

УДК 543.422.7

## ЦИФРОВАЯ ЦВЕТОМЕТРИЯ: АНАЛИТИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Э.В. Шульц, О.В. Моногарова\*, К.В. Осолок

(Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический факультет, кафедра аналитической химии; \*e-mail: o\_monogarova@mail.ru)

**Проанализированы и систематизированы работы в области цифровой цветометрии за последние 15 лет. Рассмотрены разные варианты и возможности метода, отмечены области его применения и перспективы использования в химическом анализе. Описаны цветометрические установки, собранные на основе бытовых оптических гаджетов (смартфонов, офисных планшетных сканеров и т.п.), позволяющих получать растровые изображения.**

**Ключевые слова:** цифровая цветометрия, фотокамера, смартфон, офисный планшетный фотосканер, химический анализ.

Разработка простых и дешевых средств определения состава веществ и материалов – важная тенденция развития современной аналитической химии. Особый интерес представляют подходы, сочетающие доступность химических тест-методов с визуальным детектированием и хорошие метрологические характеристики инструментальных методов, прежде всего, оптической молекулярной спектрометрии. Предельно низкая стоимость таких химико-инструментальных подходов обусловлена измерением аналитического сигнала с помощью бытовых цифровых оптических устройств, не сертифицированных в качестве средств измерения. Соответствующие технические решения востребованы не только в аналитической химии, но и смежных областях.

### Методы цифровой регистрации электромагнитного излучения

В последнее время наблюдается устойчивый интерес к химическому анализу, основанному на регистрации электромагнитного излучения в видимом диапазоне длин волн с помощью цифровых устройств для получения цветных растровых изображений. В литературе для обозначения этого метода применяют следующие термины: цифровая или компьютерная цветометрия, видеоаналитические подходы, Digital color analysis (DCA), Digital image colorimetry (DIC), Digital image analysis, Computer vision-based analytical chemistry (CVAC). О заинтересованности исследователей в применении цифровой цветометрии свидетельствует большое число работ, представленных за последние 10 лет в зарубежных и отечественных журналах. Общее число ежегодных публикаций по этой тематике

неуклонно растет (примерно 1000 и 2000 научных статей в 2006 и 2016 гг. соответственно). Динамика числа публикаций по цифровой цветометрии представлена на рис. 1 (по данным Google Scholar, ключевое слово: «digital colorimetry»).

Метод цифровой цветометрии заключается в определении количественных характеристик цвета и установлении их взаимосвязи с содержанием определяемых веществ в анализируемых объектах. Для количественной оценки цвета созданы различные цветовые системы – *RGB*, *CMY(K)*, *XYZ*, *Lab*, *HSB*. Система *RGB* образована тремя основными цветами – красным (*R*), зеленым (*G*) и синим (*B*), которые отвечают монохроматическому излучению с длинами волн 700,0; 546,1 и 435,8 нм соответственно [1]. Система *XYZ* создана на основе *RGB*-модели человеческого зрения. Для получения этой системы проводилось измерение цветовой реакции человека на свет разного спектрального состава. В результате были получены три спектральные кривые (*X*, *Y* и *Z*), близкие по форме кривым *R*, *G*, *B*. Однако основные цвета системы *XYZ* – нереальные цвета, выбранные таким образом, что кривые сложения этой системы не имеют отрицательных участков (в отличие от *RGB*-модели), затрудняющих проведение математических расчетов. В модели *CMY(K)* к базисным относятся голубой (*C*), пурпурный (*M*) и желтый (*Y*) компоненты. Система *HSL* образована такими характеристиками, как цветовой тон (*H*), насыщенность (*S*) и светлота (*L*). В системе *Lab* координата *a* описывает изменение цветности от зеленого до красного, координата *b* – изменение цветности от синего до желтого, координата *L* представляет собой равноконтрастную шкалу ахроматических цветов (белого, серого и черного). Путем преоб-

