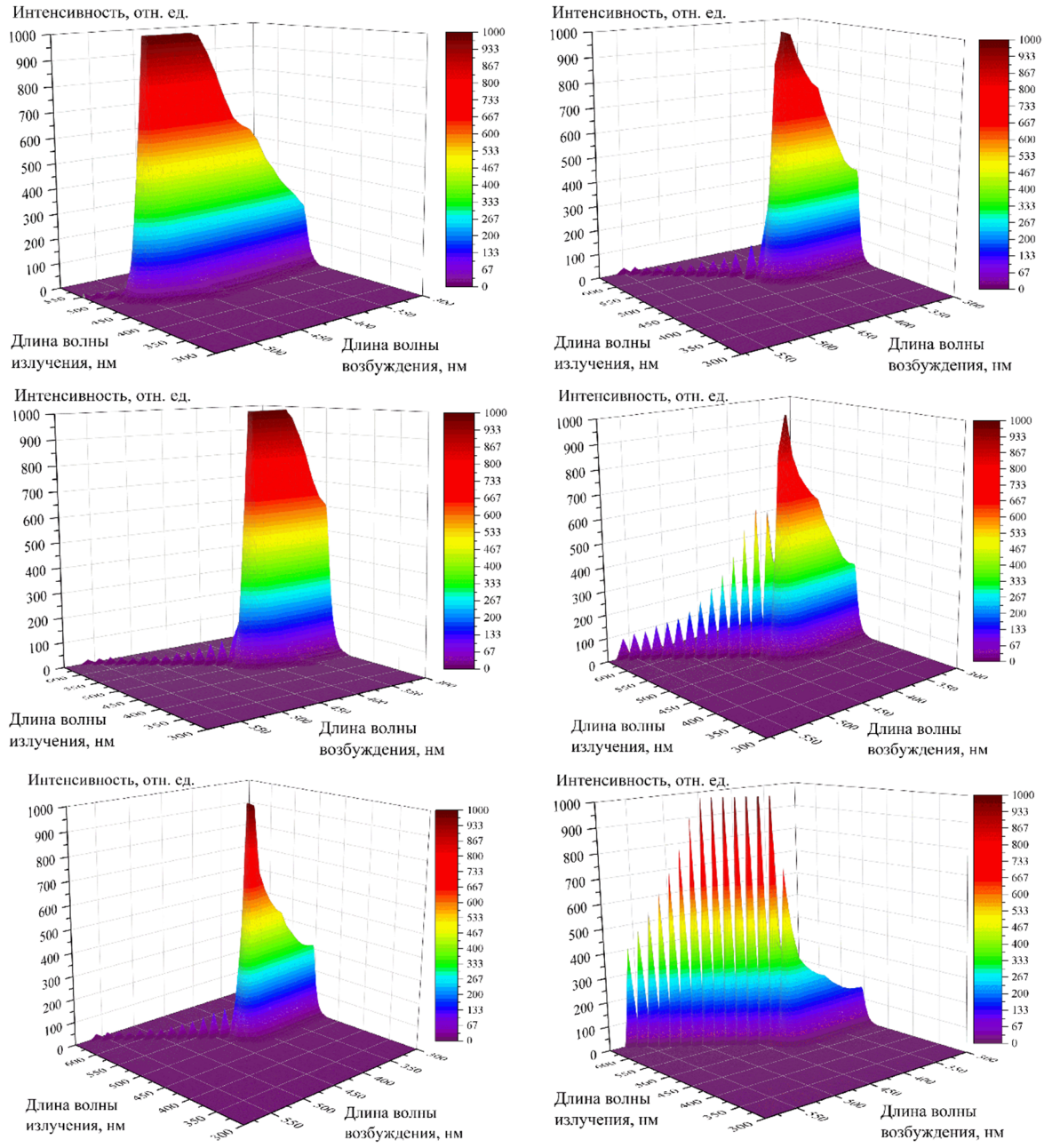

Рис. 2. Трёхмерные матрицы возбуждение–эмиссия КТ в псевдокумоле: слева – без РРО, справа – с РРО с концентрацией 2 г/л; сверху вниз – 1:10, 1:20 и 1:30. Шкалы панелей нормированы независимо; сопоставляются форма и положение полос, но не абсолютные амплитуды.

