

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 543.422.7

ЦИФРОВАЯ ЦВЕТОМЕТРИЯ: ВЫБОР УСЛОВИЙ ИЗМЕРЕНИЯ АНАЛИТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

**Валерия Станиславовна Милькина, Оксана Викторовна Моногарова,
Кирилл Владимирович Осколок, Андрей Владимирович Гармай**

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
химический факультет, кафедра аналитической химии

Автор, ответственный за переписку: Оксана Викторовна Моногарова,
o_monogarova@mail.ru

Аннотация. Систематизированы работы за последние 15 лет по применению бытовых цветорегистрирующих устройств для химического анализа. Описаны методологические приемы, используемые для улучшения метрологических характеристик метода цифровой цветометрии на разных этапах анализа. Рассмотрены условия формирования аналитического сигнала, детально обсуждены комплексные подходы к расширению аналитических возможностей цифровой цветометрии.

Ключевые слова: химический анализ, бытовые цветорегистрирующие устройства, цифровая цветометрия, аналитический сигнал

DOI: 10.55959/MSU0579-9384-2-2025-66-3-191-205

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова АААА-А21-121011590089-1 «Развитие высокоинформативных и высокотехнологичных методов химического анализа для защиты экосистем, создания новых материалов и передовых производственных технологий, перехода к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, развития природоподобных технологий, высокотехнологичного здравоохранения и рационального природопользования».

Для цитирования: Милькина В.С., Моногарова О.В., Осколок К.В., Гармай А.В. Цифровая цветометрия: выбор условий измерения аналитического сигнала // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2025. Т. 66. № 3. С. 191–205.

SCIENTIFIC REVIEW

DIGITAL COLORIMETRY: SELECTION OF CONDITIONS OF ANALYTICAL SIGNAL MEASUREMENT

**Valeriya S. Milkina, Oksana V. Monogarova, Kirill V. Oskolok,
Andrei V. Garmay**

Lomonosov Moscow State University, Department of Chemistry, Division
of Analytical Chemistry, Moscow, Russia

Corresponding author: Oksana V. Monogarova, o_monogarova@mail.ru

Abstract. The work on the use of household color-recording devices for chemical analysis over the past 15 years are systematized. The methodological techniques used to improve the metrological characteristics of the digital colorimetry method at various stages of analysis are described. The conditions for the formation of an

analytical signal are considered, complex approaches to expanding the analytical capabilities of digital colorimetry are discussed in detail.

Keywords: chemical analysis, household color-recording devices, digital colorimetry, analytical signal

Financial Support. The work was carried out within the framework of the state task of the Lomonosov Moscow State University AAAA-A21-121011590089-1 «Development of highly informative and high-tech methods of chemical analysis for the protection of ecosystems, the creation of new materials and advanced production technologies, the transition to environmentally friendly and resource-saving energy, the development of nature-like technologies, high-tech healthcare and rational nature management».

For citation: Milkina V.S., Monogarova O.V., Oskolok K.V., Garmay A.V. Digital colorimetry: selection of conditions of analytical signal measurement // Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 2. Khimiya. 2025. T. 66. № 3. S. 191–205.

Цифровая (компьютерная) цветометрия – современный метод химического анализа, основанный на измерении количественных характеристик цвета образца с помощью многоканальных светочувствительных датчиков, укомплектованных матрицей абсорбционных широкополосных светофильтров. Метод активно развивается последние 20–25 лет (рис. 1) в связи с повсеместным распространением бытовых цветорегистрирующих устройств, используемых в качестве несертифицированных средств измерения аналитического сигнала – цифровых фотоаппаратов [1–3], фотокамер смартфонов [4–7], офисных планшетных фотосканеров [8–12], веб-камер [13–15] и др. Стоимость таких устройств на 1–3 порядка ниже стоимости аналитического оборудования. При этом метрологические характеристики методов с использова-

нием бытовых оптических гаджетов значительно лучше, чем для химических тест-средств с визуальным детектированием.

Сочетание преимуществ инструментальных и тест-методов позволило цифровой цветометрии приобрести популярность у исследователей в различных сферах. Метод широко используют в биологии и медицине [16–17], образовании [18–19], пищевой и фармацевтической промышленности [20–22], экологии [23–24], геологии [25] и др. Он пригоден для внутри- и внелабораторного анализа, а также для профессионального и неквалифицированного «бытового» использования. Особый интерес представляет возможность проведения экспрессного скринингового анализа «на месте». Компактность средств измерения и их хорошая совместимость с другими оптически-

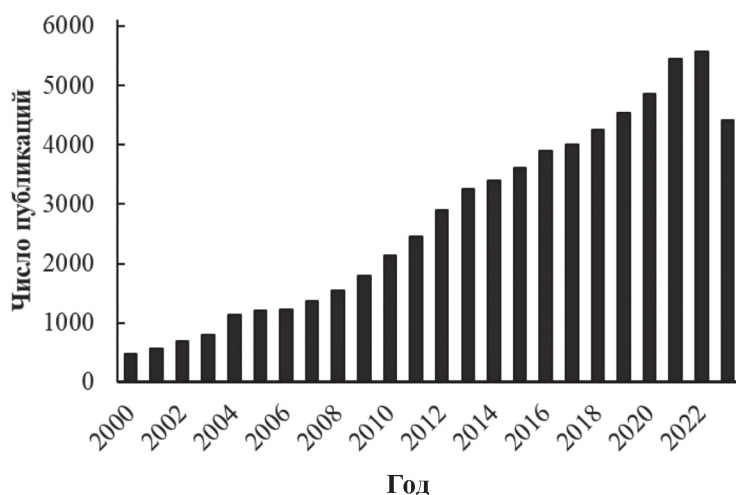


Рис. 1. Динамика роста числа публикаций цифровой цветометрии Google Scholar (digital colorimetry)

ми и электронно-механическими устройствами делают возможным использование цифровой цветометрии для решения специальных задач (например, определения окрашенных веществ в микрообъектах), дистанционного и эндоскопического анализа.

Популярность цифровой цветометрии обусловлена ее низкой стоимостью и технической простотой, однако по некоторым метрологическим показателям (ширина диапазона линейности градуировочной зависимости, погрешность, селективность) она, как правило, уступает фотометрии. В основном это связано с фундаментальными ограничениями метода (низкая степень монохроматичности регистрируемого излучения, посредственные характеристики дешевых светочувствительных датчиков), а также с многочисленными факторами, оказывающими влияние на измеряемый сигнал.

Цель настоящего обзора – систематизация методических подходов к условиям формирования аналитического сигнала методом цифровой цветометрии для улучшения метрологических характеристик.

Аналитическое применение бытовых цветорегистрирующих устройств

Традиционно используемые в цифровой цветометрии бытовые оптические гаджеты имеют свои особенности, определяющие их возможности и перспективы в химическом анализе (табл. 1) [26], поэтому выбор устройства зависит от конкретных целей анализа. При этом необходимо соблюдать баланс между стоимостью (доступностью) и техническими характеристиками гаджета, чтобы обосновать его применение в цифровой цветометрии.