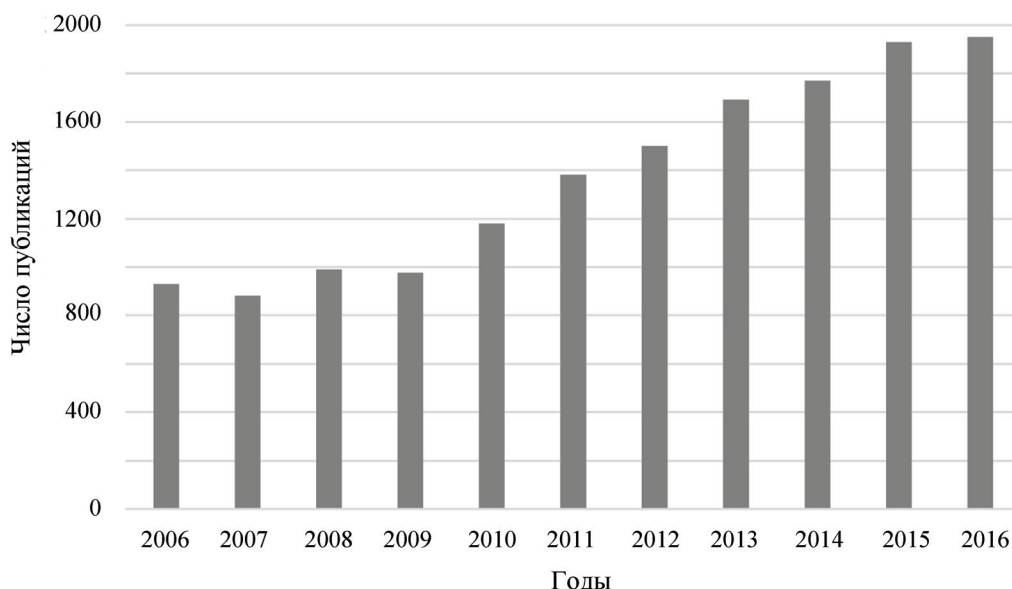


Рис. 1. Динамика числа публикаций по использованию цифровой цветометрии в химическом анализе

разования координат можно переходить из одной цветовой системы в другую. Например, переход от системы *RGB* к системе *XYZ* осуществляется по следующим формулам [2]:

$$X = 0,49 \cdot R + 0,31 \cdot G + 0,20 \cdot B, \quad (1)$$

$$Y = 0,18 \cdot R + 0,81 \cdot G + 0,01 \cdot B, \quad (2)$$

$$Z = 0,01 \cdot G + 0,99 \cdot B. \quad (3)$$

В цветометрическом методе в качестве аналитического сигнала используют амплитудные характеристики. В цветовых пространствах *HSL* и *Lab* амплитудной характеристикой считается изменение светлоты  $\Delta L$ , а две другие не зависят от интенсивности окраски. В пространствах *RGB*, *CMY(K)* и *XYZ* аналитическим сигналом может служить интенсивность каждого из трех цветовых каналов. Процедура анализа методом цифровой цветометрии включает в себя регистрацию излучения видимого диапазона с помощью цифрового анализатора и последующую обработку изображения в графическом редакторе.

Сигнал регистрируют как с помощью специально созданных приборов (портативных устройств, миниспектрофотометров – калибраторов сканеров), так и с помощью бытовых оптических устройств для получения растровых изображений (сканеров, цифровых фотоаппаратов, веб-камер, смартфонов). Каждый из перечисленных выше анализаторов имеет свои достоинства и недостатки. Сертифицированные измерительные устройства имеют достаточно высокую цену. Использование сканеров позволяет легко стан-

дартизовать условия освещения образцов без значимого воздействия внешнего излучения. Веб-камеры и цифровые фотоаппараты представляют собой более мобильные устройства, однако при их использовании возникает проблема влияния внешнего излучения на результаты измерения. При использовании цифровой камеры в качестве детектора появляется возможность варьировать параметры съемки. В работе [3] изучено влияние параметров оптической системы (времени выдержки, величины диафрагмы) и электронных устройств (мощности вспышки, чувствительности ПЗС-матрицы) на чувствительность определения [3]. В отличие от сканеров, веб-камер и цифровых фотоаппаратов смартфоны не нуждаются в подключении к компьютеру для управления или последующей обработки информации. С помощью разработанных приложений смартфоны способны рассчитывать концентрацию определяемого компонента. Недостаток применения смартфонов заключается в низком качестве получаемых изображений. На данный момент больше всего публикаций посвящено измерению сигнала именно с помощью смартфонов [4].

В качестве источников излучения используют лампы накаливания, люминесцентные лампы, светодиоды или линейки светодиодов. Наиболее популярно применение светодиодов [4]. В некоторых исследованиях в качестве источника излучения применяют мониторы с электронно-лучевой трубкой (ЭЛТ) [5] или жидкокристаллические дисплеи [6], на которых последовательно

отображаются 256 цветов, соответствующих видимому диапазону излучения. Такой подход использован для оценки коэффициентов пропускания и отражения в колориметрических тестах [6] и для определения спектральных отпечатков флуоресцирующих соединений [7]. Описанный способ может стать альтернативой применению планшетных фотометров в колориметрических биохимических анализах. Методом цифровой цветометрии анализируют как жидкие образцы, так и сорбаты. Особое внимание уделено применению пенополиуретановых сорбентов [8, 9]. Анализ жидких образцов проводят в стандартных кюветах для спектрофотометрии, пробирках «Eppendorf», пробирках для центрифугирования, микропланшетах.

Сигнал измеряют как непосредственно, так и с использованием специальных держателей, боксов, приставок, позволяющих зафиксировать расстояние до измеряемого объекта и условия освещения, а также избавиться от паразитных засветок, что способствует снижению неопределенности измерений. Конструкция одной из приставок для планшетного сканера представлена на рис. 2. Приставка для цифровой регистрации цветометрического сигнала поглощения состоит из светонепроницаемого корпуса, оптических кювет ( $l = 50$  мм) и системы зеркал с внешним светоотражающим покрытием, которая изменяет направление освещения от слайд-адаптера через кюветы с образцом к оптическому сенсору планшетного сканера [10].

