

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 543.422.7

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ ПИЩЕВЫХ КРАСИТЕЛЕЙ
В ГАЗИРОВАННЫХ НАПИТКАХ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ
ЦВЕТОМЕТРИИ****Оксана Викторовна Моногарова, Кирилл Владимирович Осколок, Валерия
Станиславовна Милькина, Андрей Владимирович Гармай**Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
химический факультет, кафедра аналитической химии**Автор, ответственный за переписку:** Оксана Викторовна Моногарова,
o_monogarova@mail.ru

Аннотация. Разработан простой и доступный способ определения двух красителей при совместном присутствии методом цифровой цветометрии с помощью фотокамеры смартфона. Создан прототип специализированного бокса, позволяющего снизить вклад рассеянного излучения в измеряемый сигнал до уровня шума светочувствительного датчика. Предложенный подход апробирован при определении синтетических пищевых красителей в газированных напитках. Точность результатов определения красителей в напитках методами цифровой цветометрии и спектрофотометрии отличается незначимо.

Ключевые слова: цифровая цветометрия, двухкомпонентный анализ, синтетический пищевой краситель, газированный напиток

DOI: 10.55959/MSU0579-9384-2-2025-66-5-390-400

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

Для цитирования: Моногарова О.В., Осколок К.В., Милькина В.С., Гармай А.В. Определение синтетических пищевых красителей в газированных напитках методом цифровой цветометрии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2025. Т. 66. № 5. С. 390–400.

ORIGINAL ARTICLE

**DETERMINATION OF SYNTHETIC FOOD DYES IN CARBONATED
BEVERAGES BY DIGITAL IMAGE COLORIMETRY****Oksana V. Monogarova, Kirill V. Oskolok, Valeriya S. Milkina, Andrei V. Garmay**Lomonosov Moscow State University, Department of Chemistry, Division of
Analytical Chemistry, Moscow, Russia**Corresponding author:** Oksana V. Monogarova, o_monogarova@mail.ru

Abstract. A simple and cheap method for the simultaneous determination of two dyes by digital image colorimetry using a smartphone photo camera was developed. A prototype of a specialized box that allows reducing the contribution of scattered radiation to the

measured signal to the noise level of a digital image sensor was created. The proposed approach was verified by the determination of synthetic food dyes in carbonated beverages. The accuracy of the results of the determination of dyes in beverages by digital image colorimetry and spectrophotometry differs slightly.

Keywords: digital image colorimetry, two-component analysis, synthetic food dye, carbonated beverage

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

For citation: Monogarova O.V., Oskolok K.V., Milkina V.S., Garmay A.V. Determination of synthetic food dyes in carbonated beverages by digital image colorimetry // Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 2. Khimiya. 2025. T. 66. № 5. S. 390–400.

Цифровая цветометрия – современный метод химического анализа, основанный на фотоэлектрическом измерении количественных характеристик цвета образца с помощью многоканальных светочувствительных датчиков, укомплектованных матрицей абсорбционных широкополосных светофильтров. Метод активно развивается более двадцати лет в связи с повсеместным распространением бытовых устройств для получения оптических изображений – цифровых фотоаппаратов, смартфонов, офисных планшетных сканеров и др. [1–3]. Этот метод широко используют в биологии и медицине, пищевой и фармацевтической промышленности, для анализа объектов окружающей среды [4–7]. Цифровая цветометрия успешно сочетает доступность и техническую простоту тест-средств с хорошими метрологическими характеристиками инструментальных методов.

