

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СМАРТФОНА В ХИМИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ

© 2023 г. З. А. Ч. Шаока<sup>а</sup>, Д. С. Большаков<sup>б</sup>, В. Г. Амелин<sup>а, \*</sup>

<sup>а</sup>Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых  
ул. Горького, 87, Владимир, 600000 Россия

<sup>б</sup>Центр гигиены и эпидемиологии во Владимирской области  
ул. Токарева, 5, Владимир, 600005 Россия

\*E-mail: amelinvg@mail.ru

Поступила в редакцию 03.09.2022 г.

После доработки 23.09.2022 г.

Принята к публикации 26.09.2022 г.

Представлен обзор современного состояния и перспектив развития метода цифровой цветометрии при использовании смартфона в качестве цветорегистрирующего устройства. Систематизированы практические приложения методологии экспресс-анализа в рамках контроля объектов окружающей среды, биологических жидкостей, пищевых продуктов, лекарственных препаратов и некоторых специфических объектов. Рассмотрено многообразие подходов, которые являются основой для формирования аналитического сигнала в цифровой цветометрии. Отмечены возможности (достоинства и недостатки) смартфона, оснащенного различными программными продуктами, как универсального, мобильного, экспрессного и чувствительного инструмента в анализе объектов различного происхождения.

**Ключевые слова:** смартфон, химический анализ, цифровая цветометрия, методология экспресс-анализа, тест-устройство.

**DOI:** 10.31857/S0044450223030131, **EDN:** PUGVQM

На протяжении нескольких десятилетий передовые инструментальные методы, такие как газовая и жидкостная хроматография, капиллярный электрофорез и масс-спектрометрия, были основными инструментами для обнаружения и оценки содержания веществ в образцах биологического происхождения, объектах окружающей среды, продуктах питания и напитках. Основные преимущества этих методов можно свести к высокой специфичности и низким пределам обнаружения. Однако соответствующие инструменты очень дороги, измерения требуют значительных затрат времени, узкоспециализированного лабораторного оборудования и обученного высококвалифицированного персонала. Внедрение в практику рутинного анализа (в том числе вне лабораторного, полевого) гораздо более простых устройств и подходов обнаружения и определения представляет большой научный интерес [1].

Распространение цифровой цветометрии в многочисленных научных работах последних лет является следствием объективных достоинств данного метода [2–4]. В отличие от классических методологий колориметрического, фотометрического и люминесцентного анализа, цветометрический подход обеспечивает возможность исследова-

ования окрашенных и флуоресцирующих растворов, сорбентов, осадков и индикаторных бумаг в рамках одного аппаратного решения. Для увеличения чувствительности и достоверности проводимых измерений в распоряжении химиков-исследователей имеются разного рода возможности: вариативность цветометрических систем, различные методы математической и статистической обработки массива данных, многообразие приемов формирования аналитического сигнала.

Популяризации метода способствует создание портативных и переносных цифровых устройств, среди которых главным образом следует выделить смартфон [1, 5]. Их немаловажным достоинством является высокая скорость передачи полученной информации практически в любую точку планеты. Увеличение разрешающей способности цифровых камер повышает локальность цветометрического анализа, открывая перспективы исследования малых образцов и включений (например, осадков малого объема) [2].

Смартфон – это явление современной жизни, использование которого становится все более распространенным. Его возможности с каждым днем быстро развиваются. Следует выделить не-

сколько особенностей, вследствие которых смартфон стремительно завоевывает статус аналитического инструмента для решения задач идентификации и оценки содержания соединений различной природы. Помимо доступности, мобильности, простоты в применении, данное средство легко укомплектовать интуитивно понятными приложениями, способными проводить регистрацию оптического сигнала (колориметрия, флуоресценция, хемилюминесценция, биолюминесценция, фотолюминесценция, пикселизация), электрохимического сигнала, считывание штрих-кодов, хеометрические расчеты и визуализацию с помощью флуоресцентной микроскопии [1].

Камера является основным аналитическим инструментом смартфона. Она способна снимать цифровое изображение и выполнять дальнейшую обработку с помощью различных приложений для смартфонов. Обнаружение и количественная оценка возможны за счет измерения характеристик цифрового изображения, зависящих от концентрации, таких как цвет, люминесценция, количество пикселей, отраженный или рассеянный свет, показатель преломления.

В данной работе проведен обзор научных работ, в основе которых лежит использование смартфона в качестве аналитического инструмента для контроля объектов различного происхождения цветометрическим методом.

### ЦВЕТОМЕТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, УСТРОЙСТВА И ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ ХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СМАРТФОНА

Расширение возможностей и перспективы развития цветометрического метода при использовании смартфона как современного и портативного инструмента для мониторинговых исследований в различных областях производственного комплекса обусловлены не только многообразием цветометрических систем и доступных программных продуктов, но и значительным спектром устройств и приспособлений, которые в настоящее время разработаны для решения конкретных нетривиальных задач.

В ряде научных обзоров [2–4] подробно рассмотрены основные цветометрические системы, применяемые в химической цветометрии на основе бытовых, офисных и персональных цветорегистрирующих устройств. Наибольшей популярностью в химическом анализе с использованием смартфона для фиксации цветометрических характеристик получили такие системы, как RGB, CIE (1976)  $L^*a^*b$ , HSL, CMYK, YCbCr, CIE 1931 (XYZ), HSV (HSB), которым можно дать следующую общую характеристику:

– **RGB** (от англ. *red, green, blue*) – аддитивная цветовая модель, описывающая способ кодирования цвета для цветовоспроизведения с помощью трех цветов, которые принято называть основными. Выбор основных цветов обусловлен особенностями физиологии восприятия цвета сетчаткой человеческого глаза. Система RGB на практике является наиболее распространенной цветовой моделью для компьютерных изображений и смартфона. В 24-битной версии этой модели возможны 256 значений для каждого из трех основных цветов, что дает производные комбинации в диапазоне 16777216 цветовых решений.

– **HSL, HLS** или **HSI** (от англ. *hue, saturation, lightness (intensity)*) – цветовая модель, в которой цветовыми координатами являются тон, насыщенность и светлота.

– **CIE 1931 (XYZ)** – эталонная цветовая модель, заданная в строгом математическом смысле Международной комиссией по освещению в 1931 г. Модель CIE (1931) XYZ является мастер-моделью практически всех остальных цветовых моделей, используемых в технических областях.

– **CIE 1976  $L^*a^*b^*$  (CIELAB)** представляет собой цветовое пространство, особенно используемое для характеристики цветов поверхности. Цвета характеризуют три размера: яркость  $L^*$  определяется яркостью поверхности; два параметра  $a^*$  и  $b^*$  выражают отклонение цвета от цвета серой поверхности той же яркости. Наличие серой неокрашенной ахроматической поверхности подразумевает явное указание состава света, который освещает окрашенную поверхность. Цветовое пространство CIELAB определяется из пространства CIE XYZ. По сравнению с последним оно имеет то преимущество, что распределение цветов больше соответствует восприятию цветовых различий зрительной системой человека.

– **HSV** (от англ. *hue, saturation, value*) или **HSB** (от англ. *hue, saturation, brightness*) – цветовая модель, в которой координатами цвета являются: *Hue* – цветовой тон, (например, красный, зеленый или сине-голубой). Варьируется в пределах  $0-360^\circ$ , однако иногда приводится к диапазону  $0-100$  или  $0-1$ . *Saturation* – насыщенность; варьируется в пределах  $0-100$  или  $0-1$ . Чем больше этот параметр, тем “чище” цвет, поэтому этот параметр иногда называют чистотой цвета. А чем ближе этот параметр к нулю, тем ближе цвет к нейтральному серому. *Value* (значение цвета) или *Brightness* – яркость; также задается в пределах  $0-100$  или  $0-1$ . Модель была создана Элви Рэем Смитом в середине 1970-х. Она является нелинейным преобразованием модели RGB.

– **CMYK** (от англ. *cyan, magenta, yellow, key* или *black*), четырехцветная автотипия – субтрактивная схема формирования цвета, используемая,

прежде всего, в полиграфии для стандартной триадной печати. Она использует голубой, пурпурный и желтый цвета в роли основных, а также черный цвет.

–  $YCbCr$  ( $Y^*CbCr$ ) – семейство цветовых пространств, которые используются для передачи цветных изображений в компонентном видео и цифровой фотографии.  $Y^*$  – компонента яркости,  $Cb$  и  $Cr$  являются синей и красной цветоразностными компонентами.  $Y^*$  отличается от  $Y$ , которой обозначают яркость без предсказания. Это означает, что для  $Y^*$  интенсивность света кодируется нелинейно с помощью гамма-коррекции.

**Устройства и приспособления для химического анализа с использованием смартфона.** Эволюция данного направления как неотъемлемой составляющей цифровой цветометрии направлена на решение ряда задач: уменьшение пределов обнаружения и определение разрабатываемых приемов; повышение достоверности идентификации химического соединения или группы веществ; реализация многокомпонентного анализа в рамках единичного исследования (в полевых условиях или в условиях ограниченного объема пробы); внедрение чувствительных способов формирования аналитического сигнала (флуоресценция, хемилюминесценция); стандартизация (обеспечение воспроизводимости) условий проведения исследований; миниатюризация; увеличение мобильности и экологичности.

Значительный прорыв в области совершенствования микроустройств и приспособлений для смартфона в рамках методологии экспресс-анализа достигнут за счет активного внедрения 3D-принтеров. Применение современных технологий 3D печати позволяет изготавливать устройства практически любой конфигурации, обусловленной конкретными целями и задачами исследователя. Примечательна возможность создания платформ как обязательной и неотъемлемой части единой колориметрической системы, непосредственно соединенной со смартфоном. Для стандартизации расстояния между объективом камеры и кюветой, используемой для регистрации аналитического сигнала, при цветометрическом определении сульфат-ионов и хинина представлена принципиальная схема впервые разработанного устройства [6]. Конструкция платформы полностью исключает влияние факторов внешней среды на результаты анализа природной воды и тонируемых напитков.

Помимо послойной печати узкоспециализированных микроустройств, требующих значительных манипуляций и технических решений для их должного функционирования, предложены варианты печати на подложке, чаще всего на бумаге (в том числе офисной), для производства готового продукта [7–9]. Методом восковой пе-

чати [7, 9] изготавливают микропланшеты для одновременного анализа значительного количества проб при регистрации цифрового изображения. В работе [8] используют одноразовые платформы из прозрачной пленки с нанесенными угольными электродами методом трафаретной печати для электрохимического непрямого обнаружения бактерий вида *Escherichia coli* и *Enterococcus*.

Особый интерес представляет внедрение в практику цветометрических исследований готовых приспособлений коммерческого производства. В данном случае это позволяет снизить себестоимость единичного анализа за счет уменьшения затрат на приобретение и изготовление комплектующих материалов. Среди приспособлений подобного рода следует выделить полистироловый микропланшет на 96 лунок [10, 11], стеклянные кюветы с длиной оптического пути 10 мм [12, 13], фарфоровый планшет на 6 [14], 9 [15] и 12 лунок [16], микропробирки типа “Эппендорф” [17, 18], пробирки типа “Фалькон” [19, 20].

Для стандартизации условий регистрации цветометрических характеристик посредством смартфона предложены камеры (боксы) изготовленные из различных материалов [21–41]. Приведены примеры использования (пено)полистирола [22, 30, 32, 36], плексигласа [26], древесноволокнистой плиты средней плотности (МДФ) [27, 28], фанеры [35], пластика [31, 34], пенопласта [33] и картона [40] при производстве подобных камер, зачастую обшитых с внутренней стороны черным или белым материалом. Для контроля освещенности боксы в ряде работ [31, 32, 34, 36–41] снабжены светодиодными лампами (лентами).

Рассматривая смартфон как цветорегистрирующее устройство, необходимо отметить, что его статус универсального и мобильного инструмента при решении задач в различных областях аналитической химии обусловлен разработкой доступных программных продуктов, среди которых можно выделить *RGBer*, *ColorGrab*, *ColorMeter*, *GIMP* и другие. Мобильные приложения, как узкоспециализированные, так и универсальные графические редакторы, являются неотъемлемой и обязательной составляющей единого цветометрического подхода. С целью удобства регистрации аналитического сигнала и последующей интерпретации полученных данных авторы исследований работ [22, 23, 26, 42–56] предлагают свои программные продукты, совместимые с операционной системой *Android*.

Развитие цифровой цветометрии на базе персональной техники послужило толчком для совершенствования программных средств. На примере приложения для смартфона *PhotoMetrix* [57] рассмотрены этапы разработки новых, более актуальных версий, возможности одномерного и многомерного анализа, включая хемометриче-

скую обработку данных *in situ*. Разработанное в 2015 г. приложение использовалось для обработки готовых цифровых изображений, полученных камерой смартфона. Первоначальная версия обеспечивала одномерный (калибровку системы) и многомерный анализ при реализации метода главных компонент. Вторая версия программы (*PhotoMetrix PRO*<sup>®</sup>) включала два инструмента в многомерном режиме: иерархический кластерный анализ и частичный метод наименьших квадратов. Третья версия (*PhotoMetrix UVC*<sup>®</sup>) адаптирована для использования с внешней камерой при получении изображений. Особенность программного продукта заключается в декомпозиции изображения средствами нескольких цветиметрических систем (RGB, HSV, HSL). Подобная мультифункциональность удобна с практической точки зрения при выборе оптимальных условий идентификации и определения конкретных химических соединений (или их групп) в анализируемом объекте. Обзор [57] в полной мере отражает общую тенденцию последних лет – модернизацию программных продуктов для мобильных устройств, обеспечение полной работоспособности цветиметрического подхода *in situ*, привлечение хемометрических приемов для повышения достоверности конечных результатов и выводов.

#### ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ МЕТОДА ЦИФРОВОЙ ЦВЕТОМЕТРИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СМАРТФОНА

Несмотря на простоту аппаратного оформления, применение доступных и популярных расходных материалов цифровая цветиметрия с использованием смартфона является конкурентоспособным инструментом для научных, рутинных, полевых, мониторинговых и клинических исследований. Специфичность и эффективность разработанных решений во многом обусловлена уникальной комбинацией механизма формирования аналитического сигнала, изготовленного датчика для смартфона, выбранной цветиметрической системы и программного продукта, способа обработки и оценки полученных первоначальных данных, включая статистические и хемометрические методы.

**Анализ объектов окружающей среды.** В период активного развития и функционирования промышленного комплекса антропогенное воздействие на конкретные объекты окружающей среды имеет значительные масштабы, поэтому априори актуальной является задача разработки простых, быстрых и экономически выгодных средств оценки данного воздействия.

Анализ данных табл. 1 позволяет сделать вывод о значительном многообразии принципов, лежащих в основе работы аналитических устройств, которые

предназначены для идентификации и оценки содержания контаминантов различной природы в объектах окружающей среды.