В качестве аналитического сигнала наиболее часто используют эффективное поглощение,

величину которого вычисляют по следующим формулам [4]:

$$A_R = -\lg(R_s/R_b), \quad (4)$$

$$A_G = -\lg(G_s/G_b), \quad (5)$$

$$A_B = -\lg(B_s/B_b), \quad (6)$$

где  $A_R, A_G, A_B$  – эффективные поглощения по красному ( $R$ ), зеленому ( $G$ ), синему ( $B$ ) каналам соответственно;  $R_s, G_s, B_s$  – координаты цвета анализируемого образца;  $R_b, G_b, B_b$  – координаты цвета образца в контрольном опыте.

В качестве аналитического сигнала также используют:

1) величину общего поглощения ( $A_T$ ) [4]

$$A_T = A_R + A_G + A_B; \quad (7)$$

2) цветное отношение ( $CR$ ) [4]

$$CR = R_s/R_r + G_s/G_r + B_s/B_r, \quad (8)$$

где индекс  $r$  относится к образцу сравнения;

3) длину вектора в цветовом пространстве  $RGB$  ( $A$ ) [11]

$$A = (R_{s-b}^2 + G_{s-b}^2 + B_{s-b}^2)^{0,5}, \quad (9)$$

где  $R_{s-b}, G_{s-b}, B_{s-b}$  – разность координат цвета анализируемого образца и образца сравнения.

В некоторых отечественных исследованиях [12–16] для визуализации цветометрических данных использовали лепестковые диаграммы (ЛД). ЛД строят в полярных координатах, на которых откладывают результаты измерений величин интенсивности цветовых компонент в цветовой модели  $RGB$ , полученных после параллельного проведения нескольких цветных реакций. Геометрические параметры ЛД изменяются

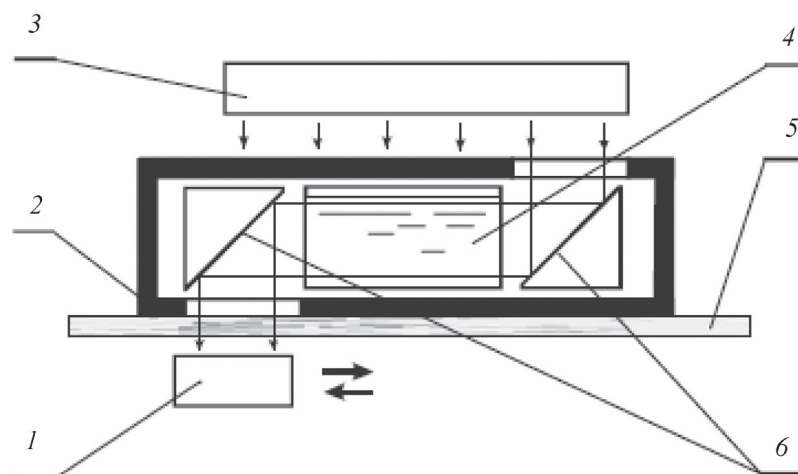


Рис. 2. Конструкция приставки для цифровой регистрации цветометрического сигнала поглощения с помощью планшетного сканера [10]: 1 – движущийся сенсор сканера, 2 – корпус, 3 – осветитель слайд-адаптера, 4 – кювета с анализируемым раствором, 5 – стекло планшетного сканера, 6 – поворотные зеркала

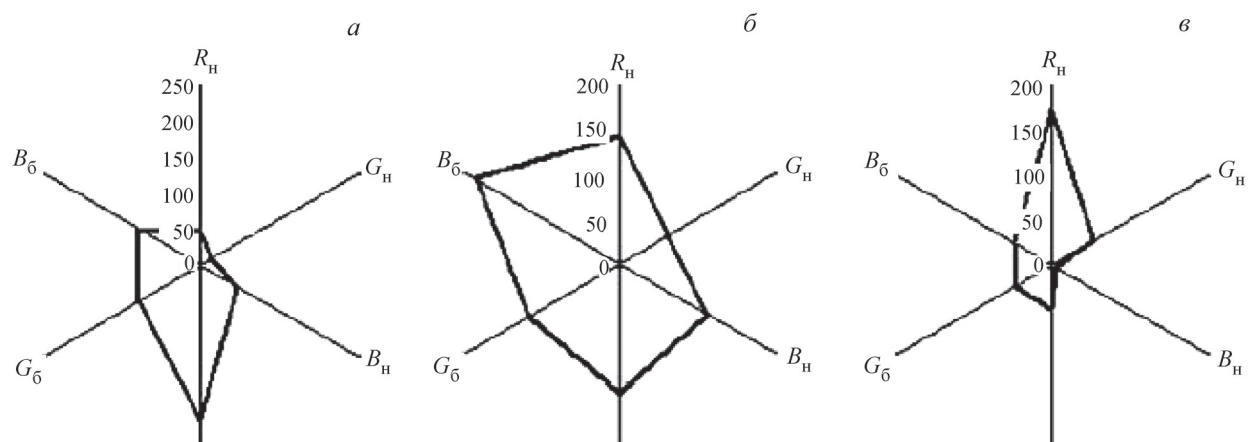


Рис. 3. Лепестковые диаграммы параметров цветности для разных аминокислот с концентрацией 5 г/л: а – L-аспарагин; б – L-лизин; в – глицин [13]

в зависимости от строения соединений, принадлежащих одному классу (рис. 3) и от их концентрации (рис. 4). В качестве интегральных показателей используют геометрические параметры ЛД – площадь и периметр. Предложен способ цветиметрического определения индивидуальных аминокислот или суммы аминокислот в водных растворах с применением биуретовой и нингидриновой реакций [13]. Разработаны методики определения парацетамола и салицилата натрия в водных растворах [15], а также свободных экотоксикантов (бисфенола А, триклозана, нонилфенола) [16].

