

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 543.4

**ЦИФРОВОЙ ЦВЕТОМЕТРИЧЕСКИЙ СИГНАЛ
ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СЕНСОРНЫХ МАТРИЦ:
ВЫБОР УСЛОВИЙ ИЗМЕРЕНИЯ****Александр Вадимович Иванов^{1, 2}, Наталия Николаевна Замятина²,
Иван Сергеевич Щемелев¹, Клим Эмильевич Велиев¹,
Патимат Магомедовна Камилова², Олег Игоревич Кирилов¹**¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
химический факультет, кафедра аналитической химии² Институт общей и неорганической химии (ИОНХ) РАН
им. Н.С. Курнакова**Автор, ответственный за переписку:** Александр Вадимович Иванов,
sandro-i@yandex.ru

Аннотация. Метод цифровой цветометрии с использованием бытового устройства (фотокамера смартфона) впервые применен для измерения характеристик фотонно-кристаллических сенсорных матриц. Сенсорные матрицы состоят из массива полистирольных сфер (средний диаметр 190, 250 и 280 нм), закрытых слоем полидиметилсилоксана, на подложках из поликарбоната и полиэтилентерефталата. Найдены условия и параметры фотосъемки, позволяющие получить наиболее стабильный и интенсивный аналитический сигнал в координатах RGB для фотонно-кристаллических матриц фиолетового, зеленого и красного исходного цвета. Показана возможность измерения координат цветности и интегральной длины вектора Ar сенсорной матрицы, меняющихся при воздействии на матрицу летучих органических соединений (на примере паров гексана).

Ключевые слова: фотонно-кристаллические сенсорные матрицы, цифровая цветометрия, аналитический сигнал, RGB-каналы

DOI: 10.55959/MSU0579-9384-2-2026-67-4-268-279

Благодарности. Авторы выражают благодарность А.А. Козлову (РТУ/МИ-РЭА) за предоставленные образцы фотонно-кристаллических матриц.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственных заданий МГУ (регистрационный номер АААА-А21-121011590089-1) и ИОНХ РАН (регистрационный номер 1021071612841-6-1.4.7).

Для цитирования: Иванов А.В., Замятина Н.Н., Щемелев И.С., Велиев К.Э., Камилова П.М., Кирилов О.И. Цифровой цветометрический сигнал фотонно-кристаллических сенсорных матриц: выбор условий измерения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2026. Т. 67. № 4. С. 266–279.

ORIGINAL ARTICLE

**DIGITAL COLORIMETRIC RESPONSE OF PHOTONIC CRYSTAL
SENSOR MATRICES: SELECTION OF MEASUREMENT CONDITIONS**

**Alexander V. Ivanov^{1,2}, Nataliya N. Zamyatina², Ivan S. Shchemelev¹,
Klim E. Veliev¹, Patimat M. Kamilova², Oleg I. Kirilov¹**

¹ Analytical Chemistry Division, Chemistry Department of M.V. Lomonosov
Moscow State University

² N.S. Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry (IGIC RAS)

Corresponding author: Alexander V. Ivanov, sandro-i@yandex.ru

Abstract. For the first time, the digital colorimetry method using a consumer device (a smartphone camera) has been applied to measure the characteristics of photonic crystal sensor matrices. The sensor matrices consist of an array of polystyrene spheres (with an average diameter of 190, 250, and 280 nm), covered with a layer of polydimethylsiloxane, on carrier substrates made of polycarbonate and polyethylene terephthalate. The conditions and parameters of photography have been found to provide the most stable and intense analytical signal in RGB coordinates for photonic crystal matrices of violet, green, and red initial colors. The possibility of measuring the color coordinates and the integral length of the Ar vector of a sensor matrix, which changes when exposed to volatile organic compounds (such as hexane vapor), has been demonstrated.

Keywords: photonic crystal sensor arrays, digital colorimetry, analytical signal, RGB channels

Acknowledgements. The authors express their gratitude to A.A. Kozlov (RTU/MIREA) for providing samples of photonic crystal matrices.

Financial Support. The work was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation as part of the state assignments of Moscow State University (registration number AAAA-A21-121011590089-1) and the Institute of Organic Chemistry of the Russian Academy of Sciences (registration number 1021071612841-6-1.4.7).

For citation: Ivanov A.V., Zamyatina N.N., I.S. Shchemelev, K.E. Veliev, P.M. Kamilova, Kirilov O.I. Digital Colorimetric Response of Photonic Crystal Sensor Matrices: Selection of Measurement Conditions // Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 2. Khimiya. 2026. T. 67. № 4. S. 268–279.

Современная аналитическая химия стремится к упрощению способов и средств анализа при сохранении их чувствительности и селективности. Это особенно важно при проведении измерений в полевых условиях, при проведении вне-лабораторных испытаний и предварительного скрининга. В этих случаях для измерений желательно применять компактные переносные инструменты, которыми могут пользоваться даже неспециалисты. С этой позиции особый интерес вызывает метод цифровой цветометрии, активно развивающийся в последнее десятилетие благодаря возможности использования офисной и бытовой цифровой техники в качестве аналитических инструментов [1–3]. Это могут быть планшетные

сканеры [1–6], цифровые фотоаппараты и веб-камеры [1–3, 7–9], а также смартфоны [10–17], позволяющие не только зафиксировать аналитический сигнал, но и провести метрологическую обработку данных, а при наличии подключения к интернету оперативно передать данные в стационарную лабораторию [13, 18]. Число публикаций по применению смартфонов для цифровых цветометрических измерений, особенно для внелабораторного анализа, за последние 5 лет увеличилось многократно [3, 13, 18]. Предложено множество цветометрических подходов и методик для работы с окрашенными истинными и коллоидными растворами [1, 3, 13, 18], с веществами, сорбированными на твердых носителях (например, с

силикагелями, целлюлозой, пенополиуретанами, бумагами и др.) [1, 3, 18–20], с объектами, содержащими наноразмерные структуры (например, с голографическими сенсорами) [21]. Ранее нами была показана возможность цифровых цветометрических измерений аналитического отклика сенсорных композитных матриц состава «сшитый поливиниловый спирт – частицы магнетита» в проходящем и отраженном световом потоке [16, 17].