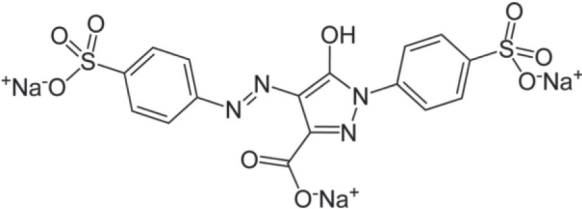
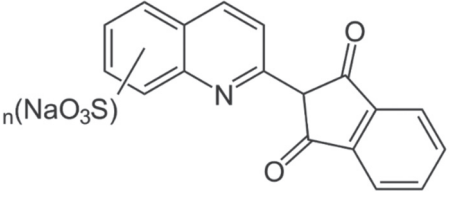
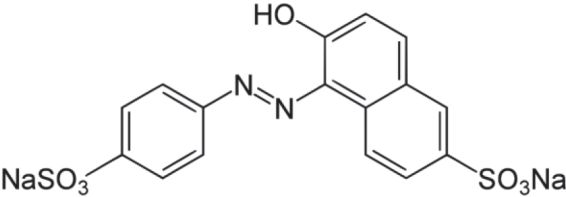
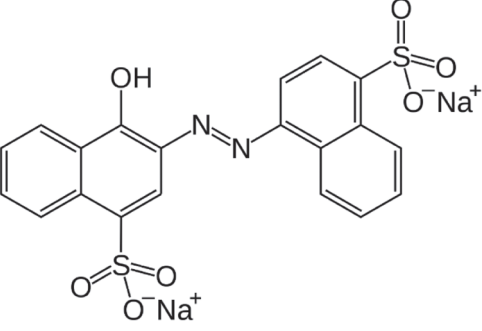
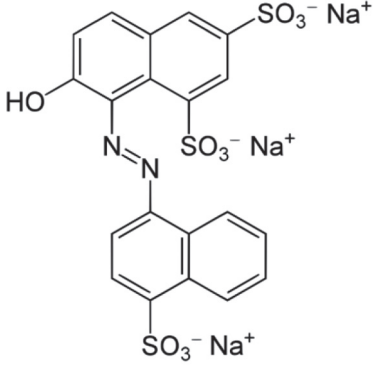
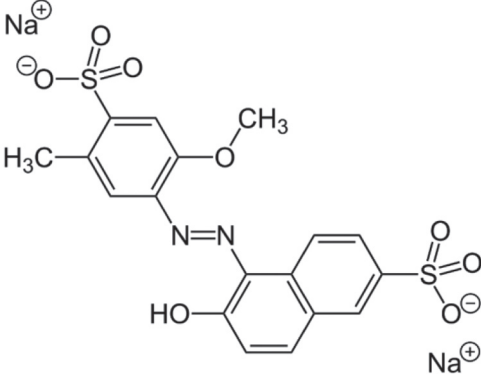
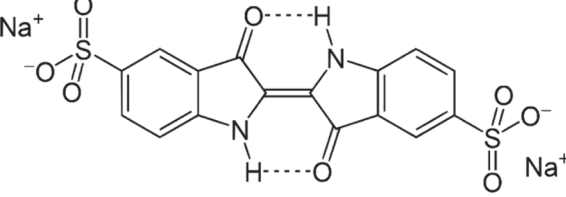
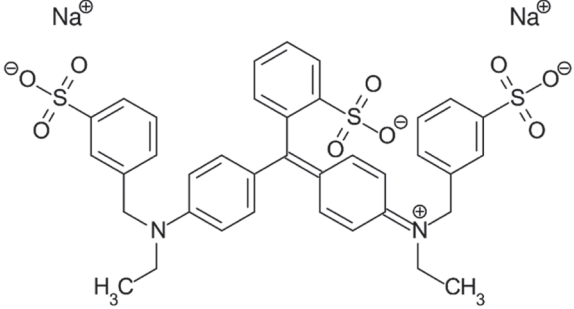
Одним из основных ограничений метода является низкая селективность. Поэтому подавляющее большинство опубликованных работ по цифровому цветометрическому анализу разных классов объектов посвящено определению в них либо какого-то одного компонента, либо суммарного количества родственных веществ [8]. Для повышения селективности наряду с предварительным отделением мешающих компонентов авторы статей используют системы типа «электронный глаз», которые помимо светочувствительного датчика включают матрицы так называемых «молекулярных сенсоров» – веществ, изменяющих окраску в зависимости от кислотности среды, возможности взаимодействия с разными функциональными группами, комплексообразования и т.д. [9–15]. Величина отклика каждого сенсора