Большинство опубликованных работ посвящено определению либо одного компонента, либо суммы веществ, принадлежащих одному классу (предложены методики определения суммы ами-

нокислот [13], фенолов [14]). Число публикаций по двухкомпонентному анализу невелико. Разработан алгоритм отдельного цветиметрического определения Fe(III) и Co(II) в их смеси на ППУ, основанный на векторном сложении двух аналитических сигналов, линейно зависящих от содержания окрашенных компонентов [17]. Анализ проводится с помощью заранее построенных градуировочных графиков. Авторы работы отмечают, что метод цифровой RGB-цветиметрии отличается меньшей погрешностью измерений и более правильными результатами по сравнению с методом спектроскопии диффузного отражения.

#### Сочетание цифровой цветиметрии с аналитическими методами разделения и концентрирования

Поскольку детекторы с ПЗС-матрицей позволяют регистрировать любое число зон объекта, представляющих аналитическую ценность, появляется возможность применения цифровой цветиметрии для регистрации тонкослойных хроматограмм, электрофореграмм. Предложена методика цветиметрического определения аминокислот на визуализированных электрофореграммах [18]. Для определения свободных экотоксикантов (бисфенола А, триклозана и нонилфенола) разработан способ, сочетающий метод нормально-фазовой ТСХ и цифровую цветиметрию [16]. Такой подход может стать альтернативой специальным приборам для проведения аналитических исследований методом ТСХ. Например, ориентировочная стоимость сертифицированного денситометра с программой Sorbfil TLC View составляет примерно 400 тыс. руб., в то время как денситометр на базе планшетного сканера с

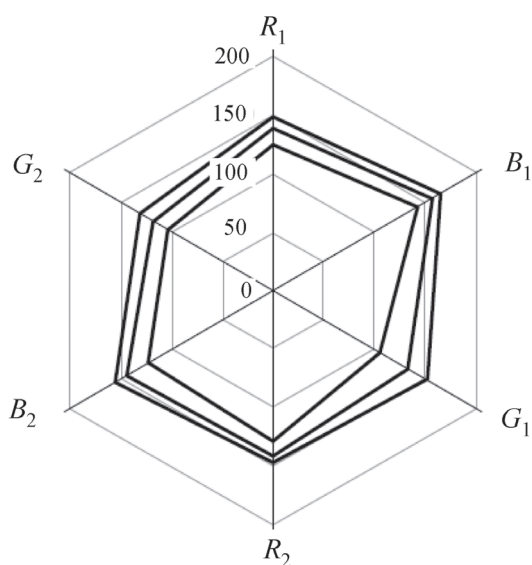


Рис. 4. Зависимость профиля лепестковой диаграммы от концентрации парацетамола в диапазоне 0,033–0,055 г/л [12]

тем же программным обеспечением стоит около 140 тыс. руб.

Цифровую цветометрию комбинируют с современной разновидностью экстракции – микроэкстракцией. Предложены подходы, сочетающие цифровую цветометрию с микроэкстракцией в свободном пространстве (HS-SDME, Headspace-single-drop microextraction) [19] и с дисперсионной жидкость-жидкостной (DLLME, Dispersive liquid-liquid microextraction) [20] микроэкстракцией. В последнем случае измерение аналитического сигнала экстракта проводят с помощью камеры смартфона в самой пробирке, что позволяет избежать стадии отбора фазы, выделившейся в результате центрифугирования. Эффективность данного подхода продемонстрирована при определении анионного ПАВ в пресных водах (DLLME); при определении содержания общей ртути в воде (HS-SDME). Такой комбинированный способ может стать альтернативой подходу, сочетающему микроэкстракцию и фотометрическое определение с помощью микроспектрофотометра «Nanodrop» [21].

Цифровые цветометрические технологии позволяют получать спектры в видимом диапазоне. Описано применение миниспектрофотометров – калибраторов мониторов для регистрации спектров диффузного отражения при твердофазно-спектроскопическом определении соединений [22]. Разработаны портативные фотоколориметры, позволяющие получать спектры поглощения растворов и полупрозрачных образцов. В фотоколориметрах для измерения спектров поглощения используют множество светодиодов или цветные пленочные фильтры [23].

Бытовые оптические приборы используют в качестве детекторов при работе с микрофлюидными системами. Описано применение веб-камеры в сочетании с так называемой «лабораторией на чипе» для определения концентрации уксусной кислоты [24]. Описано применение цифровой камеры при определении глюкозы в моче с помощью микрофлюидного сенсора на бумажной основе, полученного методом восковой печати [25]. Описано применение смартфона при работе с микрофлюидным электрохемилюминесцентным сенсором на бумажной основе [26].