Фотонно-кристаллические (ФК) сенсорные матрицы – достаточно новое средство анализа, представляющее интерес в первую очередь для внелабораторных испытаний [22]. При воздействии аналита на такую сенсорную матрицу в результате изменения периодичности структуры кристалла или заполнения межчастичных пустот меняется эффективный показатель преломления матрицы в целом [22, 23], в результате чего изменяется диапазон длин волн отраженного света. Разработаны фотонно-кристаллические сенсоры на летучие органические соединения, неорганические ионы (K^+ и др. ионы щелочных металлов, Pb^{2+} , Cu^{2+} и др.), глюкозу, для измерения кислотности или ионной силы и т.д. [22]. Аналитический сигнал фотонно-кристаллических сенсорных матриц можно оценивать либо визуально (по изменению цвета), либо измерять с помощью спектроскопии зеркального отражения или спектроскопии диффузного отражения (по сдвигу максимума отраженного света) [22–24]. Так, при повышении концентрации иона K^+ в растворе от 10 мкМ до 100 мМ ФК-сенсор меняет цвет от исходного красного до синего [25]; сенсоры меняют цвет от зеленого до желтого и темно-красного при нанесении пробы летучих органических растворителей [24, 26]; наблюдается батохромный сдвиг максимума на спектре диффузного отражения ФК-матрицы даже при незначительном повышении содержания толуола и ксилола в воздухе цеха лакокрасочного производства [24]. Для измерения и последующей обработки спектров отражения необходимы спектрометры зеркального или диффузного отражения, подключенные к персональному компьютеру, но использование такой техники не всегда возможно в полевых условиях, на месте, *in situ*, тогда как практически у каждого человека сейчас есть смартфон, позволяющий проводить цветометрические измерения. Поэтому представляется актуальным применение цифровой цветометрии с использованием смартфона для изучения отклика ФК-сенсорных матриц, меняющих цвет в видимой области спектра.

Ранее цветометрический подход с использованием бытовой цифровой техники для измерения характеристик фотонных кристаллов и их аналитического сигнала не применяли.

В настоящей статье рассмотрена возможность цифровых цветометрических измерений фотонно-кристаллических матриц и выбора наиболее подходящих условий фотосъемки для измерения наиболее интенсивного аналитического сигнала и его последующей обработки.

Экспериментальная часть

Фотонно-кристаллические сенсорные матрицы были синтезированы по методике [27] и любезно предоставлены доц. А.А. Козловым (РТУ/МИРЭА, Институт тонкой химической технологии). Из водно-этанольной суспензии методом самоорганизации из стабилизированных субмикронных полистирольных сфер (средний размер частиц в диапазоне 170–280 нм) собирали на подложке из поликарбоната (ПК) или полиэтилентерефталата (ПЭТФ) кристаллический коллоидный массив по структуре с преобладающей плотноупакованной гранецентрированной кубической решеткой. Субмикронные полистирольные сферы имеют степень сшивки дивинилбензолом около 4% [28]. Полученную на подложке структуру закрывали слоем полидиметилсилоксана (ПДМС) Sylgard 184 silicone elastomer (Dow Corning, США) с отвердителем, подвергали деаэрации и выдерживали в сушильном шкафу при температуре 80 °С до отверждения слоя ПДМС [26, 27]. Слой ПДМС механически защищает массив полистирольных частиц и одновременно служит элементом матрицы, чувствительным к аналитам (неполярным органическим растворителям). В зависимости от среднего диаметра полистирольных сферических частиц фотонно-кристаллические матрицы имели различный исходный цвет. Некоторые характеристики фотонно-кристаллических сенсорных матриц представлены в табл. 1. Кристаллический коллоидный массив под слоем ПДМС представляет собой неправильную окружность диаметром от 4–5 до 10–12 мм на подложке-носителе размером около 15×15 мм (рис. 1). В большинстве случаев на одну подложку-носитель нанесены 1 или 2 кристаллических массива, в отдельных экспериментах использовали подложки-носители большего размера, содержащие более 20–25 ФК-матриц.

Аппаратура. Для цифровых цветометрических измерений использовали смартфон Galaxy

S21 FE 5G (Samsung) с основным широкоугольным объективом 12 Мпикс, а также веб-камеру ZHP C02 Full HD 1080 (2 Мпикс), подключенную к персональному компьютеру через порт USB 2.0. ФК-сенсорную матрицу на подложке помещали на дно ячейки, разработанной ранее И.С. Щемелевым для композитных сенсорных пленок [17]. Конструкция ячейки исключает попадание света от посторонних источников, кроме расположенных в ней светодиодов. Смартфон или веб-камеру закрепляли на тубусе ячейки с помощью специального адаптера Veber EA 46 (рис. 2). Все фотографии ФК-матриц делали только в отраженном, так называемом «холодном белом», свете светодиодов, варьируя мощность источника и другие условия фотосъемки, а также формат фотоизображений (JPG/RAW) и способ их обработки.

Программное обеспечение. Для получения цветиметрического сигнала сенсоров путем обработки фотоизображений использовали программу ImageJ © [29]. В этой программе для обработки фотоизображений открывали файл с фотографией пленки, с помощью инструмента «многоугольник» выделяли область изображения, которую занимает исследуемая пленка. Затем во вкладке Plugins – Analysis выбирали опцию RGB Measurement и получали значения интенсивности света по каналам R, G, B. Все полученные значения обрабатывали статистически.