зависит как от природы аналита, так и от его содержания в пробе. Характеристичность совокупного отклика большого числа малоселективных, но независимых молекулярных сенсоров уже достаточно велика. Дополнительному повышению надежности результатов обнаружения и определения аналитов способствует возможность дискриминации сигналов, вызванных мешающими веществами. Однако проблема одновременного многокомпонентного анализа пока не решена.

Цель настоящей работы – изучение принципиальной возможности одновременного двухкомпонентного анализа реального объекта методом цифровой цветометрии на примере определения пищевых красителей в сильногазированных безалкогольных напитках. Синтетические пищевые красители представляют собой смесь органических веществ следующих групп: трифенилметановые, индигоидные, ксантеновые, хинолиновые, азокрасители, пиразолоновые и полициклические [16, 17]. Рекомендуемое содержание таких красителей в безалкогольных напитках, представленное в Санитарных правилах и нормах, для желтых и оранжевых красителей составляет 15–30 мг/л, для красных и синих – 10–15 мг/л [18, 19]. При наличии в пищевом продукте нескольких красящих компонентов их суммарное содержание не должно превышать допустимый минимальный норматив. По данным токсикологических исследований, синтетические пищевые красители можно отнести к третьему и четвертому классам опасности [18]. Их чрезмерное потребление может вызвать заболевания желудочно-кишечного тракта, почек, печени и сердца. Таким образом, определение синтетических красителей в напитках является актуальной задачей.

Т а б л и ц а 1

Структурные формулы синтетических пищевых красителей, использованных в работе

Тартразин желтый (E102) 	Хинолиновый желтый (E104) 
Желтый «солнечный закат» (E110) 	Кармуазин малиновый (E122) 
Понсо 4R (E124) 	Аллюра красный (E129) 
Индиго кармин (E132) 	Синий блестящий FCF (E133) 

Для достижения поставленной цели необходимо разработать аппаратные и математические способы коррекции цветометрического сигнала, искаженного в результате влияния ряда экспериментальных факторов как при формировании оптических изображений окрашенных растворов, так и при их интерпретации (извлечении химико-аналитической информации).

Экспериментальная часть
Приборы и материалы

В работе использованы следующие реагенты: тушь жидкая черная «ГАММА», пищевые красители водорастворимые (ООО «Академия Мастерства» Россия) (табл. 1): тартазин желтый (E102), хинолиновый желтый (E104), желтый «солнечный закат» (E110), кармуазин малиновый (E122), понсо 4R (E124), аллюра красный (E129), индиго кармин (E132), синий блестящий FCF (E133), пищевой краситель водорастворимый Сахарный колер IV (E150d) (ООО «Форвард Ингридиентс» Россия); напитки безалкогольные сильногазированные (ООО «Напитки из Черноголовки-АКВАЛАЙФ», Черноголовка, Россия): «Тархун», «Мандарин»; напитки безалкогольные сильногазированные (ООО «Глобал Фанкшнл Дринкс Рус», FreshBar, Россия): «Киви Микс 1.0», «Мэджик Скиллс 1.0».

Оборудование и вспомогательные материалы для цветометрического анализа: 96-луночный микропланшет из полистирола (Greiner AG, Австрия) с плоским дном (емкость лунки 350 мкл); механический дозатор на 100–1000 мкл (BioHit, Китай); смартфон Xiaomi POCO M3 Pro (Китай); программа для анализа и обработки растровых изображений ImageJ (National Institutes of Health (США), разработчик – Wayne Rasband [20]); программа для получения изображений на смартфо-

не HedgeCam 2; плоская квадратная OLED-лампа Gauss (размер 10×10 см, мощность 15 Вт, цветовая температура 4100 К); пенокартон черный; две коллимирующие диафрагмы – алюминиевые пластины толщиной 2 мм с 96 отверстиями (диаметр 2 мм), соосными лункам микропланшета; объективная стеклянная линза; пленочные нейтральные светофильтры, полученные методом черно-белой лазерной печати с коэффициентами пропускания 50; 25; 12,5 и 6,25%.