### **Области применения цифровой цветометрии**

Метод цифровой цветометрии используют в пищевой промышленности, в фармацевтических и клинических лабораториях, для экологического мониторинга объектов окружающей

среды. В экологическом анализе цифровую цветометрию применяют для определения неорганических и органических веществ. Предложены способы определения цветности воды [10]; определения содержания общего фосфора [27], алюминия [28], общего железа [28], ртути [29], нитрит-аниона [30] и кальция [30] в воде; определения тринитротолуола в почве [31] и формальдегида в воздухе [32]. В пищевой промышленности цифровую цветометрию используют, например, для выявления фальсификации коровьего молока [33], для определения качества ржи [34], для определения цвета вина [35], для мониторинга тетрациклина в коровьем молоке [36], для определения свежести пива [37], для количественной оценки аллергенов в пищевых продуктах [38], для определения рекомбинантного бычьего гормона роста в молоке [39].

Широкое распространение получила цифровая цветометрия и в фармацевтическом анализе [40]. В этой области цифровую цветометрию используют:

1) для анализа лекарственных растений (разработана методика определения суммы алкалоидов в листьях маклейи [41], а также суммы фенольных соединений в лекарственном сырье сабельника болотного [42]);

2) для оценки качества сборов, в состав которых входят порошки лекарственных трав (разработана экспрессная методика анализа лекарственного растительного сырья (стебли, листья, цветки) по цветовым параметрам, методика апробирована при анализе травы зверобоя и череды трехраздельной [43, 44]);

3) для стандартизации лекарственных средств (разработана денситометрическая методика определения флавоноидов в таблетках, содержащих рутин, методика может использоваться для стандартизации лекарственных средств, содержащих флавоноиды, наравне со спектрофотометрической [45]);

4) для выявления фальсифицированных лекарственных средств без проведения химического анализа [45];

5) для определения белизны порошкообразных и таблетированных лекарственных средств [46];

6) для определения биологически активных веществ и лекарственных средств как по их собственной окраске, так и по окраске продуктов цветных реакций, используемых в фармакопейных тестах [46].

Цифровую цветометрию используют также для определения наркотических средств и запрещенных препаратов [47, 48]. В клинической

### Преимущества и недостатки бытовых оптических устройств как средств измерения в цифровой цветометрии

Характерные особенности	Бытовые оптические устройства		
	смартфон	цифровая фотокамера среднего уровня	офисный планшетный сканер
Сложность конструкции комбинированных цветометрических установок			
Слабая зависимость результатов формирования изображений от внешних условий	–	–	+
Отсутствие необходимости дополнительного источника света	–	–	+
Корректность измерения аналитического сигнала			
Ручная настройка параметров формирования растровых изображений (экспозиция и др.)	+/-	+	+
Возможность отключения режима автоматической цветокоррекции изображения	+/-	+	+
Чувствительность измерений, погрешность результатов анализа, ширина диапазона линейности градуировочной зависимости			
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	+	–	–
Стоимость, тыс. руб.	5–80	30–80	5–20

лабораторной диагностике цифровую цветометрию можно использовать для иммунологических и биохимических исследований. Созданы методики дот-анализа глюкозы в цельной крови и сыворотке, альбумина в моче [49].

#### Перспективы развития цифровой цветометрии

Работа цифровых оптических устройств для получения растровых изображений во многом напоминает функционирование фотоколориметра. Ширина полосы пропускания регистрируемого излучения сопоставима, однако меньшее число абсорбционных светофильтров (3 против 9–11) заметно ограничивает выбор рабочей длины волны. Высокий уровень рассеянного света, обусловленный несовершенством самодельных цветометрических установок, как правило, лимитирует

верхнюю границу определяемого содержания. Применение дешевых ПЗС-матриц, работающих при комнатной температуре без аппаратной системы шумоподавления, а также низкая дискретность «бытовых» форматов хранения растровых изображений (обычно 8 бит на цветовой канал) повышают нижнюю границу определяемого содержания. Тем не менее для химических соединений, имеющих широкополосные оптические спектры поглощения, чувствительность фотометрического и цветометрического определений сопоставима. При этом стоимость бытового оптического гаджета в десятки раз ниже стоимости спектрофотометра [50].

Конечно, система регистрации в цифровой цветометрии имеет очевидные ограничения, однако нельзя не отметить ее преимущества. Каждый диод ПЗС-матрицы представляет собой детектор,