При контроле воздействия летучего органического соединения (насыщенные пары гексана) на фотонно-кристаллическую сенсорную матрицу в ячейку ставили бюкс с порцией растворителя и накрывали его сенсорной матрицей, чувствительным слоем вниз (к парам растворителя). В качестве

Т а б л и ц а 1

Характеристики фотонно-кристаллических матриц

Диаметр сферических частиц, нм	Толщина слоя ПДМС, мм	Исходный цвет ФК-массива	$\lambda_{\text{макс.}}$ исходного спектра диффузного отражения, нм [27]	Цвет после воздействия аналитов [23, 24, 26]
170–200	0,1–0,15; 0,8-1	фиолетовый	450–460	сине-зеленый
230–250	0,1–0,15; 0,8-1	зеленый	520–535	желтый, желто-красный
более 280	0,1–0,15	красный	585–595	отраженное излучение смещается в ближнюю ИК-область

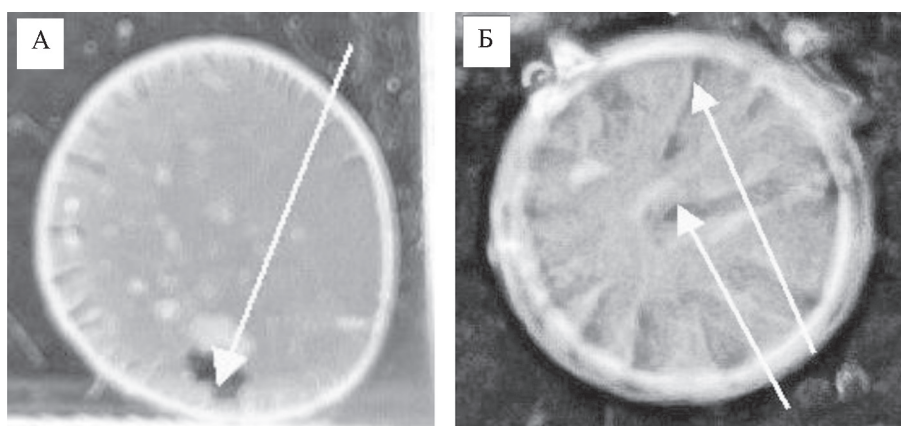


Рис. 1. Пример фотонно-кристаллических сенсорных матриц на подложке из поликарбоната, А – размер частиц 230–250 нм (зеленый исходный цвет), Б – размер частиц >280 нм (красный исходный цвет). Фотосъемка (10-кратное увеличение) в отраженном свете, напряжение источника питания 4,5 В, черный фон. Стрелками показаны примеры дефектов кристаллического массива

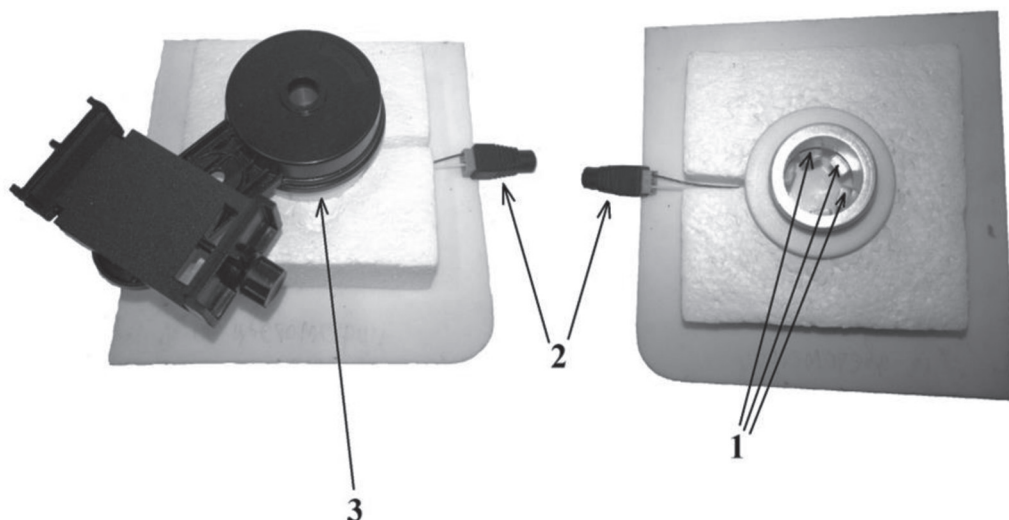


Рис. 2. Установка для фотографирования фотонно-кристаллических матриц в отраженном свете: 1 – светодиодная лента, 2 – подключение источника питания светодиодов, 3 – адаптер Veber EA 46 для смартфона

органического растворителя для предварительного исследования выбрали гексан квалификации «ч.д.а.» (АО «Реахим», Россия). Фотографировали ФК-матрицу через равные интервалы времени (30 с) до тех пор, пока участок матрицы не изменит цвет. На цифровых фотографиях выбирали либо несколько точек, либо площадь для обработки, находили цветовые координаты и обрабатывали их статистически. По полученным данным строили график изменения либо интенсивности, либо отношения интенсивностей (I/I_0) по цветовым каналам R, G, B от времени, а также зависимость от времени интегральной величины Ar (длины вектора в цветовом пространстве RGB), предложенной в работах [13, 30, 31], которую рассчитывали по формуле:

$$Ar = \sqrt{(R_0 - R)^2 + (G_0 - G)^2 + (B_0 - B)^2},$$

где R_0 , G_0 , B_0 , R , G , B – цифровые значения интенсивности по красному, зеленому, синему каналам для поверхности исходной ФК-матрицы и после воздействия пробы летучих органических соединений.

Результаты и их обсуждение

Фон для фотографирования матриц. В отраженном свете фотонно-кристаллические матрицы, закрытые слоем ПДМС, а также слой полистирольных субмикронных сфер из полистирола, еще не закрытых слоем ПДМС, выглядят

более контрастными и яркими на черном фоне [24, 26]. Тем не менее, для оптимизации условий фотосъемки ФК-матриц в отраженном цвете с последующим нахождением интенсивности по каналам R, G, B проверили влияние фона в ячейке. Важно измерить интенсивность аналитического отклика ФК-матрицы по цветовым каналам, обусловленного собственным отражением матрицы. Белый фон (белые тефлоновые стенки и дно ячейки) использовали как фон, максимально отражающий излучение, а черный фон (внутренние тефлоновые стенки ячейки, полностью закрытые упаковкой от фотобумаги) использовали как фон, поглощающий излучение. Влияние фона проверяли на ФК-матрицах трех типов, различающихся средним размером сфер полистирола и, соответственно, собственным исходным (базовым) цветом – фиолетовым, зеленым, красным. Для каждого типа ФК-матрицы (табл. 1) проверяли по 3 образца, для которых обрабатывали не менее 5 результатов (5 точек на цифровой фотографии в формате JPG). Измерения проводили при напряжении источника питания светодиодной ленты 4,5 В. Средняя интенсивность аналитического сигнала ФК-матриц по цветовым каналам представлена в табл. 2. Во всех таблицах доверительные интервалы с величиной $\pm\delta < 2$ отн. ед. приведены с точностью до десятых, а с величиной $\pm\delta > 2$ отн. ед. – до целых значений.