Среди широкого спектра аналитических задач, решаемых при помощи метода цветиметрии, традиционно наиболее распространенной является определение ионов металлов [4]. Высокая значимость этого направления сохраняется и в настоящее время, что нашло отражение в ряде научных публикаций [12, 28, 42, 43, 58, 59, 61–64]. В силу специфики определяемой группы соединений их переводят в окрашенную форму за счет проведения хромогенных реакций на бумажных носителях [42, 58, 59, 61], в растворе [12] или в органической фазе в присутствии ПАВ [28]. Совершенствование материально-технической базы и появление новых реагентов (или расширение области их применения) позволяет использовать для определения ионов металлов в сочетании с цифровыми цветоизмерительными технологиями такие аналитические эффекты, как эмиссию пламени [64], усиление флуоресценции комплексов с редкоземельными металлами [60], колориметрию при агрегации (плазмонный колориметрический анализ) или распаде наночастиц благородных металлов в присутствии аналита [43, 62, 63].

Предложена двухслойная бумажная микрофлюидная система (БМФС) в качестве колориметрического анализатора на основе смартфона совместно с программным продуктом *CAanal* для чувствительного и селективного определения ртути(II) в пробах воды [62]. Устройство специальной конструкции изготовлено методом струйной печати с использованием димера алкилкетона, легированного немодифицированными наночастицами серебра в зоне обнаружения аналита. Аналитическим сигналом является интенсивность серого в синем цветовом канале ( $\lg(G_B - G_{B_0})$ ), обусловленная распадом наночастиц серебра при воздействии ртути(II) на БМФС. В оптимизированных условиях разработанный подход показал высокую чувствительность, низкий предел обнаружения (0.003 мг/л) при малом объеме пробы (дважды по 2 мкл) и коротком времени анализа. Диапазон линейности составил 0.01–10 мг/л. Кроме того, практическая реализация представленного подхода на различных пробах продемонстрировала приемлемые характеристики, которые согласуются с данными традиционного метода атомно-абсорбционной спектрометрии холодного пара. Данный способ позволяет проводить быстрое, простое (мгновенный отчет о концентрации ртути(II) на дисплее смартфона), чувствительное, селективное определение следовых количеств ртути(II) в пробах воды на месте отбора с высокой производительностью (48 проб/ч при  $n = 3$ ).

Таблица 1. Использование смартфона в анализе объектов окружающей среды

Аналит	Цветометрическая система	Принцип анализа	Устройство/приспособление	Приложение (программное обеспечение)	Аналитический параметр	ДОС	$c_{\min}$	Объект анализа	Литература
Fe(II) Ni(II) Cr(VI) Cu(II) Al(III) Zn(II)	RGB	Колориметрия хромогенных реакций на бумажном носителе	Двухслойная трехмерная бумажная микрофлюидная система	—*	R + G + B	0.3–18 мг/л 0.4–23 мг/л 0.2–17 мг/л 0.05–24 мг/л 0.1–10 мг/л 0.05–24 мг/л	0.2 мг/л 0.3 мг/л 0.1 мг/л 0.03 мг/л 0.08 мг/л 0.04 мг/л	Природная вода	[58]
Zn(II) Cr(VI) Cu(II) Pb(II) Mn(II)	RGB	Колориметрия хромогенных реакций на бумажном носителе	Аналитическое устройство на бумажной основе	Color Picker	R + G + B	2–6 мг/л 0.1–0.5 мг/л 0.3–8 мг/л 0.08–0.6 мг/л 0.2–1 мг/л	0.63 мг/л 0.07 мг/л 0.17 мг/л 0.03 мг/л 0.11 мг/л	Сточная вода	[59]
Co(II) Cu(II) Fe(III) Mn(II) Cr(VI) Ni(II)	RGB	Колориметрия хромогенных реакций на бумажном носителе	Бумажная микрофлюидная система (чип), беспилотный летательный аппарат, пробоотборник	ПО для iOS, созданное на базе Xcode 8.0 и языка программирования Swift 3.0	R + G + B	8–81 нг 45–500 нг 200–2000 нг 10–100 нг 150–3000 нг 80–800 нг	8 нг 45 нг 190 нг 10.08 нг 150 нг 80 нг	Взвешенные твердые частицы в воздухе	[42]
Pb(II)	RGB	Усиление флуоресценции комплекса Ir(III) с одноцепочечной ДНК в конформации G-квадруплекса	Бумажная микрофлюидная система с режимом фиксации (приостановки) капель	—	R	10–100 нМ	—	Вода	[60]
Cs(I)	RGB	Колориметрия хромогенной реакции с хризойдином G на бумажном носителе	Аналитическое устройство на бумажной основе (многоразовый датчик)	ImageJ	R + G + B	100–50000 мкг/л	100 мкг/л	Вода	[61]
Hg(II)	RGB	Плазмонный колориметрический анализ: колориметрия при агрегации наночастиц Au в присутствии ионов Hg(II)	Платформа на смартфон (оптико-механическое считывающее устройство)	ПО для Android	G/R	0–2000 мкг/л	3.5 мкг/л	Вода	[43]

Таблица 1. Продолжение

Аналит	Цветометрическая система	Принцип анализа	Устройство/приспособление	Приложение (программное обеспечение)	Аналитический параметр	ДОС	$c_{\min}$	Объект анализа	Литература
Hg(II)	RGB	Колориметрия при распаде наночастиц Ag в присутствии ионов Hg(II)	Двухслойная бумажная микрофлюидная система	CApal	$\lg(G_B - G_{Bo})$	0.01–10 мг/л	3 мкг/л	Вода	[62]
Hg(II)	RGB	Колориметрия при распаде комплекса наночастиц Au с молекулами ДНК	Одноэтапный конкурентный биосенсор бокового (латерального) потока	Color, Color Circus, Its Colors	R	4–2048 нМ	4 нМ	Волопроводная вода	[63]
K	HSV	Колориметрия мембраны из ПВХ с дибензо-18-краун-6-эфиром в качестве ионофора, тетрагидрофенилборатом калия и нильским синим в качестве хромоионофора	Колориметрический сенсор, световая палатка для фотостудии	ПО на базе платформ JavaME, Matlab	H	$3.1 \times 10^{-5} - 0.1$ М	$3.1 \times 10^{-5}$ М	Вода	[44]
Na	RGB	Колориметрия платмени (эмиссия)	–	–	V (векторная норма)	20–160 мг/л	6 мг/л	Кокосовая и морская воды	[64]
Cl <sub>2</sub>	RGB	Колориметрия реакции с реактивом KI–крахмал	Эталонная сцена (фон), микрофлакон (виала)	–	CR	0.3–1.0 мг/л	0.01 мг/л	Вода	[21]
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	RGB	Продукт восстановления фосфорномолибденовой кислоты	Бокс для колориметрического анализа из пенополистирола (8 × 10 × 18 см)	Phosphorus Analysis на языке программирования Java для платформы Android	R + G + B	0.0–1.0 мг/л	0.01 мг/л	Почва	[22]
F <sup>-</sup>	RGB	Колориметрия обесцвечивания растворов комплекса циркония с ксиленовым оранжевым	Тестовая камера (стандартный контейнер с фиксированной геометрией)	Akvo Caddisfly на языке программирования Java для платформы Android	G+B	0–2 мг/л	–	Вода	[23]

Таблица 1. Продолжение

Аналит	Цветометрическая система	Принцип анализа	Устройство/приспособление	Приложение (программное обеспечение)	Аналитический параметр	ДОС	$c_{\min}$	Объект анализа	Литература
$\text{NO}_3^-$	RGB	Колориметрия продукта реакции нитритов (после восстановления нитратов цинком) с реактивом Грисса	Микропланшет на 96 лунок	ImageJ	G	0.10–2.5 мг/л	0.04 мг/л	Поверхностные воды	[11]
$\text{NO}_2^-$	RGB, CIE 1976 L*a*b*	Колориметрия окрашенных растворов аналитов	Платформа – портативная фото студия (40 × 40 × 25 см)	ChemTrainerSIR	R + G + B, $\Delta E^*$	0–0.5 мг/л 0–0.3 мг/л 0–1.0 мг/л 0–0.5 мг/л	–	Вола	[24]
Cr(VI)									
Фенол									
pH	RGB, CIE 1931	Колориметрия индикаторных бумаг	–	–	x, y	1–12	–	Вола	[65]
АПAB	RGB	Колориметрия ионных ассоциатов аналитов с метиленовым синим после ДЖЖМЭ	Модуль для получения цифровых изображений в контролируемых условиях	Color Grab 3.3.3	$A_T$	10–70 мкг/л	2.6 мкг/л	Природная вода	[25]
Хлор активный		Колориметрия аналитов с N,N-диэтил-п-фенилдиамином после экстракции “ в точке помутнения ”					70 мкг/л		
Формальдегид	RGB	Колориметрия продукта реакции аналита с ацетилацетоном при жидкостной микроэкстракции в каплю	Бокс (коробка) для колориметрического анализа из плексигласа (12 × 8 × 9 см)	Локальное приложение для Android	1/V	0.3–10 мг/л	0.1 мг/л	Сточная вода, текстиль	[26]

Таблица 1. Продолжение

Аналит	Цветометрическая система	Принцип анализа	Устройство/приспособление	Приложение (программное обеспечение)	Аналитический параметр	ДОС	$c_{\min}$	Объект анализа	Литература
Взрывчатые вещества: трипероксид триацетона, гексаметилен трипероксид диамин, 4-амино-2-нитрофенол, нитробензол, пикриновая кислота	RGB	Колориметрия продуктов реакции аналитов с иодидом калия, креатинином и анилином	Колориметрический датчик (сенсор) на бумажной основе, закрытая камера (бокс)	Разработанное авторами ПО, Statistica 12.0 (StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA)	R + G + B	–	0.2 мкг 1.0 мкг 0.4 мкг 0.1 мг 2.3 мкг	Почва	[45]
Хлорпирифос	УСbCr	Колориметрия ингибирования аналитом гидролиза <i>n</i> -нитрофенолпальмитата липазой до <i>n</i> -нитрофенола	Устройство на бумажной основе	MATLAB	Cb	0.1–1.0 мг/л	0.065 мг/л	Вода	[66]
Малатион Параоксон	RGB	Колориметрия ингибирования аналитами гидролиза индоксиацетата ацетилхолинэстеразой до индиго	Устройство на бумажной основе	Разработанное авторами ПО	R + G + B	$10^{-8}$ – $10^{-6}$ М	–	Вода	[46]
Фенол	RGB	Колориметрия экстракта при ультразвуковой ДЖЖМЭ после дериватизации аналита с 4-аминоантипирином в присутствии окислителя	Лабораторный деревянный бокс (ящик) из МДФ (58 × 30 × 30 см)	Color Grab (version 3.6.1, Loomatix®)	A	5–300 мкг/л	1.7 мкг/л	Вода	[27]

Таблица 1. Окончание

Аналит	Цветометрическая система	Принцип анализа	Устройство/приспособление	Приложение (программное обеспечение)	Аналитический параметр	ДОС	$C_{\min}$	Объект анализа	Литература
Cr(III) Cr(VI)	RGB	Колориметрия экстракта при ЖЖМЭ с помощью воздуха (AALLME) после образования комплекса аналита с 1,5-дифенилкарбазидом	Бокс колориметрического анализа- тора из МДФ (20 × 20 × 15 см)	Color Grab (version 3.6.1 (с) 2017 LOOMATIX Ltd)	$S_A (G)$	3–350 мкг/л	0.9 мкг/л 3 мкг/л	Вода	[28]
Cr(VI)	CIE- $L^*a^*b^*$	Колориметрия комплекса аналита с 1,5-дифенилкарбазидом	Стеклокюветы с длиной оптического пути 10 мм, самодельная платформа для получения изображений	Photoshop CC 2017, ImageJ 1.80	$\Delta E_{L^*a^*b^*}$	0–0.8 мг/л	0.01 (0.06) мкг/мл	Природные и сточные воды	[12]
Тетрациклины (6 веществ)	RGB	Цветометрия сенсibilизированной аналитами флуоресценции Eu(III) на его гидроксиде	Цветометрия комплекса на осадке в пробирке типа “Эппендорф”	RGBer	$A_T$	(0.005–0.08)–(0.1–1) мкг/мл	0.001–0.004 мкг/мл	Сточные и природные воды	[17]
Хинолоны (17 веществ)	RGB	Цветометрия флуоресценции аналитов на силикагеле после статической сорбции	Цветометрия сорбата на силикагеле в центрифужной пробирке типа Фалькон	RGBer	$A_T$	(0.002–0.01)–0.2 мкг/мл	0.0007–0.004 мкг/мл	Природные воды	[19]
Фторхинолоны (13 веществ)	RGB	Цветометрия флуоресценции аналитов на силикагеле после статической сорбции	Цветометрия сорбата на силикагеле в центрифужной пробирке типа Фалькон	RGBer	$A_T$	0.002–0.2 мкг/мл	–	Природные воды	[20]
Тетрациклины (6 веществ)	RGB	Цветометрия сенсibilизированной аналитами флуоресценции Eu(III) на его гидроксиде	Цветометрия комплекса на осадке в пробирке типа “Эппендорф”	RGBer	$A_T$	0.005–0.1 мкг/мл	–	Природные воды	[18]

\* Информация не указана.

Применение привычных колориметрических реакций с образованием окрашенных аналитических форм в рамках анализа объектов окружающей среды нашло отражение при определении неорганических анионов [11, 22–24], фенола [27], активного хлора [21, 25], формальдегида [26] и взрывчатых веществ [45].

В исследовании [26] представлено сочетание жидкостной микроэкстракции в каплю воды (раствора) в свободном пространстве и анализа окрашенной капли с помощью смартфона для определения формальдегида в качестве модельного токсиканта в образцах текстиля и сточных вод. Сконструировано простое устройство (бокс для колориметрического анализа из плексигласа) для обнаружения аналита. Методика основана на одновременной экстракции формальдегида в водную каплю и переводе его в окрашенное соединение реакцией с ацетилацетоном. Мобильный телефон использовали для обнаружения проявленного цвета и анализа изображения. В работе оптимизированы ключевые экспериментальные параметры, влияющие на чувствительность, включая конструкцию устройства, состав капель, ионную силу раствора, температуру и время экстракции. Диапазон определяемых содержаний (ДОС) составил 0.3–10 мг/л с пределом обнаружения 0.1 мг/л. Подход успешно применен для определения свободного формальдегида в образцах текстиля и сточных вод при степени извлечения 80–97% и 91–99% соответственно.