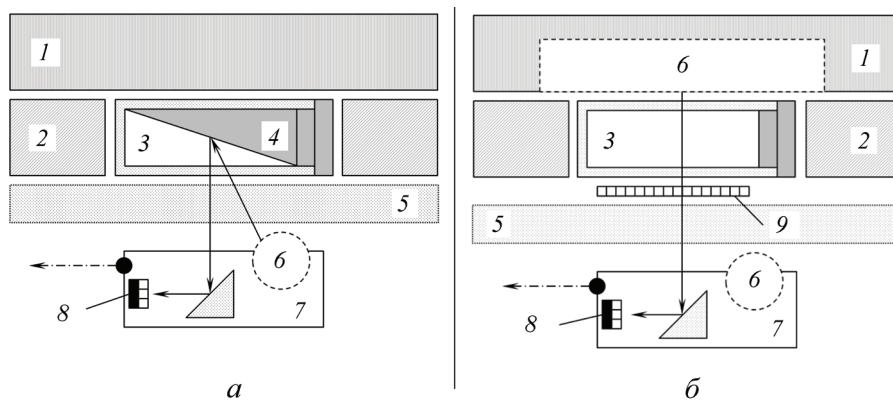


Рис. 5. Блок-схема приставок к планшетному сканеру для проведения цветиметрического (а) и фотометрического (б) анализов: 1 – крышка сканера, 2 – тефлоновая кассета, 3 – кювета для фотометрии, 4 – клинообразный вкладыш, 5 – стеклянный стол сканера, 6 – лампа, 7 – каретка сканера, 8 – ПЗС-матрица, 9 – универсальный линейный пленочный светофильтр

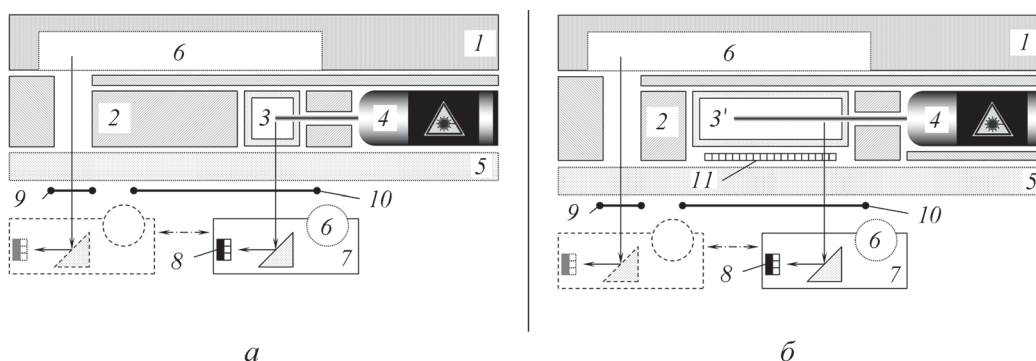


Рис. 6. Блок-схема оптического анализатора (а – режим измерения интегрального сигнала вторичного или рассеянного первичного излучения; б – режим измерения спектра флуоресценции): 1 – крышка сканера, 2 – тефлоновая кассета, 3 – кювета для спектрофлуориметра ( $l = 10$  мм), 3' – кювета для КФК ( $l = 50$  мм), 4 – фиолетовый лазер ( $l = 10$  мм), 5 – стеклянный стол сканера, 6 – лампа, 7 – каретка сканера, 8 – ПЗС-матрица, 9 – зона настройки чувствительности ПЗС-матрицы, 10 – зона измерения сигнала, 11 – линейный светофильтр с варьируемой полосой пропускания

размеры которого много меньше размера изображаемой пробы. Наличие огромного числа таких миниатюрных детекторов, работающих одновременно, но независимо друг от друга, позволяет за предельно короткий промежуток времени измерять аналитический сигнал для большого числа проб (как анализируемых, так и стандартных) в очень широком диапазоне значений экспериментальных факторов (в том числе концентраций аналита), влияющих на результат. Получаемое при этом растровое изображение представляет собой огромный массив многомерных данных, математическая обработка которого позволяет повысить чувствительность определения, снизить погрешность результатов измерений, сместить или расширить диапазон определяемого содержания. При этом возможно нахождение post

factum оптимальной градуировочной зависимости отдельно для каждой анализируемой пробы. Учитывая форм-фактор и принципы функционирования, указанные преимущества проще всего реализовать на практике при использовании офисного планшетного сканера [51]. Преимущества и ограничения разнообразных бытовых оптических устройств для использования в анализе методом цифровой цветиметрии представлены в таблице.

Бытовые оптические устройства для получения растровых изображений представляют собой готовую систему детектирования, снабженную простейшим трехканальным анализатором спектра. Поэтому на их основе можно собирать конструктивно простые и дешевые оптические блоки для регистрации излучения, пропущенного,

рассеянного или испускаемого пробой. В сочетании с различными источниками первичного излучения (в том числе нестандартными, например лазерной указкой) возможно изготовление фотометрических (рис. 5), нефелометрических и флуориметрических анализаторов (рис. 6) [51]. Легкость сочетания бытовых гаджетов как с отдельными оптическими элементами, так и с готовыми устройствами (световоды, микроскопы и пр.) позволяет использовать цветометрию для дистанционного и микроанализа, определения состава объектов в труднодоступных местах [52, 53].