Использование *офисного планшетного фотосканера* в качестве средства измерения аналитического сигнала позволяет стандартизировать условия получения изображения благодаря наличию встроенной системы освещения и фиксированному расстоянию до объекта. В последнее время сканер занял особое место в цифровой цветометрии, методики с его использованием получили название «сканерометрические» [27]. Главными недостатками планшетного фотосканера как средства измерения являются его довольно большие размеры и необходимость постоянной связи с персональным компьютером для получения изображений, извлечения и анализа содержащейся в них информации. В связи с этим при-

менение офисных сканеров возможно только в лабораторных условиях.

Цифровые камеры как более мобильные и компактные устройства подходят для получения изображений в полевых условиях. В отличие от сканера, фотоаппарат имеет много ручных настроек формирования изображения: ISO, время экспозиции, баланс белого и др. Правильный подбор этих параметров позволяет достигнуть оптимальных условий съемки. Однако для обработки информации необходимо также подключение к компьютеру.

При использовании *веб-камеры* полученный видеофайл разбивают на отдельные фотографии (1 фото/1 с), с которых считывают цветовые характеристики в зависимости от времени. Этот подход применяют для проточного цветометрического анализа [15]. Такое решение требует использования компьютера и специальных программ, но позволяет снизить стоимость проточного анализа.

С 2007 г. по настоящее время в качестве детектирующего устройства и анализатора излучения часто применяют *фотокамеры смартфонов*. И хотя их технические характеристики пока значительно уступают характеристикам цифровых камер и фотосканеров, признание смартфонов растет в связи с наибольшей степенью мобильности по сравнению с вышеперечисленными средствами измерения за счет возможности обработки изображения с помощью сторонних программ без использования компьютера. При этом авторы статьи [28] отмечают, что при работе в одном и том же цветовом пространстве (в данном примере *RGB*) с одним и тем же аналитическим сигналом точность, прецизионность, чувствительность и диапазон линейности градуировочной функции оказываются статистически неразличимыми для смартфона (при использовании подходящего измерительного бокса) и фотосканера (в режиме «на пропускание»). Более того, в рассмотренном примере они практически не уступают по метрологическим характеристикам существенно более дорогому микропланшетному фотометру. В то же время чувствительность определения с использованием бытовых гаджетов оказывается предсказуемо меньшей (в 1,3–16 раз) по сравнению с микропланшетным фотометром.

Таким образом, из всех доступных бытовых оптических гаджетов наибольшую популярность в методе цифровой цветометрии приобрели офисные фотосканеры и фотокамеры смартфонов.

Т а б л и ц а 1
Сравнение характеристик бытовых оптических цветорегистрирующих устройств

Характерные особенности	Бытовые оптические гаджеты			
	сканер	фотокамера	веб-камера	смартфон
Особенности конструкции цветометрической установки				
Независимость характеристик изображения от внешних условий	+	–	–	–
Отсутствие необходимости дополнительного источника излучения	+	+/-	+/-	+/-
Выбор условий измерения аналитического сигнала				
Ручная настройка параметров получения изображений	–	+	–	+/-
Отключение режима автоматической цветокоррекции	+	+	–	+/-
Адекватность представления результатов измерений				
Сохранение изображений в формате без потери качества (raw, tif)	+	+	–	+/-
Возможность сохранения растровых изображений в форматах с разрядностью более 24 бит (более 8 бит на цветовой канал)	+	+/-	–	+/-
Доступность и мобильность цветометрической установки				
Отсутствие необходимости подключения к компьютеру	–	+/-	–	+
Компактность	–	+/-	+	+
Стоимость, тыс. руб.	10–50	20–90	1–20	10–90

Однако бытовые оптические гаджеты относятся к несертифицированным средствам измерения, что ставит под вопрос надежность результатов химического анализа, полученных методом цифровой цветометрии. Так, погрешность определения может отличаться в несколько раз при использовании смартфонов разных производителей, если не использовать внешние источники излучения и специальные измерительные боксы [29]. Для улучшения метрологических характеристик метода следует уделить особое внимание корректному выбору условий измерений аналитического сигнала.

Оптимизация условий измерения аналитического сигнала

Для значимого расширения аналитических возможностей и улучшения метрологических характеристик метода цифровой цветометрии

необходим полный контроль над условиями формирования аналитического сигнала. Как этого добиться? Учитывая большое число определяющих факторов, следует использовать комплексный подход.

При проведении анализа методом цифровой цветометрии можно выделить три основных этапа: 1) пробоподготовка; 2) получение цифрового изображения анализируемого образца; 3) постобработка растрового изображения. Оптимизация условий измерения аналитического сигнала на каждой стадии приводит к улучшению метрологических характеристик метода (табл. 2) [30–33]. На этапе пробоподготовки можно влиять на чувствительность и селективность определения, поскольку эти характеристики зависят от свойств активной формы аналита. Ширину диапазона линейности, предел обнаружения и точность можно регулировать,

Т а б л и ц а 2

Факторы, влияющие на метрологические характеристики метода цифровой цветометрии

Факторы	Метрологические характеристики			
	Воспроизводимость	Правильность	Чувствительность	Диапазон определяемых содержаний
На стадии пробоподготовки				
Изменение активной формы вещества	–	+	+	+
На стадии получения цифрового изображения анализируемого объекта				
Стабилизация условий получения сигнала	+	+/-	+	+
Уровень рассеянного излучения	+	+	+	+
Дискретность сигнала	+	+	+	+
ISO	+	+/-	+	+
На стадии обработки информации с изображения				
Выбор координаты цветового пространства	+/-	+	+	+
Проведение параллельных измерений	+	–	–	–

используя аппаратно-программные решения на этапах получения и обработки цифрового изображения анализируемого объекта. Рассмотрим выбор оптимальных условий измерения сигнала на каждой стадии более подробно.

Пробоподготовка. Для веществ, имеющих квазинепрерывную широкополосную структуру оптического спектра поглощения, возможно проведение цветометрического определения с чувствительностью, сопоставимой с фотометрической. Для достижения максимальной чувствительности по аналогии с методом молекулярной абсорбционной спектрометрии необходимо перевести аналит в соединение, обладающее глубокой окраской (большим коэффициентом поглощения), т.е. провести фотометрическую реакцию [18] в оптимальных условиях (рН, концентрация вспомогательных реагентов и фонового электролита, температура и т.п.). Корректный выбор условий позволяет увеличить коэффициент чувствительности определения на порядок, расширить диапазон линейности градуировочной зависимости и снизить предел обнаружения до значений, сопоставимых с соответствующими характеристиками в фотометрии [34].