Предложен новый подход к фотометрическим измерениям в сочетании с процедурой жидкостной экстракции [25]. Подход позволяет избежать недостатков спектрофотометрических измерений в УФ- и видимой областях спектра, вызванных ограниченным объемом экстракта образца, таких как уменьшение оптического пути или необходимость разбавления. Кроме того, исключается необходимость разделения фаз и, следовательно, потеря экстракта перед измерениями. Возможность применения данного приема продемонстрирована с помощью дисперсионной жидкостной микроэкстракции (ДЖЖМЭ) для определения анионных поверхностно-активных веществ (АПАВ) в пресных водах с метиленовым синим и экстракции в точке помутнения для определения свободного хлора в водопроводной воде с *N,N*-диэтил-*n*-фенилендиамином. В качестве аналитического сигнала принимали значения каналов RGB. При определении АПАВ методом ДЖЖМЭ линейный отклик достигнут в диапазоне 10–70 мкг/л с пределом обнаружения 2.6 мкг/л. Наблюдали высокие значения степеней извлечения (87.8–99.7%) и корреляцию результатов с эталонным методом. Определение свободного  $\text{Cl}_2$  характеризовалось линейным откликом сигнала в диапазоне 0.1–2.0 мг/л с пределом обнаружения 70 мкг/л.

Колориметрию ингибирования аналитами гидролиза субстрата под действием фермента, сопровождающуюся образованием окрашенного продукта реакции, применяли для определения хлорпирифоса [66], малатиона и параоксона [46] в воде. Авторами подобных приемов разработано устройство на бумажной основе, предназначенное для использования в полевых условиях. При оценке содержания хлорпирифоса изучены различные модели цветового пространства (RGB, HSV и YCbCr), в результате чего для последующих расчетов выбрана координата Cb в силу более высокой линейности ( $R^2 = 0.988$ ) по отношению к концентрации пестицида [66]. В работе [46] представлено приложение для обработки изображений на месте, которое использует новый алгоритм для количественной оценки интенсивности цвета и связывания его с концентрацией загрязняющих веществ. Данное приложение для мобильного телефона разработано на основе алгоритма подсчета пикселей, который работает с меньшей предвзятостью и субъективностью пользователя, чем обычно используемое лабораторное программное обеспечение *ImageJ*.

В рамках данного раздела обособленное место занимает цикл работ [17–20], посвященный расширению возможностей цветометрического подхода для определения антибактериальных препаратов различных классов в природных и сточных водах по собственной флуоресценции аналитов на силикагеле после статической сорбции [19, 20] и сенсibilизированной аналитами флуоресценции Eu(III) на его гидроксиде [17, 18]. Отличительной особенностью подобных методик является создание колориметрических датчиков на основе привычных лабораторных комплектующих материалов, отличающихся доступностью и простотой в обращении и не влияющих на мобильность системы. Использование чувствительных техник формирования аналитического сигнала в сочетании с высокой локальностью проводимых измерений (сорбенты и осадки малого объема) обеспечивает пределы обнаружения на уровне 0.002–0.08 мкг/мл.

**Образцы биологического происхождения.** Новой вехой в истории развития данного исследовательского направления является создание датчиков и устройств с цветовой фиксацией результата химической или ферментативной реакции. Регистрация и интерпретация полученной информации проводится при использовании персонального цветорегистрирующего устройства – смартфона (табл. 2).

Среди разработанных различными научными группами принципиальных схем для анализа образцов биологического происхождения (биологических жидкостей) можно выделить приемы, направленные на оценку функционального со-

Таблица 2. Использование смартфона в анализе образцов биологического происхождения

Аналит	Цветометрическая система	Принцип анализа	Устройство/ приспособление	Приложение (программное обеспечение)	Аналитический параметр	ДОС	$C_{\min}$	Объект анализа	Литература
Алпразолам (бензодиазепины)	RGB	Колориметрия при агрегации наночастиц Ag стабилизированных цитрат-ионами в присутствии аналита	Бумажная микрофлюидная система	Color Helper	R	10–180 нг/мл	10 нг/мл	Кровь, стекловидное тело	[67]
Допамин (дофамин)	RGB	Колориметрия при восстановлении хлорида железа под действием аналита до $Fe^{2+}$ с последующей реакцией с феноantroлином	Бумажная микрофлюидная система	Adobe Photoshop CS2	R + G + B	0.527–4.75 мкМ	0.37 мкМ	Сыворотка плазма крови	[68]
Каптоприл	RGB	Колориметрия комплекса аналита с хлоридом палладия(II)	Фарфоровый планшет на 9 лунок	ImageJ	B	$3.12 \times 10^{-5}$ – $1.21 \times 10^{-3}$ М	$8.06 \times 10^{-6}$ М	Синтетическая моча	[15]
Витамин Д	HSB	Колориметрия при иммуноанализе с наночастицами золота	Поверхностная колориметрическая реакция (тест-полоска)	—*	$\Delta H = B_{\text{det}} - B_{\text{ref}}$	15–110 нМ	15 нМ	Кровь	[69]
Холестерин	RGB, HSL	Колориметрия ферментативной реакции аналита (до образования хинониминового красителя)	Тест-полоска с сухим реагентом	ПО для платформы iPhone iOS	S (I/S)	120–400 мг/дл	—	Кровь	[47]
Малоновый диальдегид	RGB	Колориметрия агарозного геля после экстракции и дериватизации аналита 2-тиобарбитуровой кислотой	Сорбционная экстракция с вращающимся диском	Color Grab	G	5.5–1000 нг/мл 63–12500 нг/г	1.5 нг/мл 12.5 нг/г	Биологические жидкости, пищевые продукты (молоко, масло)	[70]

Таблица 2. Продолжение

Аналит	Цветометрическая система	Принцип анализа	Устройство/ приспособление	Приложение (программное обеспечение)	Аналитический параметр	ДОС	$c_{\min}$	Объект анализа	Литература
Хлориды	—	Колориметрия тушения флуоресценции продукта взаимодействия цитрат-ионов и <i>L</i> -цистеина в присутствии аналита	Флуоресцентный сенсор с кюветой для раствора	—	$I_0/I$ (тушение флуоресценции)	0.8–200 мМ	—	Пот	[71]
<i>L</i> -Лактат	RGB, HSV	Рефлектометрия ферментативной реакции аналита	Биосенсор на функционализированной бумажной подложке	ImageJ (v.1.46)	H (1/H)	0.6–10 мМ	0.1 мМ (0.9 мг/дл)	Ротовая жидкость	[72]
Глюкоза	RGB	Рефлектометрия (колориметрия) реакции аналита на подложке с оксидом графена	Бумажная микрофлюидная система	ПО для iOS, созданное на базе Xcode 8.0 и языка программирования Swift 3.0; MATLAB	$\Delta P$	0–1 мМ	0.02 мМ	Ротовая жидкость	[48]
Глюкоза, белок, рН, красные кровяные тельца (Эритроциты)	RGB	Колориметрия реагентных полос на бумажной основе	Микрофлюидная система на основе бумаги и пластика	UrineAnalysis для Android	H	0–300 мг/дл 0–2000 мг/дл 5.25–7.5 0–250 клеток/л	—	Моча	[73]
Мочевая кислота, глюкоза	RGB	Колориметрия ферментативных хромогенных реакций на бумажном носителе	Аналитическое устройство на бумажной основе	ImageJ (1.48v)	$\Delta Gray$	0.01–1.0 мМ 0.02–4.0 мМ	0.003 мМ 0.014 мМ	Сыворотка крови	[74]

Таблица 2. Окончание

Аналит	Цветометрическая система	Принцип анализа	Устройство/ приспособление	Приложение (программное обеспечение)	Аналитический параметр	ДОС	$C_{\min}$	Объект анализа	Литература
$Fe^{+3}$	—	Колориметрия обесцвечивания наночастиц Ag в присутствии ЦТАБ под действием аналита	Аналитическое устройство на бумажной основе	ImageJ	$\Delta S$	50–900 мкг/л	20 мкг/л	Вода и плазма крови	[75]
Глюкоза	RGB	Колориметрия мультиферментных каскадных реакций	Микрофлюидная система на основе ткани и бумаги	Color Name	$V_R$	50–600 мкМ	13.49 мкМ	Пот	[76]
Сывороточный альбумин, трансферрин	—	Колориметрия реакции разрушения комплекса нанокуркумин- $VO^{2+}$ при действии аналитов	Оптический нанозонд	MATLAB (version R2010a)	$\Delta A$	50–200 нМ 20–140 нМ	11 нМ 8 нМ	Сыворотка и моча	[77]
Этанол	RGB	Колориметрия бумажной тест-полоски с иммобилизованным <i>p</i> -нитрофенолом	Датчик на бумажной основе	ImageJ	$B$	0.04–0.1 об.%	0.03 об.%	Слюна	[78]
$Cl^-$ , глюкоза, молочная кислота (лактат-ион), pH	RGB	Колориметрия ферментативных и хромогенных реакций	Мягкое эпидермальное микрофлюидное устройство	—	%RGB	0–625 мМ 0–25.0 мМ 0–100 мМ 5.0–8.5 ед. pH	—	Пот	[79]
pH	RGB	Колориметрия индикаторной полоски	Тест-полоска, состоящая из индикаторной полоски, эталонной полоски и светорассеивателя	Разработанное авторами ПО	$H$ (оттенки)	5.0–9.0 1.0–14.0	—	Пот, слюна	[49]

\* Информация не указана.

стояния организма, внутренних органов, а также обмена веществ [47–49, 69–77, 79], и средства, позволяющие определить содержание лекарственных и наркотических веществ [15, 67, 68, 78].

Возможности мониторинга состояния здоровья, обеспечиваемые сбором и количественным химическим анализом пота, могут дополнить или потенциально устранить необходимость в подходах, основанных на спорадической оценке образцов крови. В работе [79] представлена мягкая, гибкая и растяжимая микрофлюидная система, которая может тесно и прочно прикрепляться к поверхности кожи без химического и механического раздражения. Система каналов (капилляров) обеспечивает поток пробы от потовых желез через микрофлюидную сеть и набор резервуаров. Встроенные химические анализаторы (индикаторные зоны) колориметрически реагируют на такие маркеры, как глюкоза, рН, хлорид- и лактат-ионы. Исследования на людях продемонстрировали функциональность этого устройства во время тренировок в контролируемой среде и во время велогонок на длинные дистанции в засушливых условиях на открытом воздухе. Помимо концентрации глюкозы, хлорид-, лактат-ионов и уровня рН, система позволяет рассчитать количественные значения скорости потоотделения и общей потери пота.

Специфика объектов исследования и определяемых компонентов объясняет преобладающее число научных публикаций с упором на хромогенные и ферментативные реакции. Однако их практическая реализация характеризуется внушительным спектром технических решений (табл. 2), направленных на проведение чувствительного определения аналитов в широком диапазоне определяемых содержаний, в том числе с использованием экстракции [70]. Кроме того, для детектирования органических биологически активных веществ (алпразолам, витамин Д) и ионов  $Fe^{3+}$  в качестве аналитического реагента предложено использовать наночастицы благородных металлов [67, 69, 75].

Содержание хлорид-ионов в поте является важным диагностическим маркером кистозного фиброза (муковисцидоза), но внедрение систем диагностики на месте затруднено в силу высокой стоимости существующих хлорид-селективных датчиков. Для обеспечения недорогих диагностических решений авторы работы [71] создали платформу, адаптированную под стандартную ювету, в качестве неотъемлемой части хлоридомера на базе смартфона. В качестве аналитического параметра в данной конструкции применяется тушение флуоресценции продукта взаимодействия цитрат-ионов с *L*-цистеином (*SA*-цистеина) в присутствии хлорид-ионов. Представленный сенсор продемонстрировал широкий линей-

ный диапазон определяемых концентраций хлорид-ионов 0.8–200 мМ и время отклика, ограниченное диффузией. Клиническая валидация проводилась с использованием биопроб пота людей с муковисцидозом и без него, что позволило получить необходимое количество статистических данных для надежной диагностики заболевания.

Разработана простая, точная и недорогая аналитическая процедура определения каптоприла с помощью цифрового изображения [15]. Данная стратегия основана на реакции между каптоприлом и хлоридом палладия(II), в результате которой образуется желтый водорастворимый комплекс с максимумом поглощения при длине волны 380 нм. Камера смартфона и предназначенное для управления внутренним освещением портативное устройство объединены при получении цифровых изображений реакционных смесей. Для установления количественной связи между интенсивностью цвета и концентрацией аналита применяли цифровую обработку изображений с применением RGB. При использовании в качестве аналитического параметра значения интенсивности синего канала *B* получена градуировочная зависимость в диапазоне концентраций от  $3.12 \times 10^{-5}$  до  $1.21 \times 10^{-3}$  моль/л. Пределы обнаружения и определения составили  $8.06 \times 10^{-6}$  и  $2.69 \times 10^{-5}$  моль/л соответственно. Степень извлечения в образцах синтетической мочи варьировалась от 97.1 до 102.9%. Результаты сравнивали с эталонным методом. При доверительной вероятности 95% существенных различий не обнаружено. Разработанный подход имеет бюджетные и экологические преимущества, связанные с использованием дешевых и простых в обращении устройств и потреблением очень малых объемов реагента (800 мкл на одно определение). Этот аналитический инструмент может быть полезен для лабораторий с ограниченными финансовыми ресурсами при соблюдении принципов “зеленой” химии.

**Анализ пищевых продуктов.** В эпоху бурного развития разнообразных способов фальсификации продуктов питания и распространения недоброкачественной продукции на рынке важность совершенствования методологии экспресс-анализа сложно переоценить. Кроме того, потенциальные пути контаминации сырья на различных этапах производства (от получения до хранения) могут оказывать существенное влияние на безопасность и качество готовой продукции [80].

Анализ литературных данных (табл. 3) показал, что цветометрический подход нашел применение для определения неорганических и органических веществ природного и синтетического происхождения в молочной [29, 30, 35–37, 84–87, 92, 96–98, 100], мукомольно-крупяной [95], муч-

ной [93], спиртосодержащей [14, 31–34, 99], соковой [53], мясной [92, 100], масложировой [82] продукции, в морепродуктах [91], овощах и фруктах [16, 81, 100], зерне [52, 54], питьевой воде [6, 8, 37, 51, 53, 87–89, 98, 100] и напитках [6, 83, 94, 99].

Универсальность подхода обусловлена возможностью сочетания привычных в использовании и доступных широкой аудитории смартфонов с простыми тест-устройствами для химического анализа. Спектр контролируемых показателей средствами цветометрии внушительен, что подтверждает его конкурентоспособность по отношению к прочим инструментальным методам. В работах [9, 81] представлена универсальная стратегия кислотно-основного титрования (определение титруемой кислотности) с использованием индикаторов природного происхождения (антоцианов и экстракта кожуры жаботикабы). Колориметрические реакции проводили с использованием полистирольного микропланшета [81] или массива из двенадцати микрозон диаметром 5 мм, напечатанного воском на фильтровальной бумаге [9]. Интенсивность цвета фиксировали с помощью смартфона в режиме реального времени [9] или после получения цифрового изображения [81] с последующим анализом посредством бесплатного приложения *Photometrix*<sup>®</sup> [9]. Кривые титрования соответствуют кривым, полученным с применением традиционного титриметрического метода.