### Заключение

Цифровая цветометрия как метод аналитической химии сформировалась в начале XXI в. и в настоящий момент находится в стадии актив-

ного развития. Множество существующих фотометрических, нефелометрических и флуориметрических методик определения разных классов веществ [1, 54, 55], органичность сочетания описанных в них процедур пробоподготовки с цветометрическим окончанием, а также сравнительная легкость сборки измерительных устройств для решения конкретных задач обуславливают широкое использование этого современного метода химического анализа в самых разных областях – в пищевой и фармацевтической промышленности, медицине, косметологии, экологическом мониторинге объектов окружающей среды. Наглядность, техническая простота и доступность цифровой цветометрии делают целесообразным активное внедрение этого метода в образовательных учреждениях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-23-00012).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.М., Кузнецова О.В. // Усп. хим. 2001. Т. 5. № 70. С. 411.
2. Домасев М.В., Гнатюк С.П. Цвет, управление цветом, цветовые расчеты и измерения. СПб., 2009. 224 с.
3. Apyari V.V., Dmitrienko S.G. // J. Anal. Chem. 2008. Vol. 63. N 6. P. 530.
4. Capitán-Vallvey L.F., López-Ruiz N., Martínez-Olmos A., Erenas M.M., Palma A.J. // Anal. Chim. Acta. 2015. Vol. 899. N 29. P. 23.
5. Filippini D., Svensson S.P., Lundström I. // Chem. Commun. 2003. Iss. 2. P. 240.
6. Filippini D., Comina G., Lundstroem I. // Sens. Actuators B. 2005. Vol. 107. Iss. 2. P. 580.
7. Filippini D., Bakker J., Lundstrom I. // Sens. Actuators B. 2005. Vol. 106. Iss. 1. P. 302.
8. Аняри В.В., Дмитриенко С.Г. // Журн. аналит. хим. 2008. Т. 63. № 6. С. 581.
9. Аняри В.В., Дмитриенко С.Г., Золотов Ю.А. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2011. Т. 52. № 1. С. 36.
10. Болотов В.М., Косарова Е.В., Саввин П.Н., Хрипушин В.В. // Вест. ВГТУ. Фундамент. и приклад. химия, хим. технология. 2013. № 4. С. 154.
11. Santos J.L.O., Leite O.D., Viera A.D.M., Jesus D.S. // J. Braz. Chem. Soc. 2016. Vol. 27. N 1. P. 70.
12. Рудакова Л.В., Россихина Е.Ю., Рудаков О.Б., Хорохордина Е.А., Чан Х.Д. // Сорбц. и хромат. процессы. 2013. Т. 13. Вып. 4. С. 482.
13. Рудакова Л.В., Кудухова И.Г. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 12. С. 20.
14. Рудаков О.Б., Рудакова Л.В., Кудухова И.Г., Головинский П.А., Хорохордина Е.А., Грошев Е.Н. // Аналитика и контроль. 2012. Т. 16. № 4. С. 368.
15. Рудакова Л.В., Рудаков О.Б. // Вестн. ВГУ. Сер. Химия. Биология. Фармация. 2015. № 2. С. 35.
16. Рудаков О.Б., Хорохордина Е.А., Чан Х.Д., Рудакова Л.В. // Сорбц. и хромат. процессы. 2016. Т. 16. № 5. С. 686.
17. Химченко С.В., Экспериандова Л.П., Лемшико Е.Н. // Методы и объекты химического анализа. 2012. Т. 7. № 3. С. 153.
18. Селифанова Е.И., Черноав Р.К., Пысина М.В. // Изв. Сарат. ун-та. Нов. Сер. Химия. Биология. Экология. 2013. Т. 13. Вып. 3. С. 30.
19. Yang F., Liu R., Tan Zh., Wen X., Zheng Ch., Lv Y. // J. Hazard. Mater. 2013. Vol. 183. P. 549.
20. Lima M.J.A., Niscimento C.F., Rocha F.R.P. // Anal. Methods. 2017. Vol. 9. P. 2220.
21. Pillai A.K.K.V., Jain A., Verma K.K. // Talanta. 2010. Vol. 80. P. 1816.
22. Аняри В.В. // Автореф. дис. ... докт. хим. наук. М., 2016. 391 с.
23. Химченко С.В., Экспериандова Л.В. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 3. С. 24.
24. Wongwilai W., Lapanantnoppakhun S., Grudpan S., Grudpan K. // Talanta. 2010. Vol. 81. P. 1137.
25. Songjaroen T., Dungchai W., Chailapakul O., Laiwattanapaisal W. // Talanta. 2011. Vol. 85. P. 2587.
26. Delaney J.L., Hogan C.F., Tian J., Shen W. // Anal. Chem. 2011. Vol. 83. P. 1300.
27. Yang C.X., Sun X.Y., Liu B., Lian H.T. // Chin. J. Anal. Chem. 2007. Vol. 35. N 6. P. 850.
28. Juan A. V. A. Barros, Fagner Moreira de Oliveira, Guilherme de O. Santos, Célio Wisniewski, Pedro Orival Lucas. // Anal. Lett. 2017. Vol. 50. P. 414.
29. Wei Q., Nagi R., Sadeghi K., Feng S., Yan E., Ki S.J., Caire R., Tseng D., Ozcan A. // ACS Nano. 2014. Vol. 8. P. 1121.