Селективность цифровой цветометрии, также как и спектрофотометрии, определяется различием длин волн полос поглощения активной формы аналита и сопутствующих компонентов образца. Для корректного цветометрического определения двух соединений разность максимумов поглощения должна составлять не менее 100 нм за счет низкой способности фотокамер бытовых оптических устройств различать спектрально близкие вещества. Так, при определении железа и кобальта при совместном присутствии в модельных растворах авторы статьи [35] переводили их в окрашенные тиоционатные комплексы, имеющие максимумы полос поглощения при 470 и 618 нм соответственно ($\Delta\lambda = 148$ нм). Результаты определения железа и кобальта в смеси, полученные методом цифровой цветометрии, обладали большей точностью по сравнению с результатами, полученными методом спектроскопии диффузного отражения. Для достижения наилучших метрологических характеристик цифровой цветометрии необходимо оптимизировать условия анализа на этапах получения и обработки изображения.

Получение цифрового изображения. Для расширения диапазона линейности градуировочной зависимости следует обратить внимание

на следующие факторы: 1) степень монохроматичности излучения, 2) уровень рассеянного света, 3) функция отклика светочувствительного датчика. *Степень монохроматичности* первичного излучения можно регулировать либо при выборе источника освещения с более узким спектром испускания, либо с помощью светофильтров. *Уровень рассеянного излучения*, попадающего в приемник, лимитирует верхнюю границу определяемых содержаний. *Диапазон линейности функции отклика* детектора ограничивает применение бытового оптического устройства и зависит лишь от его технических характеристик.

В оптические гаджеты встроена байеровская матрица светофильтров, содержащая 3 абсорбционных фильтра видимого диапазона длин волн, с шириной полосы пропускания 50–100 нм. По сравнению с фотокolorиметрами, в которых установлены 9–11 светофильтров с полосой пропускания 20–50 нм, степень монохроматичности регистрируемого излучения оказывается еще ниже [36]. Поэтому исследователи пытаются найти другие способы влияния на степень монохроматичности света, один из них – корректный выбор источника внешнего излучения.

Источники излучения. Для обеспечения необходимого уровня освещенности объекта используют солнечный свет, лампы накаливания, галогенные или люминесцентные лампы, светодиоды и LED-системы (light-emitting diode, светоизлучающий диод). Эти источники имеют свои особенности, существенно влияющие на метрологические характеристики метода цифровой цветометрии (табл. 3). Чем ближе максимум полосы испускания источника к максимуму полосы поглощения аналита, тем с большей чувствительностью и точностью можно провести определение [37].

Самый распространенный источник освещения – солнечный свет. Его спектр полихроматичен, поэтому с помощью такого источника с достаточной чувствительностью можно определять лишь вещества с широкими полосами поглощения. Такая реализация цветометрической схемы не требует дополнительного оборудования, что привлекательно для анализа в полевых условиях [17]. Однако неконтролируемость яркости солнечного света увеличивает случайную погрешность измерения цветовых характеристик объекта, из-за чего исследователи часто прибегают к использованию искусственных источников. Одним из них может быть лампа D65,

Т а б л и ц а 3

Характеристики источников излучения

Характеристика источника излучения	Солнечный свет	Лампа D65	Галогеновая лампа	Светодиод	LED-лампа
Монохроматичность	низкая	низкая	низкая	высокая	средняя
Стабильность	–	+	+	+	+
Распространенность	+	–	+	–	+

спектр излучения которой имитирует солнечный свет. В сочетании со светоотражающими панелями лампы D65 обеспечивают высокую освещенность объекта, воспроизводя условия анализа при солнечном освещении с большей стабильностью [38].

Спектр галогеновой лампы не имеет явно выраженных максимумов в видимой области. Зависимость интенсивности излучения от длины волны возрастающая: при 400 нм интенсивность излучения составляет около 5%, а при 700 нм – 85%. Такой источник обеспечивает наибольшую чувствительность определения вещества с максимумом поглощения в красной области длин волн (570–700 нм). Соединение, имеющее максимум поглощения при 482 нм [3], определяли с большей чувствительностью при использовании в качестве аналитического сигнала интенсивности зеленого канала (спектральное окно 495–570 нм), а не синего (спектральное окно 450–495 нм), как было бы при освещении лампой с однородным спектром во всей видимой области длин волн.

Другим популярным источником излучения являются светодиоды, представляющие собой твердотельный полупроводник, излучение света которым связано с рекомбинацией внутри его *n-p*-перехода. В зависимости от ширины запрещенной зоны светодиод испускает свет в определенном диапазоне длин волн [39]. В аналитической практике такие источники используют для уменьшения размеров цветометрических систем: они миниатюрны, портативны, дешевы и имеют длительный срок службы. Стоит отметить, что спектр излучения светодиодов существенно более узкий по сравнению с традиционными широкополосными лампами. Применение светодиодов предполагает работу на одной длине волны без использования монохроматоров, а при использовании множества цветных светодиодов можно получать спектры поглощения растворов в видимом диапазоне, что позволило создать портативный фотоколори-

метр на основе бытового оптического устройства [40].

LED-системы используют в качестве источника «белого» излучения. Спектр испускания LED-ламп в видимой области неоднороден, но интенсивность излучения в областях перекрытия полос поглощения аналитов и светофильтров байеровской матрицы достаточно высока, что позволяет проводить определение весьма широкого круга аналитов. Кроме того, LED-системы обеспечивают высокий уровень воспроизводимости измерений. Проведено изучение стабильности LED-источника в течение трех дней, всего обработано 90 изображений: максимальный уровень колебаний интенсивностей *RGB*-каналов составил 0,6 ед., что соответствует относительному стандартному отклонению 0,2% по 8-битной шкале [41].

Какой из перечисленных источников излучения лучше выбрать при создании устройства для цветометрических измерений? Использование светодиодов и люминесцентных ламп позволяет повысить степень монохроматичности излучения, но оказывается бессмысленным при отсутствии совпадения максимумов полос излучения источников с полосами поглощения аналита. Самый универсальный источник – лампа D65, ее спектр позволяет определять вещества, поглощающие во всем диапазоне длин волн видимой области. Однако ввиду малой распространенности лампы D65 самым доступным универсальным источником является LED-лампа.

Выбор подходящего источника излучения – первый и важный шаг на пути создания цветометрической системы, позволяющей обеспечить наилучшие метрологические характеристики результатов определения. Если рабочий источник света характеризуется стабильностью, пространственной и спектральной однородностью, оставшиеся технические проблемы, ограничивающие аналитические возможности метода, обусловлены, прежде всего, конструктивным несовершенством измерительного устройства.