При использовании черной подложки интенсивность сигнала для «красных» фотонных

Т а б л и ц а 2

Интенсивность сигнала для фотонно-кристаллических сенсорных матриц по цветовым каналам R, G, B в зависимости от фона в ячейке ($n = 5, P = 0,95; t_{0,95} = 2,78$)

Образец ФК-матрицы (исходный цвет)	Средняя интенсивность сигнала, отн. ед.					
	белый фон			черный фон		
	R (s_r)	G (s_r)	B (s_r)	R (s_r)	G (s_r)	B (s_r)
Фиолетовый	186±3 (1,5%)	201±4 (1,7%)	177±2 (0,8%)	166 ±1,0 (0,5%)	204 ±1,3 (0,5%)	198±1,1 (0,5%)
Зеленый	186±3 (1,1%)	205±3 (1,1%)	142±3 (1,6%)	176±1,5 (0,7%)	210±2 (0,7%)	172±2 (0,9%)
Красный	180±1,4 (0,6%)	183±5 (2,4%)	157±3 (1,5%)	189±1,0 (0,38%)	209±3 (1,1%)	179±1,6 (0,7%)

Т а б л и ц а 3

Влияние мощности источника на интенсивность сигнала фотонно-кристаллических сенсорных матриц по цветовым каналам R, G, B ($n = 5, P = 0,95; t_{0,95} = 2,78$)

Образец ФК-матрицы (исходный цвет)	Средняя интенсивность сигнала, отн. ед.					
	Выходное напряжение 4,5 В			Выходное напряжение 7,5 В		
	R (s_r)	G (s_r)	B (s_r)	R (s_r)	G (s_r)	B (s_r)
Фиолетовый	166±1,0 (0,5%)	204±1,3 (0,5%)	198±1,1 (0,5%)	213±5 (2,0%)	235±6 (2,0%)	251±5 (1,7%)
Зеленый	176±1,5 (0,7%)	210±2 (0,7%)	172±2 (0,9%)	237±6 (2,0%)	244±6 (1,9%)	249±5 (1,7%)

Т а б л и ц а 4

Интенсивность сигнала для фотонно-кристаллических сенсорных матриц по цветовым каналам R, G, B при фотосъемке с лицевой стороны и со стороны подложки-носителя ($n = 5, P = 0,95; t_{0,95} = 2,78$)

Образец ФК-матрицы (исходный цвет)	Средняя интенсивность сигнала, отн. ед.					
	со стороны слоя ПДМС			со стороны подложки-носителя		
	R (s_r)	G (s_r)	B (s_r)	R (s_r)	G (s_r)	B (s_r)
Фиолетовый	213±5 (2,0%)	235±6 (2,0%)	251±5 (1,7%)	185±5 (2,3%)	215±6 (2,2%)	232±6 (2,0%)
Зеленый	237±6 (2,0%)	244±6 (1,9%)	249±5 (1,7%)	208±5 (2,1%)	220±5 (2,0%)	227±6 (2,1%)

кристаллов по всем цветовым каналам на черном фоне возрастает, более существенно по каналам G и B. Для «фиолетовых» и «зеленых» ФК-матриц интенсивность сигнала на черном фоне по каналу R снижается, по каналу G остается практически на том же уровне (повышение

на несколько относительных единиц), по каналу B интенсивность заметно увеличивается, на 20–30 отн. ед. Такая тенденция сохранялась для всех исследованных образцов ФК-матриц. При переходе к черному фону для всех типов ФК-матриц в целом улучшилась воспроизводимость

аналитического сигнала для точек на поверхности каждого образца; сузились доверительные интервалы по каждому цветовому каналу, относительное стандартное отклонение s_r снижалось в среднем в 1,5–2 раза. Поэтому далее все цифровые фотоизображения ФК-матриц регистрировали на черном фоне. Последующие эксперименты проводили преимущественно с фиолетовыми и зелеными ФК-матрицами, поскольку изменение их исходного цвета происходит в видимой области, что обуславливает их большее практическое значение, чем для ФК-матриц исходного красного цвета [26].

Аналогичным образом сравнивали влияние фона в ячейке при использовании веб-камеры ZHR C02 Full HD 1080 для фотографирования ФК-матриц. При этом камеру потребовалось дополнительно закрывать от посторонних источников света, так как конструкция адаптера Vebeq не позволяет плотно соединить ее объектив с тубусом ячейки. Возможно, из-за того, что веб-камера предназначена для фотосъемки с большего расстояния, фотографии ФК-матриц получались менее четкими, с дополнительным серо-голубым оттенком, более заметным от центра к краю сенсорной ФК-матрицы. На таких фотографиях сложнее выбирать точки для нахождения интенсивности сигнала по всем каналам, искажение реального цвета матрицы привело к значительному разбросу значений, особенно существенному для канала R (красный). Интенсивность по всем каналам также снизилась для белого и для черного фона. Так, для зеленой сенсорной ФК-матрицы на черном фоне по каналу R получили значение 125 ± 15 , по каналу G – 132 ± 16 ; относительное стандартное отклонение s_r в интервале 9,4–9,7%; на белом фоне s_r достигает 12–15%, что неприемлемо для аналитических задач, кроме полуколичественной

оценки. Во всех дальнейших экспериментах использовали только фотокамеру смартфона.