Применение цветометрического метода на базе смартфона обеспечивает обнаружение бактерий вида *Escherichia coli* и *Enterococcus*, индикаторов фекального загрязнения воды и продуктов питания с использованием субстратов, специфичных для ферментов, продуцируемых каждым видом [8]. *E. coli* продуцируют β-галактозидазу и β-глюкозидазу, тогда как *Enterococcus* spp. продуцирует β-глюкозидазу. Наличие субстратов обеспечивает выделение *n*-нитрофенола, *o*-нитрофенола или *n*-аминофенола в качестве продуктов. Установлено, что электрохимическое обнаружение с использованием угольных электродов с графитной печатью обеспечивает оптимальную производительность на недорогих и одноразовых платформах с прозрачной пленкой. Обнаружение электрохимически активных субстратов (*n*-нитрофенола, *o*-нитрофенола или *n*-аминофенола) осуществляли соответственно на уровне 1.1, 2.8 и 0.5 мкМ. Для обнаружения нитрофенолов разработана колориметрическая система луночных планшетов на бумажной основе из простой картонной коробки и смартфона. Пределы обнаружения *n*-нитрофенола и *o*-нитрофенола составили 81 и 119 мкМ соответственно. Хотя колориметрические принципы детектирования давали более высокие пределы обнаружения, чем электрохимические, оба метода обеспечивали одинаковое время обнаружения бактерий. Низкие кон-

центрации ( $10^1$  КОЕ/мл) патогенных и непатогенных изолятов *E. coli* и ( $10^0$  КОЕ/мл) штаммов *E. faecalis* и *E. faecium* обнаружены в течение 4 и 8 ч после предварительного обогащения. Образцы проростков люцерны и воды из лагуны служили модельными образцами пищевой продукции и воды в рамках апробации описанного подхода. Образцы воды не дали положительных результатов, в то время как образцы проростков дали положительный результат в течение 4 ч после предварительного обогащения. Положительное обнаружение заранее зараженных ( $2.3 \times 10^2$  и  $3.1 \times 10^1$  КОЕ/мл(г) *E. coli* и *E. faecium* соответственно) образцов проростков и воды дало положительный результат в течение 4 и 12 ч после предварительного обогащения соответственно. Подобные разработки имеют большой научный и практический интерес, поскольку, с одной стороны, позволяют смартфону в сочетании с сопутствующими материалами (платформа, датчик) заменить значительный спектр оборудования с сохранением точности, с другой, – увеличить производительность стационарной или передвижной лаборатории.

Актуальной задачей, требующей инструментального решения, является оценка содержания сложных эфиров в алкогольном напитке из сахарного тростника Кашаса, вкус и аромат которого связаны с наличием данной группы аналитов, обычно выраженным в пересчете на этилацетат. Предложен точечный тест для определения общего количества сложных эфиров посредством анализа цифровых изображений [32]. Способ основан на реакции аналитов с гидросиламином при образовании соответствующих ионов гидроксамата, дающих фиолетовый комплекс с Fe(III) в кислой среде. Цифровые изображения получены при контролируемом освещении и преобразованы в значения компонентов цвета RGB с помощью приложения *PhotoMetrix*<sup>®</sup> 1.8. Значения канала *B* приняты за аналитический отклик из-за комплементарности цвету продукта реакции. Диапазон линейности составил 100–500 мг/л при коэффициенте вариации ( $n = 10$ ) и пределе обнаружения 1.1% и 30 мг/л (в пересчете на этилацетат) соответственно. Методика характеризуется экологичностью и малым расходом реактивов. Результаты предложенной схемы согласуются с данными, полученными титриметрическим методом при доверительной вероятности 95%.

**Объекты различного происхождения.** Возможность комплектации смартфона дополнительными универсальными средствами, позволяющими реализовывать специфические химические реакции, способствует применению цифровой цветометрии на базе смартфона в различных областях химического анализа (табл. 4).

Предложены условия для оценки качества косметики и средств личной гигиены [38, 40],

Таблица 3. Использование смартфона в анализе пищевых продуктов

Аналит	Цветометрическая система	Принцип анализа	Устройство/приспособление	Приложение (программное обеспечение)	Аналитический параметр	ДОС	$C_{\min}$	Объект анализа	Литература
$H_2O_2$	RGB	Колориметрия хромогенного продукта реакции 3,3',5'-тетраметилбензидина с пероксидом водорода, катализированной легированными углеродными точками	Самодельный колориметрический бокс для смартфона	Color Grab для Android	$R (R - R_{\text{blank}})$	3–30 мкМ	0.8 мкМ	Молоко, жидкость для полоскания рта	[29]
Титруемая кислотность (лимонная кислота)	RGB	Колориметрия реакции при использовании индикатора	Микротитрование в полистирольном планшете	ImageJ	V	—*	—	Апельсин, лимон и маракуйя	[81]
Аскорбиновая кислота	RGB	Колориметрия при восстановлении хлорида железа под действием $Fe^{2+}$ с последующей реакцией с <i>o</i> -фенантролином	Фарфоровая планшетка с 12 лунками	ImageJ	B	0.59–5.9 мг/л ( $3.3 \times 10^{-6}$ – $3.3 \times 10^{-5}$ M)	0.15 мг/л ( $8.5 \times 10^{-7}$ M)	Фрукты	[16]
Полифенолы	—	Колориметрия реакции взаимодействия аналитов с реактивом Фолина–Чокалтеу (в пересчете на галловую кислоту)	Микрофлюидный хемосенсор на бумажной основе	ImageJ v.1.46	MGI (общая интенсивность серого)	30–750 мкг/г	30 мкг/г	Оливковое масло	[82]
АПАВ	RGB	Колориметрия ионной пары аналитов с метиленовым синим после осаждения белков и процедуры ДЖЖМЭ хлороформом	Коробка из полистирола (14 × 16 × 10 см) для вставки пробирок типа “Эппендорф”	Color Grab (Loomatix®, version 3.5.2)	R	10–50 мг/л	2.2 мг/л	Молоко	[30]

Таблица 3. Продолжение

Аналит	Цветометрическая система	Принцип анализа	Устройство/приспособление	Приложение (программное обеспечение)	Аналитический параметр	ДОС	$C_{\min}$	Объект анализа	Литература
Кофеин	RGB	Измерение флуоресценции (тушения флуоресценции) комплекса аналита с 8-гидроксипирен-1,3,6-присульффонатом	Миниатюрный флуоресцентный датчик	ImageJ	$R (-\lg(R/R_0))$	100–600 мг/л	30 мг/л	Энергетические напитки, лекарственные препараты	[83]
Триэтиламин, изобутиламин, изопентиламин	RGB	Колориметрия кислотно-основных индикаторов (ализарин, бромфеноловый синий, хлорфеноловый красный, метиловый красный, тимоловый синий) под действием аналитов	Колориметрический прибор на пластиковой основе	Разработанное авторами ПО	Евклидово расстояние, ED	–	$1 \text{ млн}^{-1} \text{ (ppm)}$	Пищевые продукты	[50]
Щелочная фосфатаза	RGB	Колориметрия каталитической активности аналита по отношению к 5-бром-4-хлор-3-индолилфосфату (сине-зеленый осадок)	Миниатюрный иммуносенсор на бумажной основе	–	$R (\lg (R_0/R))$	10–1000 U/мл (Ед/мл)	0,87 U/мл (Ед/мл)	Молоко	[84]
Мель	RGB	Колориметрия желата аналита с купризном в щелочной среде	Фарфорвый планшет на 6 лунок	ImageJ	B	0,75–5,00 мг/л	0,078 мг/л	Спирт из сахарного тростника	[14]
Тетрациклины, хинолоны	RGB	Колориметрия иммуноферментной реакции в присутствии наночастиц Ag	Иммунологический микрочип	GenePix Pro 3.0	B	0,2–3,2 нг/мл 0,15–3,6 нг/мл	1,51 нг/мл 1,74 нг/мл	Молоко	[85]

Таблица 3. Продолжение

Аналит	Цветометрическая система	Принцип анализа	Устройство/приспособление	Приложение (программное обеспечение)	Аналитический параметр	ДОС	$C_{\min}$	Объект анализа	Литература
Фурфурол	RGB	Колориметрия продукта реакции фурфурола с анилином в кислой среде	Пластиковая камера (20 × 17,5 × 12 см), покрытая матовыми чернилами со светодиодами и лентами. Фарфоровый планшет на 9 лунок	ImageJ	G	1.67–10.0 мг/100 мл	0.34 и 1.15 мг/100 мл	Спирт из сахарного тростника	[3]
Кислотно-основное титрование (на примере уксусной кислоты)	RGB (R, G, B, H, S, V, L, I)	Колориметрия реакции кислотного титрования на бумаге в присутствии экстракта жаботикабы в качестве индикатора	Бумажный микропланшет (микроразоны) на фильтровальной бумаге, изготовленный методом восковой печати	Photometrix®	S	1–12 ед. pH	–	На примере столового уксуса	[9]
Белки (на примере казеина)	RGB	Колориметрия хромогенной реакции аналитов с микробной протеазой, иммобилизованной на магнитных частицах, с фенольным реактивом Фолина-Чокалтеу	Имуноферментный анализ	GIMP 2.8.14 (ПО типа GNU), Origin 9.1 (OriginLab, USA)	R, G, B	0–8 мг/мл	242 мкг/мл	На примере коровьего молока	[86]
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	RGB	Колориметрия сенсibilизированной флуоресценции комплексов европия с органическими веществами (металлоорганические карбоксаты) под действием гидроксидионов	Бумажный микрочип	World of Color	B/R	0.001–1 мМ	0.14 мкМ	Вода, молоко	[87]

Таблица 3. Продолжение

Аналит	Цветометрическая система	Принцип анализа	Устройство/приспособление	Приложение (программное обеспечение)	Аналитический параметр	ДОС	$c_{\min}$	Объект анализа	Литература
Сложные эфиры (в пересчете на этилацетат)	RGB	Колориметрия продуктов реакции аналитов и гидроксилана, с образованием комплексов гидроксамат-ионов и Fe(III)	Камера (бокс) из пенополистирола ( $190 \times 210 \times 125$ мм), покрытая белой бумагой со светодиодной лентой	PhotoMetrix® 1.8	B, G	100–500 мг/л	30 мг/л	Спирты из сахарного тростника (Кашаса)	[32]
$\text{Cu}^{2+}$	RGB	Колориметрия продукта реакции аналита с пигментом красной свеклы в щелочной среде	Реакция в растворе	Adobe Photoshop, ПО на языке программирования Java для платформы Android	B	4–20 $\mu\text{M}$	0.84 $\mu\text{M}$	Питьевая вода	[51]
$\text{F}^-$	RGB	Колориметрия сенсibilизированной флуоресценции комплексов европия и тербия с органическими веществами (металлоорганические карбонаты) под действием аналитов	Реакция в растворе	–	R/B	0.05–50 мг/л; 0–9.5 ppm (мг/л)	–	Питьевая вода	[88]
Фентоат (пестицид)	RGB	Колориметрия взаимодействия аналита с наночастицами Cu-Ag в присутствии цитрат-ионов	Бумажный сенсор	ImageJ, Gaussian 16.0	R + G + B	50–15000 мкг/л	15 мкг/л	Вода, пищевые продукты	[89]
Краситель красный очаровательный (Allura red)	RGB	Колориметрия образцов продукции	Оптическое сенсорное устройство	MATLAB 7.13, PLS Toolbox 6.5, Image Processing Toolbox 8.0, The N-way Toolbox для Matlab 3.30	Математическая обработка данных через оттенки серого	22.9–78.8 мг/кг	4.2 мг/кг	Леденцы	[90]

Таблица 3. Продолжение

Аналит	Цветометрическая система	Принцип анализа	Устройство/приспособление	Приложение (программное обеспечение)	Аналитический параметр	ДОС	$c_{\min}$	Объект анализа	Литература
Качество иристых вин (Цвет вина)	RGB	Колориметрия вина	Закрытый черный бокс из черного пенопласта, изнутри покрытый черной бархатной бумагой	RGB-ColorMeter: White Märtten 2014, ColorMeter (Version 1.8)	B	–	–	Вино	[33]
Метанол	RGB	Колориметрия при окислении аналита до метанала с последующей реакцией образования фиолетового хромофора при взаимодействии с хромотроповой кислотой	Черная пластиковая камера (20 × 12 × 18 см) со светодиодными лентами. Фарфоровый планшет на 9 лунок	ImageJ	G	5–35 мг/100 мл	1.5 мг/100 мл	Спирт из сахарного тростника	[34]
Афлатоксин В1	–	Колориметрия конкурентной реакции связывания с антителами между аналитом и конъюгатом (коллоидное золото- AFB1 - BSA)	Лагеральный иммуноанализ	ПО для Android	Оптическая плотность	5–1000 мкг/кг	5 мкг/кг	Зерно кукурузы и риса	[52]
Оксаевая (акадаиксовая) кислота, сакситоксин	RGB	Колориметрия конкурентной реакции связывания с антителами (при наличии коллоидного золота)	Тест-система для иммуноанализа	iStrip (разработанное авторами ПО)	G	3–20 нг/мл 10–100 нг/мл	2.8 нг/мл 9.8 нг/мл	Морепродукты	[91]
Стрептомицин	RGB	Колориметрия флуоресценции продукта последовательных иммуноферментных реакций аналита с красителем SYBR Green I	Имуноферментный анализ	Touch Color	G	0.1–100 мкМ	94 нМ	Молоко, мясо курицы	[92]

Таблица 3. Продолжение

Аналит	Цветометрическая система	Принцип анализа	Устройство/ приспособление	Приложение (программное обеспечение)	Аналитический параметр	ДОС	$C_{min}$	Объект анализа	Литература
$SO_3^{2-}$	RGB	Колориметрия окрашенного комплекса $SO_2$ с $Fe(II)$ и 1,10-фенантролином	Микроэкстракция в тонкую пленку $SO_2$ (продукта пре-вращения аналита) из паровой фазы	ПО для Android	B	0.1–700 мкг/л	0.04 мкг/л	Сок, вода	[53]
Пищевые аллергены (на примерах арахиса)	—	Колориметрия продуктов иммунно-ферментной реакции	Персонализированная платформа iPhone	—	Относительное поглощение	1–25 ppm (мг/кг)	1 ppm (мг/кг)	Печенье	[93]
Тетрациклин	RGB (R, G, B, H, S, V, Gr)	Колориметрия экстракта молока после осаждения белков и очистки методом ТФЭ	Бокс из фанеры, (10 × 16.5 × 25 см) внутри покрытый черной краской, приспособленный под стандартные кварцевые кюветы	ColorCop для устройств iPhone в операционной системе iOS	$d(I_x, I_y)$	0.5–10 мкг/мл	0.5 мкг/мл	Молоко	[35]
Бактерии ( <i>Escherichia coli</i> , <i>Enterococcus</i> )	RGB	Колориметрия продуктов иммунно-ферментной электрохимической реакции	Луночный планшет на бумажной основе	—	R + G + B	0–10 <sup>5</sup> КОЕ/мл	1.4 × 10 <sup>-8</sup> , 3.1 × 10 <sup>-8</sup> М (для продуктов реакции)	Вода и пищевые продукты	[8]
Сульфат-ионы Хинин	RGB	Нефелометрия продукта реакции аналита с $BaCl_2$ (сульфат-ионы). Колориметрия флуоресценции аналита (хинин)	Кювета, помещенная в жесткое непрозрачное черное устройство, изготовленное на 3D-принтере	ImageJ	B, G	2.0–50.0 мг/л 0.42–3.10 мг/л	0.13 мг/л 0.43 мг/л	Природная вода, тонирующие напитки	[6]