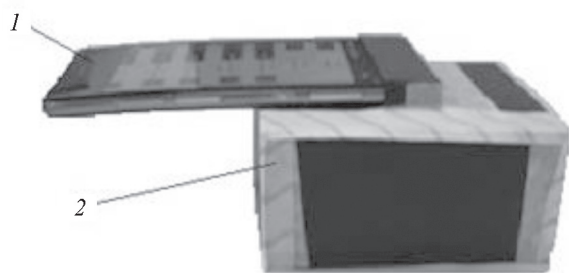


Рис. 2. Простейший цветометрический бокс на основе смартфона [6]: 1 – смартфон, 2 – светозащитный короб

Цветометрические боксы. Современный цифровой гаджет для получения растровых изображений представляет собой фактически полноценный оптический сенсор. Он объединяет в себе аналоговый одномерный или двумерный многоканальный светочувствительный датчик, аналогово-цифровой преобразователь и сигнальный процессор. В отдельных случаях (например, в смартфонах) эта электронная схема включает регистрирующее устройство и средство обработки данных. Превратить ее в химический сенсор можно, дополнив измерительным боксом, ориентированным под решение конкретных задач тем или иным оптическим методом (например, фотометрическим или флуориметрическим). Согласно литературным данным, используемые в большинстве работ конструктивно простые измерительные боксы представляют собой защитные коробки, предотвращающие паразитные засветки измеряемого образца внешними источниками излучения. Однако они, как правило, не могут исключить попадания на светочувствительный датчик излучения в обход анализируемого образца. Таким образом, важной технической задачей является совершенствование конструкции измерительного бокса для кардинального снижения уровня рассеянного света, попадающего в приемник излучения. Однако решение этой задачи не должно приводить к существенному повышению стоимости и технической сложности используемого устройства.

О необходимости использования боксов при анализе методом цифровой цветометрии указано примерно в половине статей, посвященных методу. Кроме минимизации рассеянного излучения, они стабилизируют условия измерения аналитического сигнала, что способствует уменьшению погрешности резуль-

татов определения. Особенно важно наличие цветометрических боксов при использовании фотокамеры смартфона в качестве средства измерения.

Конструкции боксов с применением смартфонов могут быть разными: от самых простых вариантов (например, короб, представленный на рис. 2) до сложных технических решений (рис. 3, 4). В работе [6] авторы изучили зависимость результатов цветометрического определения от внешнего солнечного освещения. Светозащитный короб (рис. 2) представляет собой черную коробку, в центре которой находится отверстие для камеры и смартфона, блокирующее внешнее освещение. Выводы, сделанные авторами статьи, подтверждают необходимость

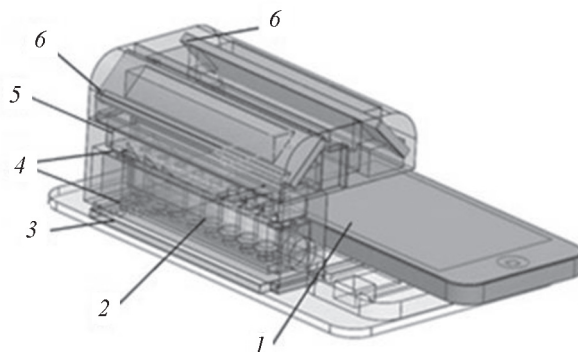


Рис. 3. Устройство для анализа методом цифровой цветометрии [42] (1 – смартфон, 2 – микропланшет, 3 – панель подсветки, 4 – коллимирующая диафрагма, 5 – массив призм, 6 – система зеркал)

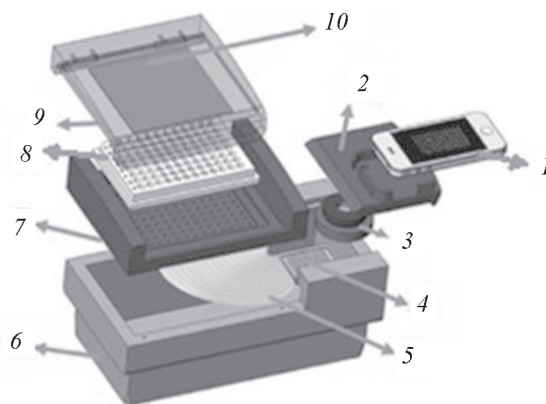


Рис. 4. Блок-схема цветометрического анализатора [43]: 1 – смартфон, 2 – держатель смартфона, 3 – нейтральный светофильтр, 4 – платформа, 5 – оптоволоконно, 6 – вспомогательный короб, 7 – держатель микропланшета, 8 – микропланшет, 9 – крышка, 10 – электролюминесцентная лампа

использования боксов для цветометрического анализа. Применяя светозащитный короб можно повысить воспроизводимость результатов, однако конструкция предложенного бокса позволяет работать лишь с объектами, нанесенными на твердую матрицу.

Цветометрический бокс, предложенный авторами статьи [42] (рис. 3) позволяет получать изображения 8 лунок микропланшета, сохраняя портативность разработанной установки. В качестве источника освещения использованы светодиодные лампочки на батарейках, встроенные в панель, что обеспечивает достаточный уровень стабильности сигнала. Коллимирующая диафрагма и массив призм устраняют рассеянное излучение, поскольку «полезный» сигнал формирует только свет, вертикально проходящий через лунки. Эти подходы позволили достигнуть чувствительности и воспроизводимости, сопоставимой с соответствующими характеристиками при использовании планшетного ридера. Наличие зеркал способствовало миниатюризации бокса до размеров $50 \times 100 \times 160$ мм (что существенно меньше стандартного планшетного ридера) и обеспечило возможность его применения в полевых условиях. Однако стремление к уменьшению размера цветометрической конструкции ограничивает возможность проведения одновременного измерения анализируемых и градуировочных растворов в одинаковых условиях. Еще одним недостатком предложенной установки является получение изображения с помощью фронтальной камеры смартфона, зачастую обладающей худшими характеристиками, чем тыловая (основная).

Этих ограничений частично лишен цветометрический анализатор, созданный авторами работы [43] (рис. 4), который позволяет получать изображение всех 96 лунок микропланшета на основную камеру смартфона. Электролюминесцентная лампа в роли источника излучения не выделяет тепло, что обеспечивает стабильность условий анализа биохимическим методом. Использование оптических волокон для передачи световой информации на камеру смартфона позволило уменьшить размеры конструкции, а также нивелировать значительную часть рассеянного излучения. Регулирование с помощью нейтрального светофильтра излучения, попадающего на камеру смартфона, позволило расширить диапазон линейности функции отклика в два раза. Эти подходы эффективны для улучшения метрологических характери-

стик метода цифровой цветометрии, однако они сложны в реализации.

Зачастую описанные в статьях цветометрические боксы слишком просты и не учитывают влияния вышеперечисленных факторов, что значительно ограничивает области применения метода цифровой цветометрии. В то же время более сложные конструкции, как правило, громоздки и дороги. Их использование затруднительно при выполнении анализа. Поэтому актуальной задачей остается разработка простого общедоступного устройства, позволяющего существенно улучшить метрологические характеристики метода цифровой цветометрии.