Полученное подавление при оптическом возбуждении не противоречит усилению радиолюминесценции гибридов $CsPbBr_3$–РРО, описанному при рентгеновском воздействии [3]. В последнем случае

предполагался перенос заряда из высоковозбуждённых состояний РРО, недоступный при обычном ультрафиолетовом возбуждении. Поэтому фотолюминесцентные данные настоящей работы нельзя непосредственно переносить на γ-сцинтилляционный световыход. Следующий этап должен включать регистрацию комптоновского распределения ^{137}Cs, измерение времени отклика и сравнение ФЭУ с различной спектральной чувствительностью.

4. Заключение

Ключевой результат работы состоит в экспериментальном подтверждении того, что *Nd*-содержащие перовскитные КТ сохраняют люминесцентную активность в матрице псевдокумола во всём исследованном диапазоне составов. Во всех образцах зарегистрирована доминирующая полоса 501,5-505,5 нм. Одновременно впервые для исследуемой системы количественно показано, что РРО с концентрацией 2 г/л не усиливает фотолюминесценцию КТ. Наиболее сильное подавление получено для состава 1:30: 48,8% по I_{max} и 35,3% по площади.

Система КТ-псевдокумол без РРО может быть принята как базовая органическая матрица и использована как контроль при дальнейшей оптимизации состава. Концентрацию РРО необходимо варьировать при фиксированной массовой концентрации КТ с одновременной регистрацией спектров поглощения в ультрафиолетовой и видимой областях, времён жизни и коллоидной стабильности. Практическая пригодность состава как сцинтиллятора должна оцениваться отдельно по радиолюминесценции, световыходу, комптоновскому краю, временному отклику и спектральному согласованию с фотоприёмником. Для концепции на основе ^{150}Nd увеличение содержания неодима допустимо только при сохранении прозрачности, светосбора и долговременной стабильности.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 25-12-00322.

Библиографический список:

1. **Winslow, L.** Characterizing quantum-dot-doped liquid scintillator for applications to neutrino detectors / L. Winslow, R. Simpson // Journal of Instrumentation. – 2012. – V. 7. – I. 7. – Art. № P07010. – 12 p. DOI: 10.1088/1748-0221/7/07/P07010.

2. **Aberle, C.** Optical properties of quantum-dot-doped liquid scintillators / C. Aberle, J.J. Li, S. Weiss, L. Winslow // Journal of Instrumentation. – 2013. – V. 8. – I. 10. – Art. № P10015. – 22 p. DOI: 10.1088/1748-0221/8/10/P10015.

3. **Cho, S.** Hybridisation of perovskite nanocrystals with organic molecules for highly efficient liquid scintillators / S. Cho, S. Kim, J. Kim et al. // Light: Science & Applications. – 2020. – V. 9. – Art. № 156. – 9 p. DOI: 10.1038/s41377-020-00391-8.

4. **Yu, H.** Liquid scintillators loaded with up to 40 weight percent cesium lead bromide quantum dots for gamma scintillation / H. Yu, T. Chen, Z. Han, J. Fan, Q. Pei // ACS Applied Nano Materials. – 2022. – V. 5. – I. 10. – P. 14572-14581. DOI: 10.1021/acsanm.2c02930.

5. **Kim, N.-R.** Investigating the potential of perovskite nanocrystal-doped liquid scintillator: a feasibility study /