Интенсивность источника излучения. Интенсивность цвета фотонно-кристаллического массива определяется отраженным излучением, зависящим, в свою очередь, от характеристик источника излучения [17, 26]. Проверили влияние яркости источника (меняя выходное напряжение блока питания светодиодной ленты) на величину регистрируемых параметров R, G, B. Выходное напряжение блока питания светодиодной ленты можно переключать в диапазоне 3–12 В с шагом 1,5 В, однако при напряжении 3 В светодиоды дают слишком тусклое освещение, что снижает интенсивность отраженного от поверхности ФК излучения, а при напряжении выше 7,5 В проявляется периодическое мерцание светодиодов, что существенно сказывается на воспроизводимости результатов. Поэтому напряжение переключали в интервале 4,5–7,5 В. Образцы ФК-матриц с исходным фиолетовым и зеленым цветом фотографировали в формате JPG не менее 5 раз; найденные средние значения интенсивности по цветовым каналам R, G, B представлены в табл. 3.

Средняя интенсивность сигнала по трем цветовым каналам (R, G, B) при повышении напряжения до 7,5 В существенно увеличивается (на 50–60 отн. ед. и выше), что может в дальнейшем улучшить чувствительность при измерении аналитического отклика ФК-матриц на летучие органические растворители. Однако воспроизводимость сигнала, измеренная при $n = 5$, при более высоком напряжении источника питания, ухудшается: s_r увеличивается в среднем в 2–2,5 раза, однако и при этом не превышает 2% (наименьшее значение относительного стандартного отклонения для спектрофотометрических методов). Вероятно, при 7,5 В цифровая фотокамера

Т а б л и ц а 5

Воспроизводимость аналитического сигнала для фотонно-кристаллических сенсорных матриц одной партии ($P = 0,95$, n и $t_{0,95}$ указаны в таблице)

Образцы ФК-матриц на единой подложке (n ; $t_{0,95}$)	Средняя интенсивность сигнала, отн. ед.		
	R (s_r)	G (s_r)	B (s_r)
Фиолетовые, 28 матриц; 2,05	208 ± 5 (5,5%)	241 ± 6 (5,5%)	229 ± 5 (5,5%)
Зеленые, 25 матриц; 2,06	234 ± 6 (5,6%)	248 ± 6 (5,5%)	256 ± 6 (5,4%)

уже фиксирует мерцание светодиодов, еще незаметное глазу, и это начинает сказываться на воспроизводимости сигнала. Поскольку в цифровой цветометрии за короткий интервал времени можно сделать большое число (10–20 и более вместо 5) фотографий ФК-матрицы, статистическая обработка которых, естественно, приведет к сужению доверительного интервала и улучшению воспроизводимости, решено было в дальнейшем использовать напряжение источника 7,5 В для повышения чувствительности измерения.

Фотографирование со стороны носителя или ФК-матрицы. При изучении аналитического отклика сенсорных ФК-матриц на пары летучих органических соединений (бензола, толуола, ксилолов, *n*-алканов и др.) матрицу помещают чувствительным слоем полидиметилсилоксана вниз, накрывая емкость с летучим неполярным растворителем, а стеклянной или полимерной подложкой-носителем вверх. Такое перевернутое размещение матрицы может привести к изменению цветометрических параметров, получаемых на основе цифровой фотографии сенсора. Так, ранее было показано, что при измерении аналитического сигнала с по-

мощью спектроскопии диффузного отражения размещение матрицы подложкой-носителем в сторону объектива прибора незначительно (на несколько %) снижает интенсивность отклика [24, 26]. По цифровым фотографиям (формат JPG) обоих типов ФК-матриц (табл. 2) измеряли интенсивность сигнала каналов R, G, B по пяти точкам при выходном напряжении источника питания светодиодов 7,5 В. Сравнение результатов приведено в табл. 4. Во всех случаях интенсивность при фотосъемке со стороны подложки-носителя оказывается ниже на 20–30 отн. ед., воспроизводимость интенсивности сигнала меняется незначительно, например, по каналу R для фиолетовой ФК-матрицы s_r увеличивается с 2,0 до 2,3%, по каналу B – с 1,7 до 2,0%. Аналогичное незначительное увеличение s_r наблюдается и для зеленой ФК-матрицы.

Воспроизводимость цветовых характеристик для ФК-матриц одной партии. Для аналитических целей (построение градуировочных зависимостей и др.) желательно, чтобы в одинаковых условиях фотосъемки у близких по свойствам матриц получались сопоставимые интенсивности по определенному цветовому каналу.

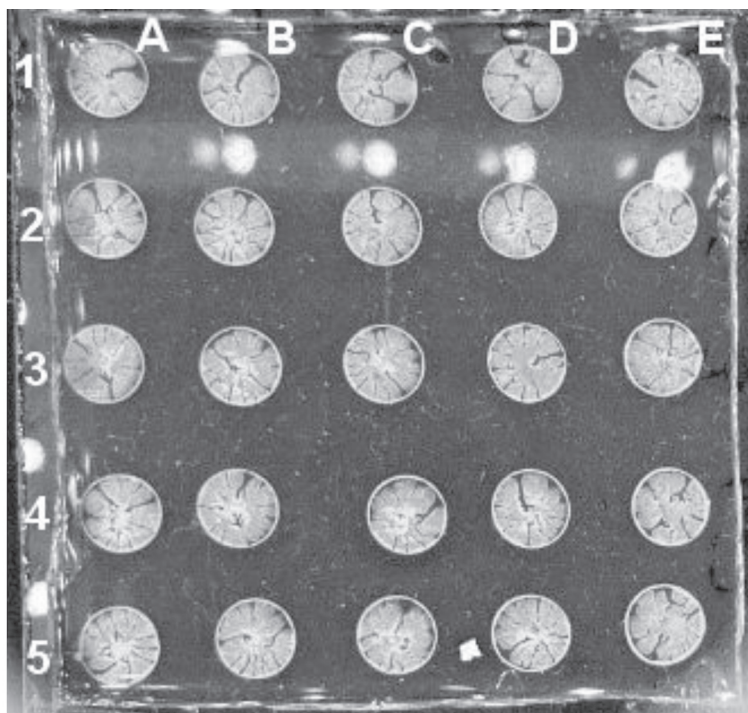


Рис. 3. Набор из 25 фотонно-кристаллических сенсорных матриц (230–250 нм, зеленый исходный цвет) на единой подложке-носителе (поликарбонат) для оценки воспроизводимости цветовых характеристик. Фотосъемка (2,5-кратное увеличение) в отраженном свете, напряжение источника питания 7,5 В, черный фон