Архитектура бытового оптического гаджета. Все цветорегистрирующие устройства объединяет наличие оптической системы и светочувствительного многоканального датчика [44]. Конструкция бытового оптического гаджета представляет собой систему детектирования, снабженную простейшим трехканальным анализатором видимой области спектра. Матрица светофильтров Байера, расположенная над каждым светочувствительным элементом, представляет собой мозаику чередующихся цветных светофильтров (красного, зеленого и синего) [45]. Принцип работы бытового цветорегистрирующего устройства заключается в поглощении излучения и преобразовании лучистой энергии в электрическую. Датчики изображения преобразуют оптический сигнал в электронный путем генерации электрического тока. Заряд, созданный в каждом элементарном блоке системы, пропорционален количеству лучистой энергии. Аналого-цифровой преобразователь проводит оцифровку оптического сигнала, характеризующего соответствующие координаты цвета, а средство вывода переводит цифровую информацию в видимое изображение. От числа пикселей датчиков, формирующих изображение, и физических параметров устройства зависит конечное качество изображения и получаемой информации. Существуют два вида датчиков: прибор с зарядовой связью (ПЗС) и комплементарный металлооксидный полупроводник (КМОП), каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения при использовании их для решения аналитических задач [46–47].

Особенностью конструкции ПЗС-датчика является последовательная передача сформированного заряда с каждого пикселя на усилитель. Благодаря этому повреждение одного пикселя влияет на качество информации, полученной не

только с него самого, но и от соседних пикселей [48–49]. К основным техническим характеристикам ПЗС-датчиков, влияющим на качество получаемого изображения, можно отнести разрешение (число пикселей), спектральный отклик, неравномерный фотоответ (шум, пропорциональный сигналу), заряд насыщения (число электронов для перенесения из потенциальной ямы), эффективность переноса заряда. Благодаря хорошим техническим показателям ПЗС-датчики зачастую используют в профессиональной оптике.

В наиболее распространенных бытовых цветорегистрирующих устройствах обычно используют КМОП-датчики. Транзистор передачи заряда интегрирован в каждый пиксель, что позволяет обрабатывать все заряды одновременно за меньшее время отклика. Конечно, метрологические характеристики при этом несколько ухудшаются (предел обнаружения выше из-за более высокого уровня шума) по сравнению с ПЗС-датчиками, но устройства на основе КМОП более доступны [45]. Каждый диод представляет собой детектор малого размера. Наличие огромного числа таких детекторов, работающих одновременно и независимо друг от друга, позволяет измерить аналитический сигнал большого числа образцов (градуировочных и анализируемых) в одинаковых условиях. ПЗС-датчики обладают лучшими техническими характеристиками, но доступность оборудования на основе КМОП-датчиков – определяющий фактор их использования в рамках цветометрического анализа. Метрологические характеристики метода цифровой цветометрии можно регулировать с помощью настроек оптического гаджета при получении изображения.

Параметры съемки фотокамеры. Для уменьшения случайных погрешностей измерения аналитического сигнала, вызванных изменениями условий получения цифрового изображения, необходимо строго контролировать все параметры фотосъемки. В первую очередь следует обратить внимание на следующие показатели: 1) время экспозиции, 2) ISO (чувствительность датчика к свету), 3) баланс белого (показатель цветовой температуры), 4) глубина цвета, 5) разрешение фотографии (dpi). На разных бытовых оптических устройствах возможности варьирования перечисленных выше параметров различаются. Их выбор позволяет оказывать влияние на чувствительность, ширину диапазона линейности градуировочной зависимости, уровень шума и т.д.

Ширина диапазона линейности градуировочной зависимости зависит от формата сохранения изображения [50]. Для обеспечения совместимости полученных результатов измерений с любыми бытовыми цветовоспроизводящими устройствами растровые оптические изображения в цветовом *RGB*-пространстве представляют в 24-битном формате (8 бит на цветовой канал). Это значит, что интенсивность каждого *RGB*-канала может иметь значение в диапазоне от 0 до 255 ед. С помощью такого формата бытовое устройство может зарегистрировать около 16 млн цветовых оттенков. Чересчур низкая дискретность представления данных о цветовой яркости очень сильно сужает диапазон линейности функции отклика.

Небольшая глубина цвета не позволяет корректно отличить сигнал аналита при низкой концентрации от сигнала контрольного опыта. Кроме того, сохранение фотографий в формате «*jpeg*» приводит к искажению и частичной потере информации [51]. Для преодоления этой проблемы следует прежде всего использовать для математического преобразования «сырые» (необработанные) изображения в *raw*- или *dng*-формате, сохраненные с дискретностью используемого аналого-цифрового преобразователя (для устройств разного класса, обычно от 10 до 14 бит на цветовой канал). Использование этого формата для цифрового цветометрического анализа позволяет расширить диапазон линейности зависимости интенсивности от концентрации [51–52] (сохранение фотографий в «сыром» формате – способ избежать искажений, возникающих в результате автоматической обработки изображений). И хотя эту проблему неоднократно поднимали в обзорах, посвященных методу цифровой цветометрии [53], подавляющее большинство авторов продолжают использовать стандартный 8-битный *jpeg*-формат изображений (потому что так проще и дешевле), не раскрывая всех возможностей метода.

Влияние формата сохранения изображений, а также типа цифрового цветорегистрирующего устройства на метрологические характеристики метода проиллюстрировано авторами статьи [54] на примере определения пищевых аллергенов с помощью смартфона. В работе показано, что предел обнаружения арахиса можно снизить в 1,5–3 раза (с 3 до 2 ppm для *G*- и *B*-каналов; с 6 до 2 ppm для *R*-канала) при использовании *raw*-формата вместо *jpeg*-формата для фиксиро-

ванных значений ISO, баланса белого, времени экспозиции (1/60). Применение i-Phone вместо Android позволяет уменьшить предел обнаружения не более чем в 1,5 раза (с 6 до 4 для R-канала).

Высокий уровень шума на изображении может быть связан с большими значениями ISO. В обычной фотографии необходимо изменять уровень ISO для повышения чувствительности светочувствительного датчика к свету, например, при недостаточном освещении. Однако в статьях неоднократно упоминают, что ISO следует фиксировать на минимальном уровне, чтобы расширить диапазон линейности функции отклика и уменьшить шум. Например, в работе [3] значение ISO, равное 80, позволило получить стандартное отклонение результатов анализа, равное 3%, тогда как увеличение ISO до 200 приводит к отклонениям более чем на 20%. В [42] также отмечено снижение линейных коэффициентов корреляции с увеличением ISO, связанное с засветом датчика при определении окрашенных веществ низкой концентрации.

Время экспозиции – параметр, регулирующий количество света, попадающего на датчик. Этот показатель означает время, в течение которого затвор камеры открыт для накопления сигнала. При подборе этого параметра необходимо учитывать мощность источника излучения, насыщение заряда светочувствительного датчика и возможности детектирующего устройства.

С учетом всех вышеперечисленных параметров можно получить качественное изображение, включающее аналитическую информацию. Растровое изображение представляет собой многомерный массив данных, математическая обработка которого позволяет повысить чувствительность определения, снизить погрешность результатов и расширить диапазон определяемого содержания.