Таблица 3. Продолжение

Аналит	Цветометрическая система	Принцип анализа	Устройство/приспособление	Приложение (программное обеспечение)	Аналитический параметр	ДОС	$C_{\min}$	Объект анализа	Литература
Сульфаниламиды	RGB	ДЖЖМЭ в присутствии бутанола, ДДСН и 4-(диметиламино)-циннамальдегида. Колориметрия экстракта (продукта реакции аналита) при ДЖЖМЭ (иминной соли)	Камера (бокс) из пенополистирола (11 × 8 × 14 см) со светодиодными лентами, приспособленная под пробирки типа Фалькон объемом 15 мл	CollorGrab (Loo-matix®, version 3.6.1, 2017)	G	50–1000 мкг/л (общее содержание)	20 мкг/л	Молоко	[36]
Рибофлавин (витамин В <sub>2</sub> )	RGB	Колориметрия флуоресценции аналита	Самодельный флуориметр с держателем кювет для стандартной кварцевой кюветы	Color Grab	G	0.05–1.2 мг/л	0.01 мг/л	Энергетический напиток, поливитаминная добавка	[94]
Афлатоксин В <sub>1</sub>	–	Колориметрия флуоресценции аналита при взаимодействии с молекулярно импринтированной мембранной датчика	Биомиметрический датчик	Spotxel® Reader (Sicasys Software GmbH, Germany)	Интенсивность окрашивания (усл. ед)	20–100 нг/мл	20 нг/мл	Кукурузная и пшеничная мука	[95]
Кальций	RGB	ДЖЖМЭ комплекса аналита с глиоксаль-бис(2-гидроксианиолом) в присутствии хлороформа, 1,2-дихлорметана и эфиромина Колориметрия экстракта	Самодельный колориметрический бокс для смартфона (7 × 10 × 5 см) со светодиодным светом низкой мощности	Color Grab	G	0.06–1.5 мкг/мл	0.017 мкг/мл	Сухое молоко (пищевые продукты), вода	[37]
Зearаленон	RGB	Колориметрия результатов (продуктов) иммунохроматографического анализа	Твердотельная микроразличительная сферическая платформа для иммунохроматографии	SIAP-App (на языке программирования Java для платформы Android)	Отношение интенсивности окраски зон T/C	0.5–3.5 мкг/кг	0.08 мкг/кг 0.18 мкг/кг	Зерно Корма	[54]

Таблица 3. Окончание

Аналит	Цветометрическая система	Принцип анализа	Устройство/пристособление	Приложение (программное обеспечение)	Аналитический параметр	ДОС	$C_{\min}$	Объект анализа	Литература
Меламин	—	Колориметрия флуоресценции аналита в присутствии квантовых точек из нанокомпозитов Au@C	Устройство на базе смартфона, включающее ячейку для детектирования	—	Интенсивность флуоресценции	1–10 мкМ	3,6 нМ	Молоко	[96]
Меламин, хлорамфеникол	RGB	Колориметрия результатов (продуктов) иммунохроматографического анализа	Бумажный микрофлюидный чип	—	GRAY (R + G + B)	0–100 нг/мл 0–10 нг/мл	30 нг/мл 6 нг/мл	Молоко	[97]
Бензойная кислота	RGB	Колориметрия продукта реакции Яновского после превращения аналита в 3,5-динитробензойную кислоту	Бумажный микрофлюидный чип	Разработанное авторами ПО	R + B	500–4000 ppm (мг/кг)	500 ppm (мг/кг)	Пищевые продукты растительного происхождения	[55]
Гипохлориты, (куркумин)	RGB	Колориметрия тушения флуоресценции продукта окисления куркумина на наночастицах Cu	Реакция в растворе	—	R/B	0–412 мкМ	24 мкМ	Молоко, вода	[98]
Охраоксин А	—	Колориметрия конкурентной реакции связывания с антителами	Биосенсор на основе латерального иммуоанализа	ImageJ	Отношение интенсивности окраски зон T/C	0,1–25 мкг/л	0,3 и 0,1 мкг/л	Вино, кофе	[99]
КПАВ, АПАВ (7 веществ)	RGB	Цветометрия окраски экстрактов ионных пар аналитов с эозином или акридиновым желтым после ДЖЖМЭ	Устройство для измерения цветометрических характеристик ДЖЖМЭ-экстрактов	RGBVer	A <sub>T</sub>	0,01–1 мг/л	0,005–0,05 мг/л	Молоко, овощи и фрукты, мясо, питьевая вода	[100]

\* Информация не указана.

Таблица 4. Использование смартфона в анализе объектов различного происхождения

Аналит	Цветометрическая система	Принцип анализа	Устройство/ приспособление	Приложение (программное обеспечение)	Аналитический параметр	ДОС	$c_{\min}$	Объект анализа	Литература
CH <sub>2</sub> O	RGB	Колориметрия окраски продукта дериватизации аналита после извлечения газодиффузной микроэкстракцией с ацетилацетоном	Коробка цилиндрической формы со светодиодной лампой	Image J	B	0.5–10 мг/кг	0.2 мг/кг	Косметика и средства личной гигиены	[38]
Биодизель (метилловые эфиры жирных кислот)	RGB	Колориметрия окраски комплекса Fe(III) с гидроксамат-ионами, образованными реакцией алкиловых эфиров, характерных для биодизеля, с гидроксил-амином	Бокс (190 × 210 × 125 мм), покрытый белой бумагой со светодиодной лампой	PhotoMetrix® 1.6	G	3–30%	1%	Дизельное топливо	[39]
Фенацетин	СМУК	Колориметрия окраски продукта реакции аналита с 1,2-нафтохинон-4-сульфонатом, после его гидролиза до <i>n</i> -аминофенола	Подставка из черного полиметилметакрилата	GIMP2	M (magenta)	0–64.52 мкг/мл	3.5 мкг/мл	Кокаин	[7]

Таблица 4. Продолжение

Аналит	Цветометрическая система	Принцип анализа	Устройство/ приспособление	Приложение (программное обеспечение)	Аналитический параметр	ДОС	$c_{\min}$	Объект анализа	Литература
$\beta$ -D-галактозидаза	—	Колориметрия флуоресценции продукта иммунной ферментной реакции, сопровождающаяся выделением флуоресцина	Бумажная микрофлюидная система	—*	G (green)	0.7–5 нМ	700 пМ	Модельные растворы	[101]
Hg(II)	RGB	Колориметрия окраски и флуоресценции продукта реакции аналита с роданином В	Реакция на сенсорной полимерной мембране	GIMP (GNU Image Manipulation Program)	PC1 (R+G+B)	—	$3.5 \times 10^{-6}$ М	Водные среды	[102]
Fe(III)	RGB	Колориметрия окраски продукта реакции аналита с SCN <sup>-</sup>	3D напечатанный колориметрический анализатор (камера) для смартфона и ключеты	Color Grab (version 3.6.1, Loomatix <sup>©</sup> )	I (оттенки серого)	0.5–10 мг/л	0.1 мг/л	Биоэтанол	[103]

Таблица 4. Продолжение

Аналит	Цветометрическая система	Принцип анализа	Устройство/ приспособление	Приложение (программное обеспечение)	Аналитический параметр	ДОС	$c_{\min}$	Объект анализа	Литература
Гипохлорит-ионы	RGB	Колориметрия окраски продукта реакции аналитов с антоцианами	Камера (12 × 31.5 × 19.5 см) из черного непрозрачного картона со светодиодами. Фарфоровый планшет на 12 лунок	Image J	G или V(G,V)	1.23 × 10 <sup>-4</sup> – 3.69 × 10 <sup>-4</sup> M	3.5 × 10 <sup>-5</sup> M	Отбеливающие жидкости	[40]
Cu <sup>2+</sup> , Fe <sup>2+</sup>	RGB	Колориметрия окраски продукта реакции аналитов с гексацианоферратом иодидом калия	Бумажная микрофлюидная система	ColorAssist	B, R	100 – 400 мкг/мл	–	Растворы	[104]
Hg <sup>2+</sup>	RGB	Колориметрия затухания флуоресценции при образовании комплекса аналита с замещенным бензотиазолиновым спиропираном	Реакция в растворе	ImageJ	Интенсивность цвета	0 – 8.61 мкМ	0.62 мкМ	Растворы	[105]

Таблица 4. Окончание

Аналит	Цветометрическая система	Принцип анализа	Устройство/приспособ-ление	Приложение (программное обеспечение)	Аналитический параметр	ДОС	$C_{\min}$	Объект анализа	Литература
Каннабиноид АВ-001	RGB	Колориметрия продукта реакции аналита с модифицированным реактивом Эрлиха, адсорбированным на силикагеле	Планшет на 96 лунок	ColorMeter free	G	1–200 мкг	1 мкг	Образцы трав	[10]
Кислород	RGB	Колориметрия тушения люминесценции октаэтилпорфиринового комплекса платины на мембране	Сенсорный модуль. Кислородчувствительная мембрана	Разработанное авторами ПО для Android	$R (lg(R_0/R-1))$	1–100%	0.28%	Газы	[56]
Общее содержание фенолов (по галловой кислоте)	—	Колориметрия продуктов реакции экстракта с реактивом Фолина–Чокалтеу	Реакция на целлюлозной хроматографической бумаге	ImageJ, GraphPad Prism 5	Интенсивность цвета	0–1000 мкг/мл	—	Лекарственные растения	[106]
Кальций, Магний	RGB	Колориметрия обесцвечивания целочного раст-вора эриохромового черного Т при образовании комплексов с аналитами	Бокс (190 × 210 × 125 мм), покрытый белой бумагой со светодиодной лампой	PhotoMetrix® 1.8	R	10–75 мкМ	3 мкМ	Биодизель	[41]

\* Информация не указана.

топлива [39, 41, 103], наркотических веществ [7], растительной продукции (лекарственных трав) [10, 106], газовых [56], водных и модельных сред [101, 102, 104, 105].

Разработан простой и чувствительный подход к оценке качества отбеливающих жидкостей, содержащих гипохлорит-ионы [40]. Прием экономичен и безопасен для окружающей среды, поскольку в нем используются недорогие материалы на основе натуральных компонентов. С использованием только одного цифрового изображения удается провести 12 анализов в течение 5 мин при образовании 600 мкл отработанного слива за один тест. Подход заключается в получении цифрового изображения колориметрической реакции гипохлорит-ионов с антоцианами при помощи смартфона и системы, построенной из недорогих материалов для оптимизации сбора данных. В оптимизированных условиях реакции аналитический сигнал линеен в диапазоне концентраций аналита от  $1.23 \times 10^{-4}$  до  $3.69 \times 10^{-4}$  моль/л с пределами обнаружения и определения  $3.5 \times 10^{-5}$  и  $1.16 \times 10^{-4}$  моль/л соответственно. Результаты анализа согласуются с данными, полученными с использованием титриметрического метода.

В работе [7] предлагается колориметрическое устройство на основе офисной бумаге в качестве портативного, быстрого и недорогого датчика для судебно-медицинских экспертиз, направленных на обнаружение фенаcetина, используемого в качестве примеси в незаконных изъятых материалах, таких как кокаин. Подход описывает использование белой офисной бумаги в качестве подложки и технологию восковой печати для изготовления зон детектирования. На основе проведенных исследований установлено, что аналитический сигнал линеен в диапазоне 0–64.52 мкг/мл фенаcetина. Предел обнаружения составил 3.5 мкг/мл. Точность колориметрического устройства на базе смартфона оценена с использованием изъятых образцов кокаина, в том числе с привлечением метода добавок.

Для определения газообразного кислорода в работе [56] представлен портативный прибор, принцип работы которого основан на тушении интенсивности люминесценции октаэтилпорфиринового комплекса платины при его возбуждении с помощью светоизлучающего диода с максимум излучения 380 нм. Измеренное значение  $R$  для мембраны напрямую связано с концентрацией окружающего кислорода. Разработано приложение для устройств на базе *Android* с камерами (таких как смартфоны), чтобы использовать их в качестве детекторов и процессоров изображений при прогнозировании концентрации газообразного кислорода.

**Анализ лекарственных препаратов.** Фармацевтическая отрасль предъявляет жесткие и регла-

ментированные требования к качеству готовых лекарственных препаратов (ГЛП) [107–109]. Однако значительные темпы разработки лекарственных средств и вывода на рынок новых ГЛП не могут обеспечить своевременную актуализацию и переиздание общих контрольных процедур [107–109]. Перспективным направлением, способным конкурировать по точности и экспрессности с традиционными титриметрическими и спектрометрическими методами, является внедрение в рутинную практику контрольных лабораторий цветиметрических приемов на базе смартфона (табл. 5).

Представлен новый подход к определению аскорбиновой кислоты в растворе, основанный на анализе полученных с помощью смартфона цифровых изображений [13]. В основе методики лежит уменьшение количества хромофора хинонимина (при реализации ферментативного колориметрического метода определения глюкозы), образующегося по мере увеличения концентрации аскорбиновой кислоты в среде.

Для определения антибиотиков пенициллинового ряда в лекарственных средствах использовали ДЖЖМЭ ассоциатов пенициллинов с метиленовым синим [114]. Показана возможность использования хемометрического анализа, обработку массива данных проводили методами главных компонент, иерархического кластерного анализа и метода *k-means* с использованием программного обеспечения XLSTAT. Проведены идентификация и определение концентрации антибиотиков пенициллинового ряда в таблетированных формах с использованием хемометрического анализа. Градуировочные характеристики линейны с коэффициентами достоверности аппроксимации  $\geq 0.99$ . Относительное стандартное отклонение результатов анализа не превышает 0.05.