Измерили характеристики набора из 25 зеленых ФК матриц (рис. 3), находящихся на единой подложке-носителе (поликарбонат) и закрытых слоем ПДМС одинаковой толщины (0,1 мм). Диаметр матриц составлял 0,5 мм. Для фотографирования набора матриц на единой подложке-носителе (размер подложки примерно 6×6 см) использовали ячейку с увеличенным рабочим объемом. На цифровой фотографии в формате JPG выбирали по одной точке в центре каждой матрицы и по одной точке ближе к краю матрицы таким образом, чтобы выбранная точ-

ка не попадала на участок с дефектами матрицы (трещины и т.д.), аналогичные показанным на рис. 1, и определяли интенсивность в точке по каналам R, G, B. Каждый массив данных обрабатывали статистически. Аналогичным образом измерили цветовые параметры ФК-матриц фиолетового цвета (28 образцов ФК на единой подложке-носителе из поликарбоната). Результаты представлены в табл. 5. Относительное стандартное отклонение интенсивностей по каналам R, G, B внутри одной партии фотонно-кристаллических матриц не превышает 5,4–

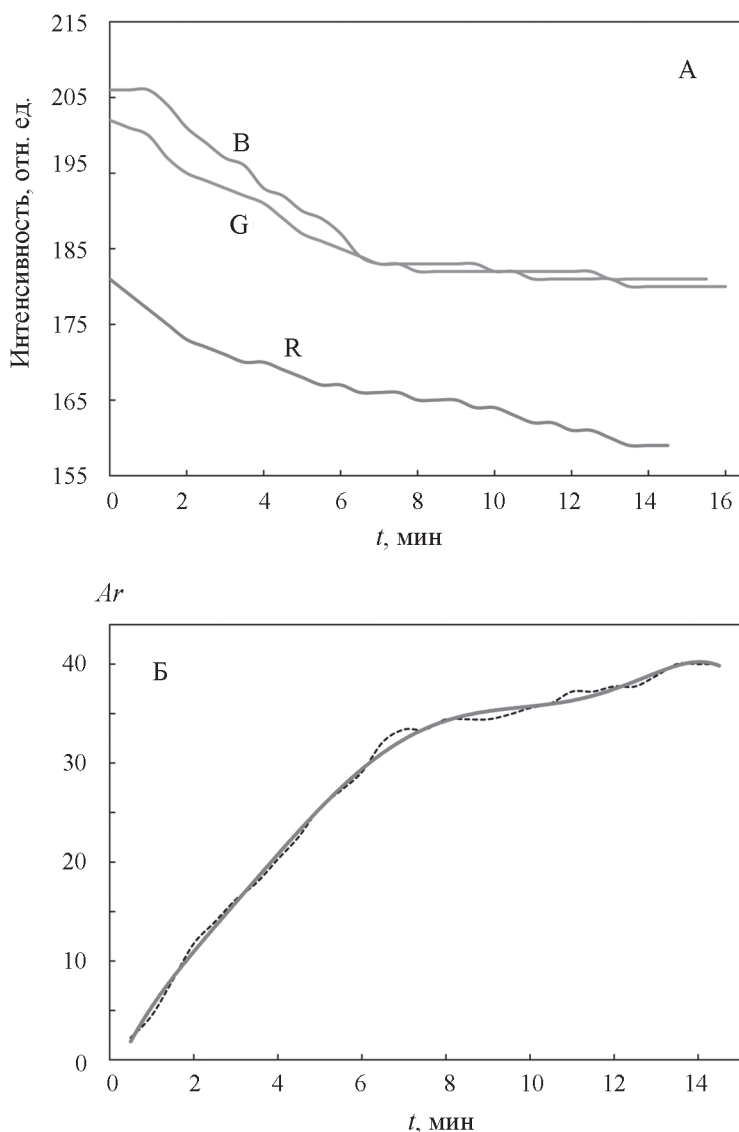


Рис. 4. Пример изменения интенсивности по каналам R, G, B (А) и интегрального вектора Ar (Б) для фотонно-кристаллической сенсорной матрицы (средний диаметр сфер 250 нм) при воздействии насыщенных паров гексана. Остальные пояснения в тексте

5,6%, при этом доверительный интервал для средней интенсивности каждого цветового канала сужается, благодаря существенному увеличению числа единичных результатов.

Отклик ФК-матрицы при воздействии аналита. Ранее было показано [23, 26], что динамические спектры диффузного отражения фотонно-кристаллических матриц зависят от природы воздействующего аналита, что позволяет проводить качественный анализ или скрининг летучих органических соединений: длина волны в максимуме отражения меняется в ходе воздействия каждого из исследованных растворителей с определенной закономерностью. В данном эксперименте проверили изменение интенсивности цветовых каналов R, G, B, фотографируя ФК-матрицу с интервалом в 30 с на черном фоне при напряжении источника питания 7,5 В. ФК-матрица состояла из сфер со средним диаметром 250 нм, закрытых слоем полидиметилсилоксана толщиной 0,15 мкм. По окончании воздействия паров гексана (~15–16 мин) стало заметным частичное изменение цвета сенсорной матрицы от зеленого до желтого и желто-красного. При обработке серии цифровых фотографий способ выбора 3–5 точек на поверхности с последующим усреднением сигнала приводит к заметному разбросу значений интенсивности. Скорее всего, это связано с тем, что точное нахождение точек с одними и теми же координатами на каждой последующей фотографии довольно затруднительно. Поэтому при построении подобных зависимостей интенсивности от времени более продуктивным оказался способ выделения с помощью инструмента «многоугольник» участка поверхности сенсорной матрицы на фотографии и обработки значений с использованием инструментов статистики, встроенных в программу ImageJ © [29]. При выделении области поверхности с помощью инструмента «многоугольник» необходимо обращать внимание на то, чтобы участки с