Обработка изображения. Заключительным этапом цифрового цветометрического анализа является обработка данных, содержащихся в файлах изображений. Корректное выполнение этой процедуры может благоприятно сказаться на метрологических характеристиках метода цифровой цветометрии. Важнейшим этапом цветометрических исследований является правильный выбор координаты цветового пространства, однозначно зависящей от концентрации определяемого вещества в анализируемом объекте.

Координаты цветового пространства. Для количественной оценки цвета существует мно-

жество различных моделей: *RGB*, *CMYK*, *HSB*, *XYZ*, *CIELab* (табл. 4) [55]. Любой цвет может быть сформирован с помощью трех правильно подобранных основных цветов, поэтому большая часть цветовых пространств использует трехмерное представление. Самой популярной цветовой системой стала *RGB*-модель, представленная тремя основными цветами – красный (*R*, red), зеленый (*G*, green), синий (*B*, blue). Эту модель используют практически во всех бытовых цветорегистрирующих устройствах за счет встроенной байеровской матрицы светофильтров. Четырехцветную модель *CMYK* применяют в цветной печати. Она образована голубым (*C*, cyan), пурпурным (*M*, magenta), желтым (*Y*, yellow) и черным (*K*, key) цветами [44]. Одна из проблем пространств *RGB* и *CMYK* состоит в том, что реальное отображение цвета, заданного в *RGB* и *CMYK*, зависит от множества факторов: на экранах – от качества монитора и его калибровки; при печати – от качества краски и печатного оборудования, плотности бумаги, влажности воздуха. Не говоря уже о том, что внешнее освещение также влияет на фактическое восприятие цвета человеческим глазом. В качестве альтернативы можно использовать перцепционные цветовые пространства *HSB*, *XYZ* или *CIELab*.

Главное преимущество системы координат цвета *HSB* – возможность представления оттенка в виде одного параметра *H*, который наиболее устойчив к колебаниям освещенности. Систему координат цвета *XYZ* обычно используют в качестве промежуточного звена, позволяющего осуществить преобразование между *RGB* и другими цветовыми пространствами, что требует большего потребления ресурсов и времени [56].

Все цветовые пространства созданы для успешного сохранения, воспроизведения и преобразования цвета в соответствии с восприятием человеческим глазом. Однозначной зависимости метрологических характеристик от выбора цветового пространства обыкновенно не наблюдается. Например, в работе [29] точность анализа с использованием координат *RGB* может быть выше, ниже или близкой к точности анализа с использованием координат *HSB* для разных анализов (наночастицы золота, углерода; pH почвенной вытяжки) и для разных марок смартфона (Huawei, iPhone, Samsung). В аналитической практике важно не столько правильное описание цвета, сколько отражение реальной зависимости

Сравнительные характеристики цветковых моделей

Особенности модели	Цветовая модель				CIE <i>Lab</i>
	<i>RGB</i>	<i>CMYK</i>	<i>HSB</i>	<i>XYZ</i>	
Тип	Аддитивная	Субтрактивная	Перцепционная		
Краткое описание	Представление цвета как суммы трех основных цветов	Представление цвета в виде процентного соотношения красок на печати	Расширенная версия <i>RGB</i> ; оперирует понятиями тон (<i>H</i>), насыщенность (<i>S</i>) и яркость (<i>B</i>)	<i>RGB</i> -модель, с учетом восприятия цветов человеческим глазом	Международный стандарт измерения цвета
Преимущества	Доступность, не требует преобразования	Используют для печати		Широкий цветовой охват	Аппаратно-независимая модель, учитывает восприятие цвета человеком
Недостатки	Аппаратно-зависимая схема	Узкое цветовое отображение	Труднопредставляемое пространство Необходимо преобразование Отсутствие графических редакторов для работы		

между количеством лучистой энергии и интенсивностью того или иного канала цветового пространства. Как правило, для математической обработки цифровых изображений используют цветовую модель *RGB* как наиболее распространенную в графических редакторах.

Выбор аналитического сигнала. И наконец, для того чтобы указанные выше подходы способствовали значимому улучшению метрологических показателей метода цифровой цветометрии, необходимо сделать и обосновать выбор аналитического сигнала, устойчивого к возможным флуктуациям условий измерения и линейно зависящего от содержания определяемого компонента в объекте в широком диапазоне значений.

Выбор правильного цветового канала потенциально может снизить уровень шума. Зачастую этому не уделяют должного внимания, все зависит от предпочтений авторов или экспериментальных данных. Например, в работе [57] провели ряд экспериментов по построению градуировочной зависимости в различных координатах разных цветовых пространств (*RGB*, *CMYK*, *HSL*). Координата *M* *CMYK*-модели выбрана в качестве оптимальной за счет наибольшего значения коэффициента корреляции. Аналогичный вывод можно сделать и на основе физических свойств анализируемого объекта. Экспериментально доказано: основной цвет, наиболее чувствительный к изменению концентрации определяемого соединения, обычно соответствует длине волны, выбранной для спектрофотометрического определения [8].

Цветометрическим параметром изображения, функционально зависящим от содержания определяемого соединения в образце, может быть усредненное значение одной или нескольких координат цветового пространства [58–59], аналог оптической плотности [60], некоторые хемометрические параметры (евклидово расстояние [61], координаты метода главных компонент [62–63]). В статье [6] авторы описывают алгоритм, комбинирующий координаты цвета разных цветовых пространств для более точной оценки зависимости цветовых характеристик от концентрации вещества. Отмечено, что наиболее значимым при выборе цветового пространства и комбинации координат цвета является не правильное описание истинного цвета, а корректное описание изменения цвета, специфичного для анализа [64].

Принимая во внимание, что в цифровой цветометрии речь идет не о субъективном воспри-

ятии цвета человеком, а о снятии объективных показателей фотозлектрического датчика, в качестве аналитического сигнала разумно выбирать параметры, имеющие физический смысл в родственных методах оптической молекулярной спектроскопии и однозначно связанные с концентрацией аналита.

Заклучение

Как показал анализ литературных данных, для улучшения метрологических характеристик метода компьютерной цветометрии (чувствительность, точность, селективность, диапазон линейности градуировочной зависимости и т.п.) необходимо тщательно подходить к выбору условий формирования аналитического сигнала.