Спектры поглощения растворов в видимом диапазоне длин волн измеряли на однолучевом спектрофотометре PG T70 (Великобритания) в стандартных кюветах из полистирола толщиной 1 см. Дегазацию напитков проводили с помощью ванны с ультразвуковым генератором Град УН 180-3.

Приготовление растворов

По навескам приготовили водные растворы пищевых красителей с концентрацией 2,4 г/л (E150d) и 50 мг/л (E102, E104, E110, E122, E129, E132, E133). Из исходных индивидуальных растворов готовили по 25 градуировочных растворов смесей красителей, заявленных производителями газированных напитков (табл. 2). Анализируемые пробы газированных напитков дегазировали в течение 20 мин в ультразвуковой бане.

Результаты и их обсуждение
Измерительный бокс

В отдельные ячейки 96-луночного микропланшета с помощью дозатора помещали по 320 мкл (1) градуировочных растворов смесей пищевых красителей, приготовленных для построения регрессионной модели, (2) дегазированных в ультразвуковой ванне напитков и (3) черной туши.

Т а б л и ц а 2

Состав модельных растворов пищевых красителей

Газированный напиток	Краситель А	Интервал концентраций красителя А, мг/л	Краситель В	Интервал концентраций красителя В, мг/л	Соотношение концентраций А:В
Киви Микс 1.0.	E150d	500–1500	E133	1–10	50–1500
Мэджик Скиллс 1.0.	E122	1–10	E133		0,1–10
Мандарин	E104	15–25	E129		2–25
Тархун	E102	10–25	E133		1–25

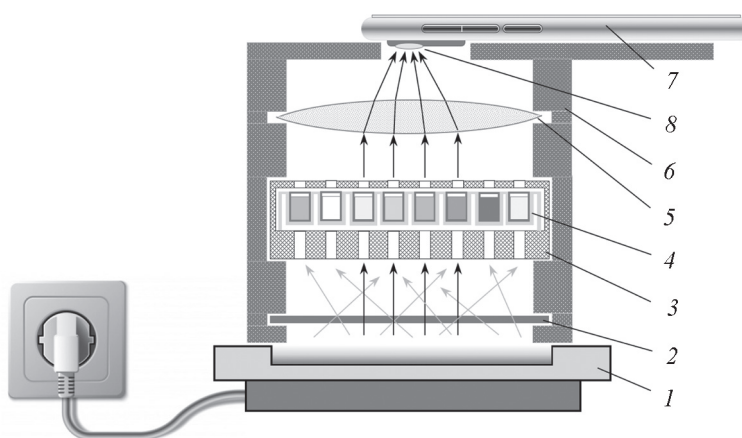


Рис. 1. Внутреннее устройство измерительного бокса: 1 – плоская OLED-лампа, 2 – регулируемый нейтральный ослабляющий светофильтр, 3 – кассета с двойной коллимирующей диафрагмой, 4 – 96-луночный микропланшет с растворами, 5 – объективная линза, 6 – измерительный бокс-штатив, 7 – смартфон, 8 – объектив фотокамеры