дефектами кристаллического массива не попадали в обрабатываемую область, иначе это может привести к искажению средней интенсивности. Изменение интенсивности по каналам R, G, B при воздействии паров гексана показано на рис. 4, А. График построен по фотографиям сенсорной матрицы, сделанным в формате JPG. По всем каналам интенсивность снизилась на 20–25 отн. ед., причем наиболее существенные изменения происходили в течение первых 7–8 минут воздействия паров гексана на сенсорную матрицу. Фотографирование сенсорной матрицы в формате RAW по сравнению с форматом JPG уменьшает колебания на графике «интенсивность от времени», поскольку данный формат позволяет передавать цвет так, как его видит человеческий глаз, без искажений и сжатия объема информации [7, 21]. Кроме того, при использовании разных моделей смартфонов фотографии в формате JPG могут отличаться по значениям каналов R, G, B, тогда как формат RAW нивелирует эти различия. По результатам изменения интенсивности всех цветовых координат построили график интегрального параметра A_r от времени (рис. 4, Б). Полиномиальный тренд линии (показан сплошной линией) имеет коэффициент корреляции $R^2 = 0,9979$.

Таким образом, для измерения и обработки аналитического сигнала фотонно-кристаллических сенсорных пленок впервые применили метод цифровой цветометрии с использованием смартфона в качестве измерительного устройства. Выбраны условия, позволяющие получить наибольшую интенсивность сигнала. Предложенный подход может оказаться перспективным для внелабораторного анализа с помощью фотонно-кристаллических сенсорных матриц. Следующая статья будет посвящена измерению цветометрических откликов сенсорной матрицы на различные летучие органические соединения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моногарова О.В., Осолок К.В., Апяри В.В. Цветометрия в химическом анализе // Журн. аналит. химии. 2018. Т. 73. № 11. С. 857.
2. Апяри В.В., Горбунова М.В., Исаченко А.И., Дмитриенко С.Г., Золотов Ю.А. Использование бытовых цветорегистрирующих устройств в количественном химическом анализе // Журн. аналит. химии. 2017. Т. 72. № 11. С. 963.
3. Рудаков О.Б., Рудакова Л.В., Аббуд М. Цифровая цветометрия в фармацевтическом анализе и контроле продуктов питания // Аналитика. 2024. Т. 14. № 1. С. 58.
4. Моногарова О.В., Чапленко А.А., Осолок К.В. Идентификация и определение левомицетина в лекарственных препаратах методом мультисенсорной цифровой цветометрии // Вестн. Моск. ун-та. Химия. 2020. Т. 61. № 1. С. 61.
5. Гармай А.В., Моногарова О.В., Осолок К.В., Радзиковский П.М. Определение нитрата в почве методом цифровой цветометрии // Вестн. Моск. ун-та. Химия.