Предложен способ определения четвертичных аммониевых соединений (ЧАС) в лекарственных и дезинфицирующих средствах, основанный на ДЖЖМЭ ассоциатов с эозином и измерении цветиметрических характеристик экстрактов с помощью смартфона и специализированного программного обеспечения [116]. В качестве аналитического сигнала ( $A_r$ ) использовали значения цветиметрических параметров в системе RGB. Разработаны варианты определения содержания хлоридов цетилпиридиния, миристалкония, бензалкония и бензилдиметил[3-(миристоиламино)пропил]аммония в лекарственных препаратах *Терафлю*, *Септолете Тотал*, *Калгель*, *Мирамистин*, *Иноксин* и *Фарматекс*, а также хлоридов цетилпиридиния, бензалкония, алкилдиметил(этилбензил)аммония, цетилтриметиламмония, миристилтриметиламмония и дидецилдиметиламмония в антисептических препаратах *Секурол*, *Ахdez*, *Стеллариум* и мицеллярных водах. Преде-

Таблица 5. Использование смартфона в анализе лекарственных препаратов

Аналит	Цветометрическая система	Принцип анализа	Устройство/ приспособление	Приложение (программное обеспечение)	Аналитический параметр	ДОС	$c_{\min}$	Объект анализа	Литература
Аскорбиновая кислота	RGB	Колориметрия (уменьшения) окраски хинолина как продукта ферментативной реакции аналита с глюкозооксидазой	Реакция в растворе. Кюветы на белой поверхности с белым фоном	GIMP 2.0	$G_r$ , $B$ ( $Abs(G)$ - $Abs(B)$ )	6–10 мг/л	0.055 мг/л	ЛП (на примере таблеток)	[13]
Тетрациклины (6 веществ)	RGB	Цветометрия твердофазной собственной флуоресценции аналитов и сенсibiliзированной аналитами флуоресценции Eu(III) на целлюлозной бумаге и пластинках ТСХ	Реакция на целлюлозной бумаге для хроматографии и пластинках ВЭТСХ	RGVer	$A_r$	3–500 мкг/мл	1–5 мкг/мл	ЛП (на примере таблеток)	[110]
Хинолоны (17 веществ)	RGB	Цветометрия твердофазной собственной флуоресценции аналитов и сенсibiliзированной аналитами флуоресценции Eu(III) на целлюлозной бумаге и пластинках ТСХ	Реакция на целлюлозной бумаге для хроматографии и пластинках ВЭТСХ	RGVer	$A_r$	0.6–500 мкг/мл	0.2–4 мкг/мл	ЛП (на примере таблеток)	[111]

Таблица 5. Окончание

Аналит	Цветометрическая система	Принцип анализа	Устройство/приспособление	Приложение (программное обеспечение)	Аналитический параметр	ДОС	$c_{\min}$	Объект анализа	Литература
Нестероидные противовоспалительные средства (НПВС) (4 вещества)	RGB	Цветометрия твердофазной сенсбилизированной аналитами флуоресценции Eu(III) и Tb(III) на целлюлозной бумаге и пластинках ТСХ	Реакция на целлюлозной бумаге для хроматографии и пластинках ВЭТСХ	RGVer	$A_T$	3–500 мкг/мл	1–5 мкг/мл	ЛП (на примере таблеток)	[112]
Хинолоны (17 веществ)	RGB	Цветометрия флуоресценции индикаторных зон	Тест-система	RGVer	$A_T$	0.5–250 мкг/мл	–*	ЛП (на примере таблеток)	[113]
Пенициллины (6 веществ)	RGB	Цветометрия окраски экстрактов ионных пар аналитов с метиленовым синим после ДЖЖМЭ	Устройство для измерения цвета ионных пар аналитов с метиленовым синим после ДЖЖМЭ экстрактов	RGVer	$A_T$	(0.6–0.8)–10 мкг/мл	0.2 мкг/мл	ЛП (на примере таблеток)	[114]
Тетрациклины (6 веществ)	RGB	Цветометрия флуоресценции индикаторных зон	Тест-система	RGVer	$A_T$	8–500 мкг/мл	–	ЛП (на примере таблеток)	[115]
Четвертичные аммониевые соединения (ЧАС)	RGB	Цветометрия окраски экстрактов ионных пар аналитов с эозинном после ДЖЖМЭ	Устройство для измерения цвета ионных пар аналитов с эозинном после ДЖЖМЭ экстрактов	RGVer	$A_T$	(0.02–0.4)–(2–10) мкг/мл	0.007–0.100 мкг/мл	ЛП и дезинфицирующие средства	[116]

\* Информация не указана.

лы обнаружения и определения составили 0.007–0.100 и 0.02–0.40 мг/л соответственно. Относительное стандартное отклонение результатов анализа не превышало 0.13–0.15. Продолжительность анализа составила 15–20 мин.

Предложен простой и доступный способ определения антибиотиков хинолонового ряда с использованием цифровой цветометрии твердофазной флуоресценции [111]. Изучены собственная флуоресценция 17 хинолонов и sensibilizirovannaya хинолонами флуоресценция европия(III) на целлюлозной бумаге (ЦБ) и тонком слое силикагеля. При облучении ультрафиолетовым светом (365 нм) нанесенных на матрицу растворов хинолонов наблюдается синяя (ЦБ, высокоэффективная тонкослойная хроматография (ВЭТСХ)) и розовая (ЦБ–Eu, ВЭТСХ–Eu) флуоресценция. Измерение интенсивности флуоресценции на поверхности матриц осуществляли с помощью смартфона. В качестве аналитического сигнала ( $A_r$ ) использовали значения цветометрических параметров в системе RGB:  $A_r = \sqrt{(R_0 - R_x)^2 + (G_0 - G_x)^2 + (B_0 - B_x)^2}$ . Пределы обнаружения и определения составили 0.2–4 и 0.6–12 мкг/мл соответственно для всех рассматриваемых аналитов. Диапазоны определяемых содержаний – 0.6–500 мкг/мл. Предложена методика определения фторхинолонов в лекарственных препаратах. Относительное стандартное отклонение результатов анализа не превышало 0.05.

На этом же принципе основана методика определения нестероидных противовоспалительных средств (НПВС) [112]. Изучена sensibilizirovannaya НПВС флуоресценция европия и тербия на целлюлозной бумаге и тонком слое силикагеля. При облучении ультрафиолетовым светом (365 нм) нанесенных на матрицу растворов НПВС, наблюдается зеленая флуоресценция толфенамовой, мефенамовой и нифлумовой кислот и красная мелоксикама. Пределы обнаружения и определения составили 1–5 и 3–17 мкг/мл соответственно для всех рассматриваемых аналитов. Диапазоны определяемых содержаний 3–500 мкг/мл. Методика проверена на лекарственных препаратах. Относительное стандартное отклонение результатов анализа не превышало 0.08.

**Использование хемометрики при идентификации в химическом анализе.** Наряду с развитием цветометрического метода с привлечением смартфона в качестве регистратора сигнала, обусловленного наличием аналита, значительное распространение в анализе продуктов питания и лекарственных средств получили подходы, позволяющие сравнивать, различать и классифицировать объекты сходного состава. Состав объектов может различаться в силу специфики климатических и геологических условий региона происхождения, особенностей технологических

процессов изготовления, времени хранения и наличия добавок. Образцы в таком случае разделяют по их индивидуальным сигналам, не выполняя многокомпонентный аппаратный анализ. При реализации подобных дискриминационных стратегий анализируемые объекты идентифицируют и классифицируют, используя хемометрические методы [18, 20, 45, 115, 117–126].

Привлечение алгоритмов хемометрической обработки массивов данных способствует совершенствованию методологии экспресс-анализа на базе цифровой цветометрии в рамках решения сложнейших задач идентификации, аутентификации и выявления фальсификации продукции различного происхождения. Подобная консолидация имеет неоспоримые преимущества в сравнении с традиционными инструментальными подходами, к которым можно отнести низкие материальные затраты на реализацию, доступность аппаратного оформления, мобильность и возможность быстрого принятия решения.

В работе [119] описана новая процедура классификации минеральных вод на основе цифровых изображений, полученных с помощью смартфона. В пробы воды коммерческого производства из восьми минеральных источников, а также в дистиллированную и водопроводную воду добавляли раствор эриохромового черного Т или мурексида. Смесь переносили в кювету, которую помещали в камеру с контролируемым освещением. Значения базисных компонентов цвета в системе RGB полученных цифровых изображений кюветы регистрировали в режиме реального времени с помощью бесплатного приложения для смартфона и использовали в качестве переменных для дальнейшего исследования. Разброс (дисперсия) данных по компоненте В для мурексида и по компоненте R для эриохромового черного Т обеспечивает четкую визуализацию кластеров с использованием необработанных переменных. Иерархический кластерный анализ, примененный к этим данным, подтвердил эффективное разделение образцов, обеспечивающее характеристику девяти кластеров для десяти исследованных образцов воды. Классификация выборок на основе метода k-ближайших соседей (k-NN) смоделирована с коэффициентом эффективности 100% для восьми образцов, 94.4 и 50% для остальных образцов соответственно, что указывает на высокую эффективность предложенной стратегии. Принимая во внимание низкую стоимость приборов и реагентов, а также экспрессность процедуры, разработанная процедура может применяться для выявления фальсификации воды коммерческого производства.

Комбинированный подход на основе цветометрического и хемометрических методов использован для определения срока годности каль-

маров [120]. Предложен колориметрический датчик, состоящий из шести нанесенных на пластину для тонкослойной хроматографии индикаторов (бромкрезоловый пурпурный, бромфеноловый синий, бромтимоловый синий, тимоловый синий и двуядерные комплексы родия (*cis*-[Rh<sub>2</sub>(C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>PPh<sub>2</sub>)<sub>2</sub>(O<sub>2</sub>CCH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>](HO<sub>2</sub>CCH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>)). Образцы, упакованные с датчиком, хранили в холодильнике в течение 12 дней. Порчу кальмаров при хранении контролировали также физико-химическими и микробиологическими методами. Образцы превысили допустимые пределы микробного числа на третий день. Анализ методом главных компонент, проведенный с помощью цветиметрической системы CIELab, показал, что колориметрический датчик способен отличить свежего кальмара, пригодного для употребления, от испорченного.

Представлен новый подход для обнаружения и распознавания пяти взрывчатых веществ (трипероксида триацетона, гексаметилентрипероксиддиамина, 4-амино-2-нитрофенола, нитробензола и пикриновой кислоты) в почве [45]. Исследования проводили с использованием недорогого и одноразового колориметрического датчика на бумажной основе, изготовленного методом восковой печати. Применяемые в колориметрических реакциях реагенты (KI, креатинин и анилин) при взаимодействии с аналитами создавали уникальный цветовой узор для каждого химического соединения. Взрывчатые вещества дифференцировали друг от друга по профилям изменения цвета, которые можно было легко различить по истечении 15 мин с привлечением иерархического кластерного анализа и метода главных компонент. При регистрации базисных компонентов цвета в аддитивной системе RGB применяли специально разработанное программное обеспечение. В целях избежания проблем с освещением, обычно встречающихся в других устройствах, работу проводили с закрытой камерой (боксом). При апробации описанного способа минимальная определяемая концентрация составила 0.2 мкг (для трипероксида триацетона).

Для оценки порчи рыбы по летучим биогенным аминам использовали кислотно-основные красители бромкрезоловый зеленый, бромкрезоловый пурпурный, крезоловый красный и 6 металлопорфиринов [121]. Обнаружение аналитов в голавле проводили каждые 24 ч в течение семи дней. Профиль изменения цвета для каждого образца получали путем дифференциации изображений массива датчиков до и после воздействия летучих аминов. Цифровые данные, представляющие профили изменения цвета рыбы, анализировали с использованием метода главных компонент. Образцы голавля разделили на три группы свежести с использованием нейронной сети ра-

диальной базисной функции с общей точностью классификации 87.5%.

Использование хемометрического анализа массива данных, полученных с помощью смартфона, позволило идентифицировать этаноламин, диметиламин и тетраметиламин в донных отложениях [123]. Использовали колориметрический датчик, состоящий из семи индикаторных зон с рН-индикаторами.

Метод главных компонент и иерархический кластерный анализ использовали для классификации и идентификации 18 сортов пива и 14 безалкогольных напитков [124, 125]. Применяли колориметрический датчик из 25 индикаторных зон (в основном рН-индикаторы). Надежность идентификации составила 97–98%. Этот же датчик использовали для идентификации 10 образцов кофе по его аромату (электронный нос) [126]. Во всех случаях для регистрации аналитического сигнала использовали смартфон.

\*\*\*

Возможности современной цифровой цветиметрии на базе портативных персональных устройств (смартфона) в настоящее время сравнимы с привычными спектральными методами (спектрофотометрия и флуориметрия), а зачастую и превосходят их по числу решаемых задач, простоте реализации, мобильности и доступности. Во многом это обусловлено разработкой и совершенствованием специализированных программных продуктов, мобильных приложений с графическими редакторами, устройств и приспособлений для регистрации аналитического сигнала и интерпретации полученных данных. Развитие метода в значительной степени связано с увеличением разнообразия практических решений для различных научных направлений, а также с возможностью анализа видео и видеофайлов, что позволит реализовать кинетические исследования, особенно актуальные в фармацевтической области.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rezaqadeh M., Seidi Sh., Lid M., Pedersen-Bjergaard S., Yamini Y. The modern role of smartphones in analytical chemistry // Trends Anal. Chem. 2019. V. 118. P. 548.
2. Моногарова О.В., Осолок К.В., Аяри В.В. Цветиметрия в химическом анализе // Журн. аналит. химии. 2018. Т. 73. № 11. С. 857.
3. Аяри 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.