При использовании в качестве цветорегистрирующего устройства фотокамеры смартфона возникает проблема, связанная с существенным влиянием внешнего излучения на измеряемый сигнал. Для минимизации этого влияния был изготовлен специализированный измерительный бокс из черного пенокартона (размеры $100 \times 150 \times 300$ мм), в котором предусмотрены отсеки для основных составляющих блоков (смартфона, линзы, диафрагмы, микропланшета, светофильтра и источника света) с возможностью удаления любого из этих элементов без нарушения функциональности измерительного устройства (рис. 1). Для регулирования интенсивности светового потока между микропланшетом и источником освещения установлены нейтральные светофильтры. Объективная стеклянная линза обеспечивает возможность получения с помощью фотокамеры смартфона растровых изображений микропланшета, как на офисном фотосканере, т.е. без экранирования периферийных лунок микропланшета. Для аппаратного снижения рассеянного излучения изготовлена метал-

лическая двойная коллимирующая диафрагма, пропускающая в сторону светочувствительного датчика только составляющую, прошедшую через лунки с растворами. Микропланшет с растворами находится между пластинами диафрагмы. Применение коллимирующей диафрагмы позволяет уменьшить величину рассеянного излучения примерно в 30 раз (табл. 3). При получении изображений с помощью фотокамеры смартфона без использования диафрагмы величина интенсивности рассеянного излучения составляет около 60 ед. по 8-битной шкале (от 0 до 255 ед.). Такое большое значение обусловлено прохождением излучения не только через лунку, но и в обход нее, таким образом, весь этот свет формирует изображение раствора в ячейке микропланшета, искажая аналитический сигнал. При уменьшении путем диафрагмирования микропланшета светового потока, проходящего через линзу, значение интенсивности рассеянного излучения не превышает 2 ед. по 8-битной шкале, что сопоставимо с уровнем цифрового шума светочувствительного датчика фотокамеры смартфона.

Т а б л и ц а 3

Изменение сигнала рассеянного излучения при диафрагмировании

Устройство	Диафрагма	Сигнал рассеянного излучения (<i>RGB</i> 8 бит)		
		<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>
Смартфон	отсутствует	59,4	58,1	66,2
	присутствует	1,7	1,6	1,8

Используемые в работе боксы для проведения измерений с помощью фотокамеры смартфона позволяют жестко зафиксировать каждую лунку микропланшета в пространстве относительно рабочих диодов светочувствительного датчика и определенного участка поверхности источника излучения, обеспечивая постоянство условий измерения аналитического сигнала и снижение информационного шума.

При получении изображений фиксировали следующие параметры фотокамеры смартфона: чувствительность ISO 50, баланс белого 4100 K, фокусное расстояние 0,25 м, формат сохранения изображений – dng. Минимальная чувствительность обеспечивает низкий уровень цифрового шума и более широкий диапазон линейности функции отклика светочувствительного датчика. Выбранный баланс белого соответствует цветовой температуре используемого источника излучения. Оптимальное фокусное расстояние определено по положению фотокамеры смартфона относительно микропланшета в измерительном боксе. Время экспозиции и коэффициент ослабления светового потока OLED-лампы с помощью нейтральных пленочных светофильтров выбирали таким образом, чтобы для полученных изображений лунок микропланшета с растворами интенсивность сигналов цветовых каналов не выходила за пределы диапазона линейности функции отклика светочувствительного датчика фотокамеры смартфона.

Регрессионная модель

С помощью растрового графического редактора можно извлечь информацию о координатах цвета в любой точке полученного изображения. Поскольку интенсивность выбранного цветового канала пропорциональна количеству лучистой энергии, прошедшей через соответствующий светофильтр и попавшей на детектор, в качестве аналитического сигнала была выбрана условная оптическая плотность, вычисленная по формуле

$$A_{ch} = \lg \frac{I_{blank}^{ch}}{I_{sol}^{ch}},$$

где I^{ch} – значение яркости цветового канала ch в лунке с образцом контрольного опыта (*blank*), окрашенным раствором (*sol*). Применение такого аналитического сигнала оправдано в случае строгого выполнения основного закона поглощения света для всех рабочих растворов, в частности, при отсутствии рассеяния света. Однако в общем

случае при цветометрическом анализе пренебрегать этим фактором нельзя, формулу следует скорректировать, тогда выражение для исправленной условной оптической плотности по каналу ch (R , G или B) будет иметь вид:

$$\bar{A}_{ch} = \lg \frac{I_{blank}^{ch} - I_{scatt}^{ch}}{I_{sol}^{ch} - I_{scatt}^{ch}},$$

где I_{scatt}^{ch} – часть измеренной яркости, появление которой вызвано прохождением света в обход растворов, например, через стенки лунок или в результате отражения от границы раздела «лунка / раствор». В настоящей работе о величине рассеянного излучения судили по цветовым координатам изображения лунки с черной тушью.