Следует принимать во внимание множество факторов, влияющих на сигнал, измеряемый с помощью бытовых оптических гаджетов. Резюмируя все вышесказанное, для расширения аналитических возможностей метода цифровой цветометрии с помощью бытовых цветорегистрирующих устройств необходимо создать целый комплекс технических и методических приемов, среди которых особенно следует выделить: 1) актуальность разработки прототипа измерительного бокса, изготавливаемого из подручных средств, который позволит минимизировать влияние рассеянного света на измеряемую яркость цветовых каналов, 2) выбор устойчивого к помехам аналитического сигнала, линейно зависящего от содержания аналита в широком диапазоне значений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lopez-Molinero A., Tejedor Cubero V., Domingo Irigoyen R., Sipiera Piazuelo D. // *Talanta*. 2013. Vol. 103. P. 236 (DOI: 10.1016/j.talanta.2012.10.038).
2. Choodum A., Nic Daeid N. // *Talanta*. 2011. Vol. 86. P. 284 (DOI: 10.1016/j.talanta.2011.09.015).
3. Lapresta-Fernández A., Capitán-Vallvey L.F. // *Analyst*. 2011. Vol. 136. P. 3917 (DOI: 10.1039/c1an15204a).
4. Merli D., Profumo A., Tinivella S., Protti S. // *Forensic Chem.* 2019. Vol. 14. P. 100167 (DOI: 10.1016/j.forc.2019.100167).
5. Kumar A., Thirumal M., Kumar S. // *J. Mol. Struct.* 2021. Vol. 1242. P. 130757 (DOI: 10.1016/j.molstruc.2021.130757).
6. Nelis J.L. D., Zhao Y., Bura L., Rafferty K., Elliott C.T., Campbell K. // *Anal. Chem.* 2020. Vol. 92. P. 7852 (DOI: 10.1021/acs.analchem.0c01099).
7. Masawat P., Harfield A., Namwong A. // *Food Chem.* 2015. Vol. 184. P. 23 (DOI: 10.1016/j.foodchem.2015.03.089).
8. Soldat D.J., Barak Ph., Lepore B.J. // *J. Chem. Educ.* 2009. Vol. 86. № 5. P. 617 (DOI: 10.1021/ed086p617).
9. Бузук Г.Н., Кузьмичева Н.А. // *Вестн. фармации*. 2011. Т. 53. № 3. С. 12.
10. Gorbunova M.O., Apyari V.V., Baulina A.A., Garshina M.S., Kulyaginova M.S., Shevchenko A.V., Fureletov A.A., Dmitrienko S.G., Zolotov Yu.A. // *Talanta*. 2020. Vol. 219. P. 121254 (DOI: 10.1016/j.talanta.2020.121254).
11. Feng L., Musto C.J., Kemling J.W., Lim S.H., Zhong W., Suslick K. S. // *Anal. Chem.* 2010. Vol. 82. P. 9433 (DOI: 10.1021/ac1020886).
12. Sorouraddin M.-H., Saadati M., Mirabi F. // *J. Food. Drug. Anal.* 2015. Vol. 23. P. 447 (DOI: 10.1016/j.jfda.2014.10.007).
13. Lima M.B., Andrade S.I.E., Silva Neta M.S., Barreto I.S., Almeida L.F., Araújo M.C. // *J. Braz. Chem. Soc.* 2014. Vol. 25. N 5. P. 898 (DOI: 10.1016/j.talanta.2012.06.056).
14. Lima M.B., Barreto I.S., Andrade S.I.E., Almeida L.F., Araújo M.C.U. // *J. Braz. Chem. Soc.* 2014. Vol. 25. N 9. P. 1638 (DOI: 10.5935/0103-5053.20140152).
15. Santos J.L.O., Leite O.D., Vieira A.D.M., Jesus D.S., Kamogawa, M.Y. // *J. Braz. Chem. Soc.* 2016. Vol. 27. N 1. P. 70 (DOI: 10.5935/0103-5053.20150245).
16. Chen W., Yao Y., Chen T., Shen W., Tang S., Lee H.K. // *Biosens. Bioelectron.* 2021. Vol. 172. P. 112788 (DOI: 10.1016/j.bios.2020.112788).
17. Alawsi T., Proietti Mattia G., Al-Bawi Z., Beraldi R. // *Sens. Bio-Sens. Res.* 2021. Vol. 32. P. 100404 (DOI: 10.1016/j.sbsr.2021.100404).
18. Kehoe E., Penn R.L. // *J. Chem. Educ.* 2013. Vol. 90. P. 1191 (DOI: 10.1021/ed300567p).
19. Oskolok K.V., Monogarova O.V., Garmay A.V. // *J. Chem. Educ.* 2021. Vol. 98. P. 1937 (DOI: 10.1021/acs.jchemed.0c01089).
20. Suslick B.A., Feng L., Suslick K.S. // *Anal. Chem.* 2010. Vol. 82. P. 2067 (DOI: 10.1021/ac902823w).
21. Silva A.F.S., Gonçalves I.C., Rocha F.R.P. // *Food Control.* 2021. Vol. 125. P. 107956 (DOI: 10.1016/j.foodcont.2021.107956).
22. Oskolok K.V., Shults E.V., Monogarova O.V., Chaplenko A.A. // *Talanta*. 2018. Vol. 178. P. 377 (DOI: 10.1016/j.talanta.2017.09.049).
23. Chen Y., Fu Q., Li D., Xie J., Ke D., Song Q., Tang Y., Wang H. // *Anal. Bioanal. Chem.* 2017. Vol. 409. P. 6567 (DOI: 10.1007/s00216-017-0605-2).
24. Choodum A., Kanatharana P., Wongniramaikul W., Daeid N.N. // *Talanta*. 2013. Vol. 115. P. 143 (DOI: 10.1016/j.talanta.2013.04.037).
25. Kemp D.B. // *Comput. Geosci.* 2014. Vol. 67. P. 69 (DOI: 10.1016/j.cageo.2014.03.002).
26. Шульц Э.В., Моногарова О.В., Осколок К.В. //

- Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2: Химия. 2019. Т. 60. № 2. С. 89.
27. Чапленко А.А. Идентификация и определение действующих веществ в лекарственных средствах методом цифровой цветометрии. Дис. ... канд. фарм. наук. 14.04.02. М., 2019. 153 с.
 28. Christodouleas D.C., Nemiroski A., Kumar A.A., Whitesides G.M. // *Anal. Chem.* 2015. Vol. 87. P. 9170 (DOI: 10.1021/acs.analchem.5b01612).
 29. Nelis J.L.D., Zhao Y., Bura L., Rafferty K., Elliott C.T., Campbell K. // *Anal. Chem.* 2020. Vol. 92. P. 7852 (DOI: 10.1021/acs.analchem.0c01099).
 30. Rezazadeh M., Seidi S., Lid M., Pedersen-Bjergaard S., Yamini Y. // *Trends Anal. Chem.* 2019. Vol. 118. P. 548 (DOI: 10.1016/j.trac.2019.06.019).
 31. Silva Lyra W., Dos Santos V.B., Dionizio A.G., Martins V.L., Almeida L.F., Nóbrega Gaião E., Diniz P.H., Silva E.C., Araújo M.C. // *Talanta*. 2009. Vol. 77. N 5. P. 1584 (DOI: 10.1016/j.talanta.2008.09.057).
 32. Eksperiandova L.P., Belikov K.N., Khimchenko S.V., Blank T.A. // *J. Anal. Chem.* 2010. Vol. 65. N 3. P. 223 (DOI: 10.1134/S1061934810030020).
 33. Апяри В.В., Горбунова М.В., Исаченко А.И., Дмитренко С.Г., Золотов Ю.А. // *Журн. аналит. химии*. 2017. Т. 72. № 11. С. 963.
 34. Shokrollahi A., Roozestan T. // *Anal. Methods*. 2013. Vol. 5. P. 4824 (DOI: 10.1039/c3ay40183a).
 35. Химченко С.В., Экспериандова Л.П., Лемишко Е.Н. // *Методы и объекты хим. анал.* 2012. Т. 7. № 3. С. 153.
 36. Пальчикова И.Г., Смирнов Е.С. // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2019. Т. 4. № 1. С. 19.
 37. Tiufitakov N.Yu., Kalinichev A.V., Pokhvishcheva N.V., Peshkova M.A. // *Sens. Actuators B: Chemical*. 2021. Vol. 344. P. 130274 (DOI: 10.1016/j.snb.2021.130274).
 38. García A., Erenas M.M., Marinetto E.D., Abad C.A., Orbe-Payá I.D., Palma A.J., Capitán-Vallvey L.F. // *Sens. Actuators B: Chemical*. 2011. Vol. 156. P. 350 (DOI: 10.1016/j.snb.2011.04.045).
 39. Fernandes G.M., Silva W.R., Barreto D.N., Lamarca R.S., Lima Gomes P.C.F., Flavio da S. Petrucic J., Batista A.D. // *Anal. Chim. Acta*. 2020. Vol. 1135. P. 187 (DOI: 10.1016/S0003-2670(20)31016-3).
 40. Химченко С.В., Экспериандова Л.В. // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2012. Т. 78. № 3. С. 24.
 41. Tang Z., Yang J., Yu J., Cui B. // *Sensors*. 2010. Vol. 10. N 7. P. 6463 (DOI: 10.3390/s100706463).
 42. Wang Y., Zeinhom M. M.A., Yang M., Sun R., Wang S., Smith J.N., Timchalk C., Li L., Lin Y., Du D. // *Anal. Chem.* 2017. Vol. 89. N 17. P. 9339 (DOI: 10.1021/acs.analchem.7b02139).
 43. Zhong L., Sun J., Gan Y., Zhou S., Wan Z., Zou Q., Su K., Wang P. // *Anal. Sci.* 2019. Vol. 35. P. 133 (DOI: 10.2116/analsci.18P184).
 44. Fan Y., Li J., Guo Y., Xie L., Zhang G. // *Measurement*. 2021. Vol. 171. P. 108829 (DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108829).
 45. Capitán-Vallvey L.F., López-Ruiz N., Martínez-Olmos A., Erenas M.M., Palma A.J. // *Anal. Chim. Acta*. 2015. Vol. 899. P. 23 (DOI: 10.1016/j.aca.2015.10.009).
 46. Жбанова В.Л. Системы цветоделения матричных фотоприёмников: монография. Смоленск, 2018. 186 с.
 47. Жбанова В.Л. // *Светотехника*. 2021. № 2. С. 5.
 48. Старченко А.Н., Филиппов В.Г., Югай Ю.А. // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2017. Т. 17. № 4. С. 628 (DOI: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-628-634).
 49. Щагин А.В., Меркурьев С.А. // *Естественные и технические науки*. 2018. Т. 120. № 6. С. 135.
 50. Pohanka M. // *ReVol. Anal. Chem.* 2020. Vol. 39. N 1. P. 20 (DOI: 10.1515/revac-2020-0111).
 51. Bayram A., Horzum N., Metin A. Ü., Kılıç V., Solmaz M.E. // *IEEE Sens. J.* 2018. Vol. 18. P. 5948 (DOI: 10.1109/JSEN.2018.2843794).
 52. Nelis J.L.D., Moddejongen S., Guan X., Anderson A., Colgrave M.L., Broadbent J.A. // *Anal. Chem.* 2022. Vol. 94. N 49. P. 17046 (DOI: 10.1021/acs.analchem.2c03000).
 53. Pohanka M. // *Chem. Pap.* 2017. Vol. 71. N 9. P. 1553 (DOI: 10.1007/s11696-017-0166-z).
 54. Nelis J.L. D., Moddejongen S., Guan X., Anderson A., Colgrave M.L., Broadbent J.A. // *Anal. Chem.* 2022. Vol. 94. P. 17046 (DOI: 10.1021/acs.analchem.2c03000).
 55. Моногарова О.В., Осолок К.В., Апяри В.В. // *Журн. аналит. химии*. 2018. Т. 73. № 11. С. 857.
 56. Ibraheem N.A., Hasan M.M., Khan R.Z., Mishra P.K. // *J. Sci. Technol.* 2012. Vol. 2. N 3. P. 265.
 57. Thanakiatkrai Ph., Yaodam A., Kitpipit Th. // *Forensic Sci. Int.* 2013. Vol. 233. P. 288 (DOI: 10.1016/j.forsciint.2013.09.027).
 58. Lodha A., Pandya A., Sutariya P.G., Menon S.K. // *RSC Adv.* 2014. Vol. 4. P. 50443 (DOI: 10.1039/C4RA06269H).
 59. Seddaoui N., Amine A. // *Talanta*. 2021. Vol. 230. P. 122346 (DOI: 10.1016/j.talanta.2021.122346).
 60. Cerrato-Alvarez M., Frutos-Puerto S., Arroyo P., Miro-Rodriguez C., Pinilla-Gil E. // *Sens. Actuators B: Chemical*. 2021. Vol. 338. P. 129867 (DOI: 10.1016/j.snb.2021.129867).
 61. Celik C., Demir N.Y., Duman M., Ildiz N., Ocsoy I. // *Sci. Rep.* 2023. Vol. 13. P. 2056 (DOI: 10.1038/s41598-023-28604-1).
 62. Amelin V.G., Shogah Z.A.C., Bolshakov D.S., Tretyakov A.V. // *ChemChemTech*. 2022. Vol. 65. N 7. P. 17 (DOI: 10.1007/s10812-022-01328-2).
 63. Amelin V.G., Shogah Z.A.C., Bolshakov D.S., Tretyakov A.V. // *J. Appl. Spectrosc.* 2022. Vol. 89. N 1. P. 75 (DOI: 10.1007/s10812-022-01328-2).
 64. Кумпаненко И.В., Рошин А.В., Иванова Н.А., Блошенко А.В., Шалынина Н. А., Корнеева Т.Н. // *Рос. хим. журн.* 2013. Т. 57. № 1. С. 6.

Информация об авторах

Валерия Станиславовна Милькина – студентка химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (08.05.01.lera@gmail.com);

Оксана Викторовна Моногарова – доцент кафедры аналитической химии химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, канд. хим. наук (o_monogarova@mail.ru);

Кирилл Владимирович Осколок – доцент кафедры аналитической химии химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, канд. хим. наук (k_oskolok@mail.ru);

Андрей Владимирович Гармай – мл. науч. сотр. кафедры аналитической химии химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, канд. хим. наук (andrew-garmay@yandex.ru).

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 30.08.2024;
одобрена после рецензирования 16.09.2024;
принята к публикации 25.11.2024.