2025. Т. 66. № 1. С. 52-59 (DOI: 10.55959/MSU0579-9384-2-2025-66-1-53-60).
6. Nshnsh K.M., Cavoura O., Davidson C.M., Gibson L.T. Low-cost colorimetric mercury sensor based on immobilization of rhodamine B thiolactone in a sustainable agar-agar gel substrate // *Microchem. J.* 2023. Vol. 195. 109481 (<https://doi.org/10.1016/j.microc.2023.109481>).
 7. Крайский А.В., Миронова Т.В., Султанов Т.Т. Измерение длины волны узкополосного излучения при обработке цифровых фотографий в raw-формате // *Квантовая электроника.* 2012. Т. 42. № 12. С. 1137.
 8. Апяри В.В., Дмитриенко С.Г. Применение цифрового фотоаппарата и компьютерной обработки данных для определения органических веществ с использованием диазотированного пенополиуретана // *Журн. аналит. химии.* 2008. Т. 63. № 6. С. 581.
 9. Cánovas-Saura A., Serrano-Luján L., Beltrán V., Padilla J. Neural network-based digital camera spectrophotometer: application to chromogenic technologies characterization // *ACS Appl. Opt. Mater.* 2024. Vol. 2. № 7. P. 1403.
 10. Lima M.J. A., Sasaki M.K., Marinho O.R., Freitas T.A., Faria R.C., Reis B.F., Rocha F.R. P. Spot test for fast determination of hydrogen peroxide as a milk adulterant by smartphone-based digital image colorimetry // *Microchem. J.* 2020. Vol. 157. Article 105042 (<https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.105042>).
 11. Ruttanakorn K., Phadungcharoen N., Laiwattanapaisal W., Chinsriwongkul A., Rojanarata Th. Smartphone-based technique for the determination of a titration equivalence point from an RGB linear-segment curve with an example application to miniaturized titration of sodium chloride injections // *Talanta.* 2021. Vol. 233. Article 122602 (<https://doi.org/10.1016/j.talanta.2021.122602>).
 12. Park H., Koh Y.G., Lee W. Smartphone-based colorimetric analysis of structural colors from pH-responsible photonic gel // *Sens. Actuators B.* 2021. Vol. 345. Article 130359 (<https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130359>).
 13. Шаока З.А.Ч. Развитие методологии цифровой цветометрии с использованием смартфона для определения органических веществ и идентификации объектов анализа. Дис. ... канд. хим. наук. Владимир, 2022. 185 с.
 14. Амелин В.Г., Бесчастнова Г.М., Шаока З.А.Ч., Третьяков А.В., Киш Л.К. Недеструктивный анализ лекарственных препаратов тетрациклинового ряда методом цифровой цветометрии с использованием смартфона и программного обеспечения photometrix pro® // *Вестн. Моск. Ун-та. Химия.* 2024. Т. 65. № 5. С. 397 (DOI: 10.55959/MSU0579-9384-2-2024-65-5-397-407).
 15. Моногарова О.В., Осолок К.В., Милькина В.С., Гармай А.В. Определение синтетических пищевых красителей в газированных напитках методом цифровой цветометрии // *Вестн. Моск. ун-та. Химия.* 2025. Т. 66. № 5. С. 390 (DOI: 10.55959/MSU0579-9384-2-2025-66-5-390-400).
 16. Щемелев И.С., Зиновьев Т.В., Иванов А.В., Ферাপонтов Н.Б. Цифровой цветометрический анализ водных и водно-органических систем с применением композитных пленок «сшитый поливиниловый спирт – магнетит» // *Журн. аналит. химии.* 2024. Т. 7. № 9. С. 960.
 17. Щемелев И.С., Иванов А.В., Ферাপонтов Н.Б. Применение сенсорных композитных пленок «поливиниловый спирт – магнетит» для цифрового цветометрического определения глюкозы и фруктозы в мёде // *Журн. неорг. химии.* 2025. Т. 70. № 10. С. 1428 (DOI: 10.7868/S3034560X25100209).
 18. Беклемишев М.К. Методы внелабораторного анализа с использованием смартфона // *Журн. аналит. химии.* 2025. Т. 80. № 12. С. 1243 (DOI: 10.7868/S3034512X25120017).
 19. Амелин В.Г., Шаока З.А.Ч., Большаков Д.С. Твердофазно-флуориметрическое определение тетрациклинов в лекарственных препаратах на целлюлозной бумаге и тонком слое силикагеля с использованием смартфона // *Хим.-фарм. журн.* 2021. Т. 55. № 3. С. 52.
 20. Амелин В.Г., Шаока З.А.Ч. Использование смартфона при идентификации и классификации природных минеральных вод по цветометрии индикаторных бумаг // *Журн. аналит. химии.* 2022. Т. 77. № 7. С. 638.
 21. Postnikov V.A., Kraiskii A.V., Sergienko V.I. Holographic sensors for detection of components in water solutions / In book: "Holography basic principles and contemporary applications", Dr. E. Mihaylova (Ed.). Dublin, Ireland: In-Tech, 2013. P. 103-128. ISBN: 978-953-51-1117-7 (DOI: 10.5772/53564).
 22. Большаков Е.С., Щемелев И.С., Иванов А.В., Козлов А.А. Фотонные кристаллы и их аналоги как средство химического анализа // *Журн. аналит. химии.* 2022. Т. 77. № 10. С. 875.
 23. Иванов А.В., Большаков Е.С., Апяри В.В., Козлов А.А., Горбунова М.В., Абдуллаев С.Д. Аналитический отклик сенсорных матриц на основе фотонных кристаллов: измерение диффузного отражения // *Журн. аналит. химии.* 2019. Т. 74. № 2. С. 154.
 24. Большаков Е.С., Иванов А.В., Гармаш А.В., Самохин А.С., Козлов А.А., Золотов Ю.А. Комплексный подход к мониторингу летучих органических соединений сенсорными фотонно-кристаллическими матрицами // *Журн. неорг. химии.* 2021. Т. 66. № 2. С. 220.
 25. Fenzl Ch., Kirchengener M., Hirsch T., Wolfbeis O.S. Photonic crystal-based sensing and imaging of potassium ions // *Chemosensors.* 2014. Vol. 2. P. 207 (<https://doi.org/10.3390/chemosensors2030207>).
 26. Большаков Е.С. Сенсорные матрицы на основе трехмерных фотонных кристаллов для экспрессного обнаружения летучих органических соединений. Дис. ... канд. хим. наук. М., 2021. 170 с.
 27. Козлов А.А., Абдуллаев С.Д., Грицкова И.А., Иванов А.В., Флид В.Р., Корешкова А.Н. Механизм спектральных сдвигов в материалах химических сенсоров на основе фотонных кристаллов // *Тонкие химические технологии.* 2015. Т. 10. № 6. С. 58.
 28. Абдуллаев С.Д. Методы формирования упорядоченных структур из полимерных микросфер размерами 6–250 мкм. Автореф. дис. ... канд. хим. наук. М., 2018. 20 с.
 29. ImageJ Wiki. Available online: <https://imagej.net/> (accessed on 10 December 2025).

30. Santos J.L.O., Leite O.D., Viera A.D.M., Jesus D.S. Use of a digital image in flow analysis: determination of nitrite and nitrate in natural waters // J. Braz. Chem. Soc. 2016. Vol. 27. N 1. P. 70-76 (DOI: 10.5935/0103-5053.20150245).
31. Шульц Э.В., Моногарова О.В., Осолок К.В. Цифровая цветометрия: аналитические возможности и перспективы использования // Вестн. Моск. ун-та. Химия. 2019. Т. 60. № 2. С. 79.

Сведения об авторах:

Александр Вадимович Иванов – доцент кафедры аналитической химии химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, заведующий лабораторией аналитической химии и методов разделения ИОНХ им. Н.С. Курнакова РАН, докт. хим. наук (sandro-i@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3356-0405>);

Наталья Николаевна Замятина – вед. технолог лаборатории аналитической химии и методов разделения ИОНХ имени Н.С. Курнакова РАН (zamyatina_76@bk.ru);

Иван Сергеевич Щемелев – аспирант химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (shchemelev_93@mail.ru);

Клим Эмильевич Велиев – аспирант химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (klim.veliev@chemistry.msu.ru);

Патимат Магомедовна Камилова – гл. технолог лаборатории аналитической химии и методов разделения ИОНХ имени Н.С. Курнакова РАН, канд. хим. наук (kamilova@igic.ras.ru);

Олег Игоревич Кирилов – студент химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (olegkrut1337@gmail.com).

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Соблюдение этических стандартов

В данной работе отсутствуют исследования человека и животных.

Статья поступила в редакцию 25.02.2026;
одобрена после рецензирования 12.03.2026;
принята к публикации 23.03.2026.