4. *Иванов В.М., Кузнецова О.В.* Химическая цветометрия: возможности метода, области применения и перспективы // *Успехи химии*. 2001. Т. 70. № 5. С. 411.
5. *Huang X., Xu D., Chen J., Liu J., Li Y., Song J., Ma X., Guo J.* Smartphone-based analytical biosensors // *Analyst*. 2018. V. 143. P. 5339.
6. *Vidal E., Lorenzetti A.S., Aguirre M.A., Canals A., Domini C.E.* New, inexpensive and simple 3D printable device for nephelometric and fluorimetric determination based on smartphone sensing // *RSC Adv*. 2020. V. 10. P. 19713.
7. *Da Silva G.O., De Araujo W.R., Paixao T.R.L.C.* Portable and low-cost colorimetric office paper-based device for phenacetin detection in seized cocaine samples // *Talanta*. 2018. V. 176. P. 674.
8. *Adkins J.A., Boehle K., Friend C., Chamberlain B., Bisha B., Henry C.S.* Colorimetric and electrochemical bacteria detection using printed paper- and transparency-based analytic devices // *Anal. Chem*. 2017. V. 89. P. 3613.
9. *Nogueira S.A., Sousa L.R., Silva N.K.L., Rodrigues P.H.F., Coltro W.K.T.* Monitoring acid-base titrations on wax printed paper microzones using a smartphone // *Micromachines*. 2017. V. 8. P. 139.
10. *Merli D., Profumo A., Tinivella S., Protti S.* From smart drugs to smartphone: A colorimetric spot test for the analysis of the synthetic cannabinoid AB-001 // *Forensic Chem*. 2019. V. 14. Article 100167.
11. *Jaikang P., Wangkarn S., Paengnakorn P., Grudpan K.* Microliter operation for determination of nitrate-nitrogen via simple zinc reduction and color formation in a well plate with a smartphone // *Anal. Sci*. 2019. V. 35. P. 421.
12. *Shalaby A.A., Mohamed A.A.* Sensitive assessment of hexavalent chromium using various uniform and non-uniform color space signals derived from digital images // *Water. Air. Soil. Pollut*. 2020. V. 231. Article 516.
13. *Coutinho M.S., Morais C.L.M., Neves A.C.O., Menezes F.G., Lima K.M.G.* Colorimetric determination of ascorbic acid based on its interfering effect in the enzymatic analysis of glucose: an approach using smartphone image analysis // *J. Braz. Chem. Soc*. 2017. V. 28. № 12. P. 2500.
14. *Pessoa K.D., Suarez W.T., dos Reis M.F., de Oliveira Krambeck Franco M., Moreira R.P.L., dos Santos V.B.* A digital image method of spot tests for determination of copper in sugar cane spirits // *Spectrochim. Acta A*. 2017. V. 185. P. 310.
15. *Ravazzi C.G., Franco M.D.O.K., Vieira M.C.R., Suarez W.T.* Smartphone application for captopril determination in dosage forms and synthetic urine employing digital imaging // *Talanta*. 2018. V. 189. P. 339.
16. *Santos V.B.D., Silva E.K.N.D., Oliveira L.M.A.D., Suarez W.T.* Low cost in situ digital image method, based on spot testing and smartphone images, for determination of ascorbic acid in Brazilian Amazon native and exotic fruits // *Food Chem*. 2019. V. 285. P. 340.
17. *Амелин В.Г., Шаока З.А.Ч., Большаков Д.С.* Использование смартфона для определения тетрациклинов в воде и молоке по сенсibilizированной твердофазной флуоресценции европия на его гидроксиде // *Журн. аналит. химии*. 2021. Т. 76. № 10. С. 952.
18. *Амелин В.Г., Шаока З.А.Ч., Большаков Д.С., Третьяков А.В.* Использование смартфона и хеометрического анализа для определения тетрациклинов в природной воде по сенсibilizированной твердофазной флуоресценции европия на его гидроксиде // *Заводск. лаборатория. Диагностика материалов*. 2022. Т. 88. № 5. С. 5.
19. *Амелин В.Г., Шаока З.А.Ч., Большаков Д.С.* Сорбционно-флуориметрическое определение хинолонов в сточных и природных водах с использованием смартфона // *Вестн. Моск. ун-та. Серия 2. Химия*. 2021. Т. 62. № 4. С. 371.
20. *Амелин В.Г., Шаока З.А.Ч., Большаков Д.С., Третьяков А.В.* Сорбционно-флуориметрическое определение фторхинолонов в природных водах с использованием смартфона и хеометрического анализа // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2022. Т. 22. № 2. С. 126.
21. *Sumriddetchkajorna S., Chaitavon K., Intaravanne Y.* Mobile device-based self-referencing colorimeter for monitoring chlorine concentration in water // *Sens. Actuators B: Chem*. 2013. V. 182. P. 592.
22. *Moonrungssee N., Pencharee S., Jakmunee J.* Colorimetric analyzer based on mobile phone camera for determination of available phosphorus in soil // *Talanta*. 2015. V. 136. P. 204.
23. *Levin S., Krishnan S., Rajkumar S., Halery N., Balkunde P.* Monitoring of fluoride in water samples using a smartphone // *Sci. Total Environ*. 2016. V. 551–552. P. 101.
24. *Kilic V., Alankus G., Horzum N., Mutlu A.Y., Bayram A., Solmaz M.E.* Single-image-referenced colorimetric water quality detection using a smartphone // *ACS Omega*. 2018. V. 3. № 5. P. 5531.
25. *Lima M.J.A., Nascimento C.F., Rocha F.R.P.* Feasible photometric measurements in liquid-liquid extraction by exploiting smartphone-based digital images // *Anal. Methods*. 2017. V. 9. № 14. P. 2220.
26. *Shahvar A., Saraji M., Shamsaei D.* Headspace single drop microextraction combined with mobile phone-based on-drop sensing for the determination of formaldehyde // *Sens. Actuators B: Chem*. 2018. V. 273. P. 1474.
27. *Moslemzadeh M., Larki A., Ghanemi K.* A combination of dispersive liquid-liquid microextraction and smartphone-based colorimetric system for the phenol measurement // *Microchem. J*. 2020. V. 159. Article 105583.
28. *Khoshmaram L., Mohammadi M.* Combination of a smart phone based low-cost portable colorimeter with air-assisted liquid-liquid microextraction for speciation and determination of chromium (III) and (VI) // *Microchem. J*. 2021. V. 164. Article 105991.
29. *Peng B., Xu J., Fan M., Guo Y., Ma Y., Zhou M., Fang Y.* Smartphone colorimetric determination of hydrogen peroxide in real samples based on B, N, and S copolymer carbon dots probe // *Anal. Bioanal. Chem*. 2020. V. 412. P. 861.

30. *Acevedo M.S.F., Lima M.J.A., Nascimento C.F., Rocha F.R.P.* A green and cost-effective procedure or determination of anionic surfactants in milk with liquid-liquid microextraction and smartphone-based photometric detection // *Microchem. J.* 2018. V. 143. P. 259.
31. *De Oliveira Krambeck Franco M., Suarez W.T., dos Santos V.B.* Digital image method smartphone-based for furfural determination in sugarcane spirits // *Food Anal. Methods.* 2017. V. 10. P. 508.
32. *Soares S., Campos K.R.R., Melchert W.R., Rocha F.R.P.* A spot test for total esters determination in sugarcane spirits exploiting smartphone-based digital images // *Anal. Methods.* 2020. V. 12. P. 3918.
33. *Perez-Bernal J.L., Villar-Navarro M., Morales M.L., Ubeda C., Callejon R.M.* The smartphone as an economical and reliable tool for monitoring the browning process in sparkling wine // *Comput. Electron Agric.* 2017. V. 141. P. 248.
34. *De Oliveira Krambeck Franco M., Suarez W.T., Maia M.V., Dos Santos V.B.* Smartphone application for methanol determination in sugar cane spirits employing digital image-based method // *Food. Anal. Methods.* 2017. V. 10. № 6. P. 2102.
35. *Masawat P., Harfield A., Namwong A.* An iPhone-based digital image colorimeter for detecting tetracycline in milk // *Food Chem.* 2015. V. 184. P. 23.
36. *Maroubo L.A., Pedrina G., Melchert W.R.* Total sulfonamides determination in bovine milk using smartphone-based digital images // *Microchem. J.* 2021. V. 170. Article 106657.
37. *Peng B., Zhou J., Xu J., Fan M., Ma Y., Zhou M., Li T., Zhao S.* A smartphone-based colorimetry after dispersive liquid-liquid microextraction for rapid quantification of calcium in water and food samples // *Microchem. J.* 2019. V. 149. Article 104072.
38. *Lamarca R.S., Luchiari N.D.C., Bonjorno A.F., Filho J.P., Cardoso A.A., Gomes P.C.F.L.* Determination of formaldehyde in cosmetic products using gas-diffusion microextraction coupled with a smartphone reader // *Anal. Methods.* 2019. V. 11. P. 3697.
39. *Soares S., Nunes L.C., Melchert W.R., Rocha F.R.P.* Spot test exploiting smartphone-based digital images for determination of biodiesel in diesel blends // *Microchem. J.* 2020. V. 152. Article 104273.
40. *Resque I.S., Dos Santos V.B., Suarez W.T.* An environmentally friendly analytical approach based on spot test and digital image to evaluate the conformity of bleaching products // *Chem. Pap.* 2019. V. 73. № 7. P. 1659.
41. *Soares S., Fernandes G.M., Moraes L.M.B., Batista A.D., Rocha F.R.P.* Single-phase determination of calcium and magnesium in biodiesel using smartphone-based digital images // *Fuel.* 2022. V. 307. Article 121837.
42. *Sun H., Jia Y., Dong H., Fan L., Zheng J.* Multiplex quantification of metals in airborne particulate matter via smartphone and paperbased microfluidics // *Anal. Chim. Acta.* 2018. V. 1044. P. 110.
43. *Wei Q., Nagi R., Sadeghi K., Feng S., Yan E., Jung Ki S., Caire R., Tseng D., Ozcan A.* Detection and spatial mapping of mercury contamination in water samples using a smart-phone // *ACS Nano.* 2014. V. 8. № 2. P. 1121.
44. *Garcia A., Erenas M.M., Marinetto E.D., Abad C.A., de Orbe-Paya I., Palma A.J., Capitan-Vallvey L.F.* Mobile phone platform as portable chemical analyzer // *Sens. Actuators B: Chem.* 2011. V. 156. P. 350.
45. *Salles M.O., Meloni G.N., De Araujo W.R., Paixao T.R.L.C.* Explosive colorimetric discrimination using a smartphone, paper device and chemometrical approach // *Anal. Methods.* 2014. V. 6. № 7. P. 2047.
46. *Sicard C., Glen C., Aubie B., Wallace D., Jahanshahi-Anbuhi S., Pennings K., Daigger G.T., Pelton R., Brennan J.D., Filipe C.* Tools for water quality monitoring and mapping using paper-based sensors and cell phones // *Water Research.* 2015. V. 70. P. 360.
47. *Oncescu V., Mancuso M., Erickson D.* Cholesterol testing on a smartphone // *Lab Chip.* 2014. V. 14. P. 759.
48. *Jia Y., Sun H., Li X., Sun D., Hu T., Xiang N., Ni Z.* Paper-based graphene oxide biosensor coupled with smartphone for the quantification of glucose in oral fluid // *Biomed. Microdevices.* 2018. V. 20. P. 89.
49. *Oncescu V., O'Dell D., Erickson D.* Smartphone based health accessory for colorimetric detection of biomarkers in sweat and saliva // *Lab Chip.* 2013. V. 13. № 16. P. 3232.
50. *Bueno L., Meloni G.N., Reddy S.M., Paixao T.R.L.C.* Use of plastic-based analytical device, smartphone and chemometric tools to discriminate amines // *RSC Adv.* 2015. V. 5. P. 20148.
51. *Cao Y., Liu Y., Li F., Guo S., Shui Y., Xue H., Wang L.* Portable colorimetric detection of copper ion in drinking water via red beet pigment and smartphone // *Microchem. J.* 2019. V. 150. Article 104176.
52. *Lee S., Kim G., Moon J.* Performance improvement of the one-dot lateral flow immunoassay for aflatoxin B1 by using a smartphone based reading system // *Sensors.* 2013. V. 13. № 4. P. 5109.
53. *Shahvar A., Saraji M., Gordan H., Shamsaei D.* Combination of paper-based thin film microextraction with smartphone-based sensing for sulfite assay in food samples // *Talanta.* 2019. V. 197. P. 578.
54. *Li X., Wang J., Yi C., Jiang L., Wu J., Chen X., Shen X., Sun Y., Lei H.* A smartphone-based quantitative detection device integrated with latex microsphere immunochromatography for on-site detection of zearalene in cereals and feed // *Sens. Actuators B: Chem.* 2019. V. 290. P. 170.
55. *Liu C., Wang Y., Fu L., Chen K.* Microfluidic paper-based chip platform for benzoic acid detection in food // *Food Chem.* 2018. V. 249. P. 162.
56. *Lopez-Ruiz N., Martinez-Olmos A., de Vargas-Sansalvador I.M.P., Fernandez-Ramos M.D., Carvajal M.A., Capitan-Vallvey L.F., Palma A.J.* Determination of O<sub>2</sub> using colour sensing from image processing with mobile devices // *Sens. Actuators B: Chem.* 2012. V. 171–172. P. 938.
57. *Böck F.C., Helfer G.A., Costa A., Dessuy M.B., Ferrao M.F.* PhotoMetric and colorimetric image analysis using smartphones // *J. Chemom.* 2020. <https://doi.org/10.1002/cem.3251>