N.-R. Kim, K.-K. Joo, H.-G. Lee // Sensors. – 2023. – V. 23. – I. 23. – Art. № 9490. – 14 p. DOI: 10.3390/s23239490.
6. **Baravaglio, M.** Energy deposition in liquid scintillators composed of $CsPbBr_3$ colloidal nanocrystal dispersions / M. Baravaglio, B. Sabot, F. Maddalena et al. // Nanoscale. – 2024. – V. 16. – I. 36. – P. 17176-17186. DOI: 10.1039/D4NR02401J.
7. **Пшуков, А.М.** О возможности использования нафталиновых кристаллов при получении жидких органических сцинтилляторов для использования в нейтринной физике / А.М. Пшуков, А.А. Кокоева, Д.Н. Ермоленко, А.З. Кашежев // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2025. – Вып. 17. – С. 148-160. DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.148.
8. **Пшуков, А.М.** Квантовые точки перовскита, легированные ионом неодима: синтез, оптические свойства / А.М. Пшуков, А.А. Кокоева, Ю.Ф. Якуба, А.З. Кашежев // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2025. – Вып. 17. – С. 742-751. DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.742.
9. **Altudov, Yu.K.** Colloidal synthesis and optical properties of Nd-containing mixed-halide CsPbBr3−γClγ quantum dots with λem≈458 nm and PLQY≈56% / Yu.K. Altudov, A.M. Pshukov, A.A. Kokoeva et al. // Physchem. – 2026. – V. 6. – I. 2. – Art. № 37. – 13 p. DOI: 10.3390/physchem6020037.
10. **Shamsi, J.** Metal halide perovskite nanocrystals: synthesis, post-synthesis modifications, and their optical properties / J. Shamsi, A.S. Urban, M. Imran, L. De Trizio, L. Manna // Chemical Reviews. – 2019. – V. 119. – I. 5. – P. 3296–3348. DOI: 10.1021/acs.chemrev.8b00644.

References:

1. Winslow L., Simpson R. Characterizing quantum-dot-doped liquid scintillator for applications to neutrino detectors, *Journal of Instrumentation,* 2012, vol. 7, issue 7, art. no. P07010, 12 p. DOI: 10.1088/1748-0221/7/07/P07010.
2. Aberle C., Li J.J., Weiss S., Winslow L. Optical properties of quantum-dot-doped liquid scintillators, *Journal of Instrumentation*, 2013, vol. 8, issue 10, art. no. P10015, 22 p. DOI: 10.1088/1748-0221/8/10/P10015.
3. Cho S., Kim S., Kim J. et al. Hybridisation of perovskite nanocrystals with organic molecules for highly efficient liquid scintillators, *Light: Science & Applications,* 2020, vol. 9, art. no. 156, 9 p. DOI: 10.1038/s41377-020-00391-8.
4. Yu H., Chen T., Han Z., Fan J., Pei Q. Liquid scintillators loaded with up to 40 weight percent cesium lead bromide quantum dots for gamma scintillation, *ACS Applied Nano Materials,* 2022, vol. 5, issue 10, pp. 14572-14581. DOI: 10.1021/acsanm.2c02930.
5. Kim N.-R., Joo K.-K., Lee H.-G. Investigating the potential of perovskite nanocrystal-doped liquid scintillator: a feasibility study, *Sensors,* 2023 vol. 23, issue 23, art. no. P9490, 14 p. DOI: 10.3390/s23239490.
6. Baravaglio M., Sabot B., Maddalena F. et al. Energy deposition in liquid scintillators composed of CsPbBr3 colloidal nanocrystal dispersions, *Nanoscale,* 2024, vol. 16, issue 36, pp. 17176-17186. DOI: 10.1039/D4NR02401J.
7. Pshukov A.M., Kokoeva A.A., Ermolenko D.N., Kashezhev A.Z. O vozmozhnosti ispol'zovaniya naftalinovykh kristallov pri poluchenii zhidkikh organicheskikh stsintillyatorov dlya ispol'zovaniya v nejtrinnoj fizike [On the possibility of using naphthalene crystals in liquid organic scintillators for neutrino physics]. *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2025, issue 17, pp. 148-160. DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.148. (In Russian).
8. Pshukov A.M., Kokoeva A.A., Yakuba Yu.F., Kashezhev A.Z. Kvantovye tochki perovskita, legirovannye ionom neodima: sintez, opticheskie svojstva [Neodymium-doped perovskite quantum dots: synthesis and optical properties]. *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2025, issue 17, pp. 742-751. DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.742. (In Russian).
9. Altudov Yu.K., Pshukov A.M., Kokoeva A.A. et al. Colloidal synthesis and optical properties of Nd-containing mixed-halide CsPbBr3−γClγ quantum dots with λem≈458 nm and PLQY≈56%, *Physchem*, 2026, vol. 6, issue 2, art. no. 37, 13 p. DOI: 10.3390/physchem6020037.
10. Shamsi J., Urban A.S., Imran M., De Trizio L., Manna L. Metal halide perovskite nanocrystals: synthesis, post-synthesis modifications, and their optical properties, *Chemical Reviews*, 2019, vol. 119, issue 5, pp. 3296-3348. DOI: 10.1021/acs.chemrev.8b00644.