30. Lopez-Molinero A., Tejedor Cubero V., Domingo Irigoyen R., Sipiera Piazuelo D. // *Talanta*. 2013. Vol. 103. P. 236.
31. Choodum A., Kanatharana P., Wongniramaikul W., Daeid Niamh N. // *Talanta*. 2014. Vol. 115. P. 143.
32. Sekine Y., Katori R., Tsuda Y., Kitahara T. // *Environ. Technol.* 2016. Vol. 37. P. 1647.
33. Santos P., Wentzell P., Pereira-Filho E. // *Food Anal. Methods*. 2012. Vol. 5. P. 89.
34. Пономарева Е.И., Алехина Н.Н., Журавлева И.А., Саввин П.Н. // *Вестн. ВГТУИТ*. 2013. Т. 4. С. 120.
35. Chung S., Park T.S., Park S.H., Kim J.Y., Park S., Son D., Bae Y.M., Cho S.I. // *Sensors*. 2015. Vol. 15. P. 18197.
36. Masawat P., Harfield A., Nomwong A. // *Food Chem.* 2015. Vol. 184. P. 23.
37. Rico-Yuste A., González-Vallejo V., Benito-Peña E., denito-Peña E. // *Anal. Chem.* 2016. Vol. 88. P. 3959.
38. Coskun A.F., Wong J., Khodadadi D., Nagi R., Tey A., Ozcan A.A. // *Lab Chip*. 2013. Vol. 13. P. 636.
39. Ludwig S.K., Zhu H., Phillips S., Shiledar A., Feng S., Tseng D., van Ginkel L.A., Nielsen M.W., Ozcan A. // *Anal. Bioanal. Chem.* 2014. Vol. 406. P. 6857.
40. Чапленко А.А., Моногарова О.В., Осолок К.В. // *Химико-фармацевтический журнал*. 2019 (принята в печать).
41. Погоцкая А.А., Бузук Г.Н. // *Вестн. фарм.* 2009. Т. 46. № 4. С. 32.
42. Еришк О.А., Бузук Г.Н. // *Вестн. фарм.* 2008. Т. 45. № 4. С. 6.
43. Иванкова М.Н., Бузук Г.Н. // *Вестн. фарм.* 2010. Т. 47. № 4. С. 22.
44. Вернигорова М.Н., Бузук Г.Н. // *Вестн. фарм.* 2013. Т. 50. № 4. С. 28.
45. Бузук Г.Н., Кузьмичева Н.А. // *Вестн. фарм.* 2011. Т. 48. № 3. С. 12.
46. Рудакова Л.В., Васильева А.П., Шведов Г.И., Поплавская Е.В. // *Фармацев. технолог. и упаков.* 2012. № 1. С. 38.
47. Choodum A., Daeid N. // *Talanta*. 2011. Vol. 86. P. 284.
48. Choodum A., Parabun K., Daeid N.N., Kanatharana P., Wongniramaikul W. // *Forensic Sci. Int.* 2014. Vol. 235. P. 8.
49. Старовойтова Т.А. Автореф. Дис. ... докт. мед. наук. М., 2010.
50. Моногарова О.В., Осолок К.В., Аняри В.В. // *Журн. аналит. химии*. 2018. Т. 73. № 11.
51. Oskolok K. V., Shults E. V., Monogarova O. V., Chaplenko A. A. // *Talanta*. 2018. Vol. 178. P. 377.
52. Mudanyali O., Tseng D.Oh.C., Isikman S.O., Sencan I., Bishara W., Oztoprak C., Seo S., Khademhosseini B., Ozcan A. // *Lab Chip*. 2010. Vol. 10. P. 1417.
53. Zhu H., Sencan I., Wong J., Dimitrov S., Tseng D., Nagashima K., Ozcan A. // *Lab Chip*. 2013. Vol. 13. P. 1282.
54. Иванов В.М., Моногарова О.В., Осолок К.В. // *Журн. аналит. химии*. 2015. Т. 70. № 10. С. 1011.
55. Аняри В.В., Горбунова М.В., Исаченко А.И., Дмитриенко С.Г., Золотов Ю.А. // *Журн. аналит. химии*. 2017. Т. 72. № 11. С. 963.

Поступила в редакцию 20.10.2018  
Получена после доработки 10.11.2018  
Принята к публикации 15.11.2018

## DIGITAL COLORIMETRY: ANALYTICAL POSSIBILITIES AND PROSPECTS OF USING

E.V. Shults, O.V. Monogarova\*, K.V. Oskolok

(Chemistry Department of M.V. Lomonosov Moscow State University, Division of Analytical Chemistry; \*e-mail: o\_monogarova@mail.ru)

The researches in the field of digital colorimetry for the last 15 years are analyzed and systematized. Various versions and possibilities of this method are considered, the fields of its application and the prospects for using in chemical analysis are noted. The colorimetric units based on household optical gadgets, allowing to receive bitmap images (smartphone, office flatbed scanner, etc.) are described.

**Ключевые слова:** digital colorimetry, camera, smartphone, office flatbed photo scanner, chemical analysis.

**Сведения об авторах:** Шульц Эльвира Викторовна – студентка химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (shults\_elechka@mail.ru); Моногарова Оксана Викторовна – доцент кафедры аналитической химии химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, канд. хим. наук (o\_monogarova@mail.ru); Осолок Кирилл Владимирович – доцент кафедры аналитической химии химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, канд. хим. наук (k\_oskolok@mail.ru).