58. *Li F., Hu Y., Li Z., Liu J., Lei Guo L., He J.* Three-dimensional microfluidic paper-based device for multiplexed colorimetric detection of six metal ions combined with use of a smartphone // *Anal. Bioanal. Chem.* 2019. V. 411. P. 6497.
59. *Muhammad-aree S., Teepoo S.* On-site detection of heavy metals in wastewater using a single paper strip integrated with a smartphone // *Anal. Bioanal. Chem.* 2020. V. 412. P. 1395.
60. *Sun H., Li W., Dong Z., Hu C., Leung C., Ma D., Ren K.* A suspending-droplet mode paper-based microfluidic platform for low-cost, rapid, and convenient detection of lead (II) ions in liquid solution // *Biosens. Bioelectron.* 2018. V. 99. P. 361.
61. *Kang S., Jang S., Haldorai Y., Vilian A.T.E., Rethinasabapathy M., Roh C., Han Y., Huh Y.S.* Facile fabrication of paper-based analytical devices for rapid and highly selective colorimetric detection of cesium in environmental samples // *RSC Adv.* 2017. V. 7. P. 48374.
62. *Jarujamrus P., Meelapsom R., Pencharee S., Obma A., Amatongchai M., Ditcharoen N., Chairam S., Tamuang S.* Use of a smartphone as a colorimetric analyzer in paper-based devices for sensitive and selective determination of mercury in water samples // *Anal. Sci.* 2018. V. 34. P. 75.
63. *Cheng N., Xu Y., Huang K., Chen Y., Yang Z., Luo Y., Xu W.* One-step competitive lateral flow biosensor running on an independent quantification system for smart phones based in-situ detection of trace Hg(II) in tap water // *Food Chem.* 2017. V. 214. P. 169.
64. *Moraes E.P., da Silva N.S.A., de Moraes C. de L.M., das Neves L.S., de Lima K.M.G.* Low-cost method for quantifying sodium in coconut water and seawater for the undergraduate analytical chemistry laboratory: flame test, a mobile phone camera, and image processing // *J. Chem. Educ.* 2014. V. 91. № 11. P. 1958.
65. *Shen L., Hagen J.A., Papautsky I.* Point-of-care colorimetric detection with a smartphone // *Lab Chip.* 2012. V. 12. P. 4240.
66. *Sankar K., Lenisha D., Janaki G., John J. Rajaram S.K., Selvi M.C., Srinivasan G.* Digital image-based quantification of chlorpyrifos in water samples using a lipase embedded paper based device // *Talanta.* 2020. V. 208. Article 120408.
67. *Ansari N., Lodha A., Panday A., Menon S.K.* Determination of cause of death using paper-based microfluidic device as a colorimetric probe // *Anal. Methods.* 2017. V. 9. P. 5632.
68. *Liu C., Gomez F.A., Miao Y., Cui P., Lee W.* A colorimetric assay system for dopamine using microfluidic paper-based analytical devices // *Talanta.* 2019. V. 194. P. 171.
69. *Lee S., Oncescu V., Mancuso M., Mehta S., Erickson D.* A smartphone platform for the quantification of vitamin D levels // *Lab Chip.* 2014. V. 14. P. 1437.
70. *Fashi A., Cheraghi M., Ebadipur H., Ebadipur H., Zamani A., Badiee H., Pedersen-Bjergaard S.* Exploiting agarose gel modified with glucose-fructose syrup as a green sorbent in rotating-disk sorptive extraction technique for the determination of trace malondialdehyde in biological and food samples // *Talanta.* 2020. V. 217. Article 121001.
71. *Zhang C., Kim J.P., Creer M., Yang J., Liu Z.* A smartphone-based chloridometer for point-of-care diagnostics of cystic fibrosis // *Biosens. Bioelectron.* 2017. V. 9. P. 164.
72. *Calabria D., Caliceti C., Zangheri M., Mirasoli M., Simoni P., Roda A.* Smartphone-based enzymatic biosensor for oral fluid L-lactate detection in one minute using confined multilayer paper reflectometry // *Biosens. Bioelectron.* 2017. V. 94. P. 124.
73. *Jalal U.M., Jin G.J., Shim J.S.* Paper-plastic hybrid microfluidic device for smartphone-based colorimetric analysis of urine // *Anal. Chem.* 2017. V. 89. P. 13160.
74. *Wang X., Li F., Cai Z., Liu K., Li J., Zhang B., He J.* Sensitive colorimetric assay for uric acid and glucose detection based on multilayer-modified paper with smartphone as signal readout // *Anal. Bioanal. Chem.* 2018. V. 410. P. 2647.
75. *Shrivastava K., Monisha, Kant T., Karbhal I., Kurrey R., Sahu B., Sinha D., Patra G.K., Deb M.K., Pervez S.* Smartphone coupled with paper-based chemical sensor for on-site determination of iron (III) in environmental and biological samples // *Anal. Bioanal. Chem.* 2020. V. 412. P. 1573.
76. *He J., Xiao G., Chen X., Qiao Y., Xu D., Lu Z.* A thermoresponsive microfluidic system integrating a shape memory polymer-modified textile and a paper-based colorimetric sensor for the detection of glucose in human sweat // *RSC Adv.* 2019. V. 9. P. 23957.
77. *Rasouli Z., Ghavami R.* Simultaneous optical detection of human serum albumin and transferrin in body fluids // *Microchim. Acta.* 2020. V. 187. P. 208.
78. *Abaoag C.J., Alforque R., Ordonez J.B., Quinto E.* Non-invasive detection of human body liquor intake based on optical biosensor / MATEC Web of Conferences (The 24th Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE 2017)). 2018. V. 156. Article 05005.
79. *Koh A., Kang D., Xue Y., Lee S., Pielak R.M., Kim J., Hwang T., Min S., Banks A., Bastien P., Manco M.C., Wang L., Ammann K.R., Jang K.I., Won P., Han S., Ghaffari R., Paik U., Slepian M.J., Balooch G., Huang Y., Rogers J.A.* A soft, wearable microfluidic device for the capture, storage, and colorimetric sensing of sweat // *Sci. Transl. Med.* 2016. V. 8. № 366. P. 1.
80. *Лаврухина О.И., Амелин В.Г., Прохвятилова Л.Б., Ручнова О.И.* Риски загрязнения пищевых продуктов на различных стадиях их производства // *Ветеринария сегодня.* 2017. № 3 (22). С. 33.
81. *Oliveira L.M.A., Santos V.B., Silva E.K.N., Lopes A.S., Dantas-Filho H.A.* An environment-friendly spot test method with digital imaging for the micro-titration of citric fruits // *Talanta.* 2020. V. 206. Article 120219.
82. *Calabria D., Mirasoli M., Guardigli M., Simoni P., Zangheri M., Severi P., Caliceti C., Roda A.* Paper-based smartphone chemosensor for reflectometric on-site total polyphenols quantification in olive oil // *Sens. Actuators B: Chem.* 2020. V. 305. Article 127522.
83. *Luchiari N. da C., da Silva G.A., Marasco Jr. C.A., Gomes P.C.F. de L.* Development of miniaturized fluorimetric device for caffeine determination using a smartphone // *RSC Adv.* 2019. V. 9. P. 35033.
84. *Mahato K., Chandra P.* Paper-based miniaturized immunosensor for naked eye ALP detection based on digital

- image colorimetry integrated with smartphone // Biosens. Bioelectron. 2019. V. 128. P. 9.
85. Li Z., Li Z., Zhao D., Wen F., Jiang J., Xu D. Smartphone-based visualized microarray detection for multiplexed harmful substances in milk // Biosens. Bioelectron. 2017. V. 87. P. 874.
  86. Valek T., Valkova P., Pohanka M. Colorimetric method for the determination of proteins using immobilized microbial protease and a smartphone camera // Anal. Lett. 2021. V. 54. P. 1023.
  87. Yu L., He C., Zheng Q., Feng L., Xiong L., Xiao Y. Dual Eu-MOFs based logic device and ratiometric fluorescence paper microchip for visual H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> assay // J. Mater. Chem. 2020. V. 8. P. 3562.
  88. Zeng X., Hu J., Zhang M., Wang F., Wu L., Hou X. Visual detection of fluoride anions using mixed lanthanide metal-organic frameworks with a smartphone // Anal. Chem. 2020. V. 92. № 2. P. 2097.
  89. Shrivastava K., Monisha, Patel S., Thakur S.S., Shankar R. Food safety monitoring of the pesticide phenthoate using a smartphone-assisted paper-based sensor with bimetallic Cu@Ag core-shell nanoparticles // Lab. Chip. 2020. V. 20. P. 3996.
  90. Botelho B.G., Dantas K.C.F., Sena M.M. Determination of allura red dye in hard candies by using digital images obtained with a mobile phone and N-PLS // Chemom. Intel. Lab. Syst. 2017. V. 167. P. 44.
  91. Fang J., Qiu X., Wan Z., Zou Q., Su K., Hu N., Wang P. A sensing smartphone and its portable accessory for on-site rapid biochemical detection of marine toxins // Anal. Methods. 2016. V. 8. № 38. P. 6895.
  92. Lin B., Yu Y., Cao Y., Guo M., Zhu D., Dai J., Zheng M. Point-of-care testing for streptomycin based on aptamer recognizing and digital image colorimetry by smartphone // Biosens. Bioelectron. 2018. V. 100. № 378. P. 482.
  93. Coskun A.F., Wong J., Khodadadi D., Nagi R., Tey A., Ozcan A. A personalized food allergen testing platform on a cellphone // Lab. Chip. 2013. V. 13. № 4. P. 636.
  94. Khoshmaram L., Mohammadi M., Babadi A.N. A portable low-cost fluorimeter based on LEDs and a smart phone // Microchem. J. 2021. V. 171. Article 106773.
  95. Sergeeva T.A., Yarynka D., Piletska E., Linnik R., Zaporozhets O., Brovko O., Piletsky S.A., El'skaya A.V. Development of a smartphone-based biomimetic sensor for aflatoxin B1 detection using molecularly imprinted polymer membranes // Talanta. 2019. V. 201. P. 204.
  96. Hu X., Shi J., Shi Y., Xiaobo Z., Arslan M., Zhang W., Xiaowei H., Zhihua L., Xu Y. Use of a smartphone for visual detection of melamine in milk based on Au@Carbon quantum dots nanocomposites // Food Chem. 2019. V. 272. P. 58.
  97. Yang N., Xie L., Pan C., Yuan M., Tao Z., Mao H. A novel on-chip solution enabling rapid analysis of melamine and chloramphenicol in milk by smartphones // J. Food Process Eng. 2018. V. 42. Article e12976.
  98. Li Y., He L., Ge Y., Song G., Zhou J. Smartphone-assisted visual ratio-fluorescence detection of hypochlorite based on copper nanoclusters // Spectrochim. Acta A. 2021. V. 255. Article 119740.
  99. Zangheri M., Nardo F.D., Calabria D., Marchegiani E., Anfossi L., Guardigli M., Mirasole M., Baggiani C., Roda A. Smartphone biosensor for point-of-need chemiluminescence detection of ochratoxin A in wine and coffee // Anal. Chim. Acta. 2021. V. 1163. Article 338515.
  100. Амелин В.Г., Шаока З.А.Ч., Большаков Д.С. Микроэкстракционно-цветометрическое (флуориметрическое) определение катионных и анионных ПАВ в пищевых продуктах // Журн. аналит. химии. 2021. Т. 76. № 3. С. 234.
  101. Thom N.K., Lewis G.G., Yeung K., Phillips S.T. Quantitative fluorescence assays using a self-powered paper-based microfluidic device and a camera-equipped cellular phone // RSC Adv. 2014. V. 4. P. 1334.
  102. Kaoutit E.H., Estevez P., Garcia F.C., Serna F., Garcia J.M. Sub-ppm quantification of Hg(II) in aqueous media using both the naked eye and digital information from pictures of a colorimetric sensory polymer membrane taken with the digital camera of a conventional mobile phone // Anal. Methods. 2013. V. 5. P. 54.
  103. Joao A.F., Squizzato A.L., Fernandes G.M., Cardoso R.M., Batista A.D., Munoz R.A.A. Iron(III) determination in bioethanol fuel using a smartphone-based device // Microchem. J. 2019. V. 146. P. 1134.
  104. Koesdjojo M.T., Pengpumkiat S., Wu Y., Boonloed A., Huynh D., Remcho T.P., Remcho V.T. Cost effective paper-based colorimetric microfluidic devices and mobile phone camera readers for the classroom // J. Chem. Educ. 2015. V. 92. № 4. P. 737.
  105. Kumar A., Sahoo P.R., Arora P., Kumar S. A light controlled, sensitive, selective and portable spiropyran based receptor for mercury ions in aqueous solution // J. Photochem. Photobiol. 2019. V. 384. Article 112061.
  106. Espino M., Fernandez M.D.L.A., Silva M.F., Gomez F.J.V. Paper microzone plates integrating natural deep eutectic solvents: Total phenolic compounds and antioxidant capacity as performed by nature // Microchem. J. 2020. V. 158. Article 105296.
  107. Государственная Фармакопея Российской Федерации. XIV изд. Т. I. М.: Научный центр экспертизы средств медицинского применения, 2018. 1814 с.
  108. Государственная Фармакопея Российской Федерации. XIV изд. Т. III. М.: Научный центр экспертизы средств медицинского применения, 2018. 5187 с.
  109. ГОСТ Р 52249-2009. Правила производства и контроля качества лекарственных средств. М.: Стандартинформ, 2010. 139 с.
  110. Амелин В.Г., Шаока З.А.Ч., Большаков Д.С. Твердофазно-флуориметрическое определение тетрациклинов на целлюлозной бумаге и тонком слое силикагеля в лекарственных препаратах с использованием смартфона // Хим.-фарм. журн. 2021. Т. 55. № 3. С. 52.
  111. Амелин В.Г., Шаока З.А.Ч., Большаков Д.С. Твердофазно-флуориметрическое определение хинолонов на целлюлозной бумаге и тонком слое силикагеля в лекарственных препаратах с использова-

- нием смартфона // Журн. аналит. химии. 2021. Т. 76. №7. С. 593.
112. *Амелин В.Г., Шаока З.А.Ч., Большаков Д.С.* Использование смартфона в твердофазно-флуориметрическом определении некоторых нестероидных противовоспалительных средств в лекарственных препаратах // Хим.-фарм. журн. 2021. Т. 55. № 9. С. 54.
113. *Амелин В.Г., Шаока З.А.Ч., Большаков Д.С., Третьяков А.В.* Цифровая цветометрия индикаторных тест-систем с использованием смартфона и хемометрического анализа при определении хинолонов в лекарственных препаратах // Журн. прикл. спектроск. 2022. Т. 89. № 1. С. 84.
114. *Амелин В.Г., Шаока З.А.Ч., Большаков Д.С.* Микроэкстракционно-цветометрическое определение и идентификация антибиотиков пенициллинового ряда в лекарственных средствах с использованием смартфона и хемометрического анализа // Вестн. Моск. ун-та. Серия 2. Химия. 2022. Т. 63. № 3. С. 222.
115. *Амелин В.Г., Шаока З.А.Ч., Большаков Д.С., Третьяков А.В.* Цифровая цветометрия индикаторных тест-систем с использованием смартфона и хемометрического анализа при определении тетрациклинов в лекарственных препаратах // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2022. Т. 65. Вып. 7. С. 17.
116. *Амелин В.Г., Майя М., Большаков Д.С.* Микроэкстракционно-цветометрическое определение четвертичных аммониевых соединений в лекарственных и дезинфицирующих средствах // Вестн. Моск. ун-та. Серия 2. Химия. 2021. Т. 62. № 2. С. 121.
117. *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.
118. *Шаока З.А.Ч., Амелин В.Г., Репкин Р.В.* Идентификация природных минеральных вод Владимирской области по цветометрии индикаторных бумаг с использованием смартфона // Вестн. Моск. ун-та. Серия 2. Химия. 2022. Т. 63. № 3. С. 233.
119. *Silva Neto G.F., Braga A.F.J.W.B.* Classification of mineral waters based on digital images acquired by smartphones // Quim. Nova. 2016. V. 39. № 7. P. 876.
120. *Zaragoza P., Fuentes A., Ruiz-Rico M., Vivancos J., Fernandez-Segovia I., Ros-Lis J.V., Barat J.M., Martínez-Manez R.* Development of a colorimetric sensor array for squid spoilage assessment // Food Chem. 2015. V. 175. P. 315.
121. *Huang X., Xin J., Zhao J.* A novel technique for rapid evaluation of fish freshness using colorimetric sensor array // J. Food Eng. 2011. V. 105. P. 632.
122. *Bueno L., Paixao T.R.L.C.* A copper interdigitated electrode and chemometrical tools used for the discrimination of the adulteration of ethanol fuel with water // Talanta. 2011. V. 87. P. 210.
123. *Nguyen T.T., Huy B.T., Lee Y.* Disposable colorimetric paper-based probe for the detection of amine-containing gases in aquatic sediments // ACS Omega. 2019. V. 4. P. 12665.
124. *Zhang C., Bailey D.P., Suslick K.S.* Colorimetric sensor arrays for the analysis of beers: A feasibility study // J. Agric. Food Chem. 2006. V. 54. P. 4925.
125. *Zhang C., Suslick K.S.* Colorimetric sensor array for soft drink analysis // J. Agric. Food Chem. 2007. V. 55. P. 237.
126. *Suslick B.A., Feng L., Suslick K.S.* Discrimination of complex mixtures by a colorimetric sensor array: coffee aromas // Anal. Chem. 2010. V. 82. P. 2067.
127. *Feng L., Musto C.J., Kemling J.W., Lim S.H., Zhong W., Suslick K.S.* Colorimetric sensor array for determination and identification of toxic industrial chemicals // Anal. Chem. 2010. V. 82. № 22. P. 9433.