Получение корректных значений условной оптической плотности по указанной формуле, пригодных для проведения количественного анализа методом цифровой цветометрии, возможно при условии, что значения интенсивности рабочего цветового канала для раствора контрольного опыта и окрашенного раствора попадают в диапазон линейности функции отклика светочувствительного датчика.

Для проведения двухкомпонентного цветометрического анализа необходимо построить подходящую регрессионную модель. В первом приближении содержание красителей можно вычислить по уравнениям:

$$c_1 = k_1^R A_x^R + k_1^G A_x^G + k_1^B A_x^B,$$

$$c_2 = k_2^R A_x^R + k_2^G A_x^G + k_2^B A_x^B,$$

где k – коэффициент расчетной матрицы для красителей, A – значения условной оптической плотности для цветовых R -, G - и B -каналов. Однако использование такой простой модели, как правило, приводит к достаточно высокой погрешности результатов определения. В чем причина?

Бытовые оптические устройства для получения растровых изображений в сочетании с измерительным боксом можно рассматривать в качестве аналога фотоколориметра. Одним из преимуществ современного гаджета является использование многоканального светочувствительного датчика, позволяющего за короткий промежуток времени получать большой объем информации, например, о десятках анализируемых растворов, или результатах измерений одновременно в разных условиях. Одним из ограничений использования оптического гаджета в химическом анализе является наличие Байеровской матрицы абсорбционных светофильтров

всего лишь трех типов – красного, зеленого и синего. Для обеспечения высокой освещенности датчика, например цифровой фотокамеры, производитель использует матрицу светофильтров с шириной полосы пропускания более 70 нм. Спектры пропускания таких светофильтров сильно перекрываются друг с другом [21]. В результате интенсивности разных цветовых каналов перестают быть независимыми, что обуславливает необходимость учета этого эффекта при построении регрессионных моделей для расчета содержания определяемых веществ:

$$c_i = \sum_{ch1}^{R,G,B} k_i^{1ch} A_{ch1} + \sum_{2ch}^{RG,GB,BR} k_i^{2ch} A_{ch1} A_{ch2},$$

где c_i – концентрация определяемого вещества, $i = 1, 2$ – идентификатор определяемого красителя. Первое слагаемое отражает вклад основного закона поглощения света, второе – учитывает связь сигналов в разных цветовых каналах друг с другом и возможное нарушение закона аддитивности значений условной оптической плотности. Вклад факторов, описываемых вторым слагае-

мым уравнения, заметно уменьшает условную оптическую плотность, а значит, снижает коэффициенты чувствительности, сужает диапазоны линейности градуировочных зависимостей и увеличивает погрешности определения. Регрессионные коэффициенты (k) вычисляются с помощью серии стандартных растворов красителей по заданным концентрациям определяемых веществ и экспериментальным значениям условной оптической плотности (A) для разных цветовых каналов, полученных в одинаковых условиях. Для оценки правильности результатов определения проводили анализ растворов красителей с известными концентрациями, не использованных при создании регрессионной модели.

Анализ газированных напитков

Предложенные условия получения и обработки аналитического сигнала применены при двухкомпонентном цветометрическом анализе газированных напитков. Измерены спектры поглощения пищевых коммерчески доступных красителей E102, E104, E110, E122, E129, E132, E133 и E150d в диапазоне длин волн от 350 до 700 нм с шагом

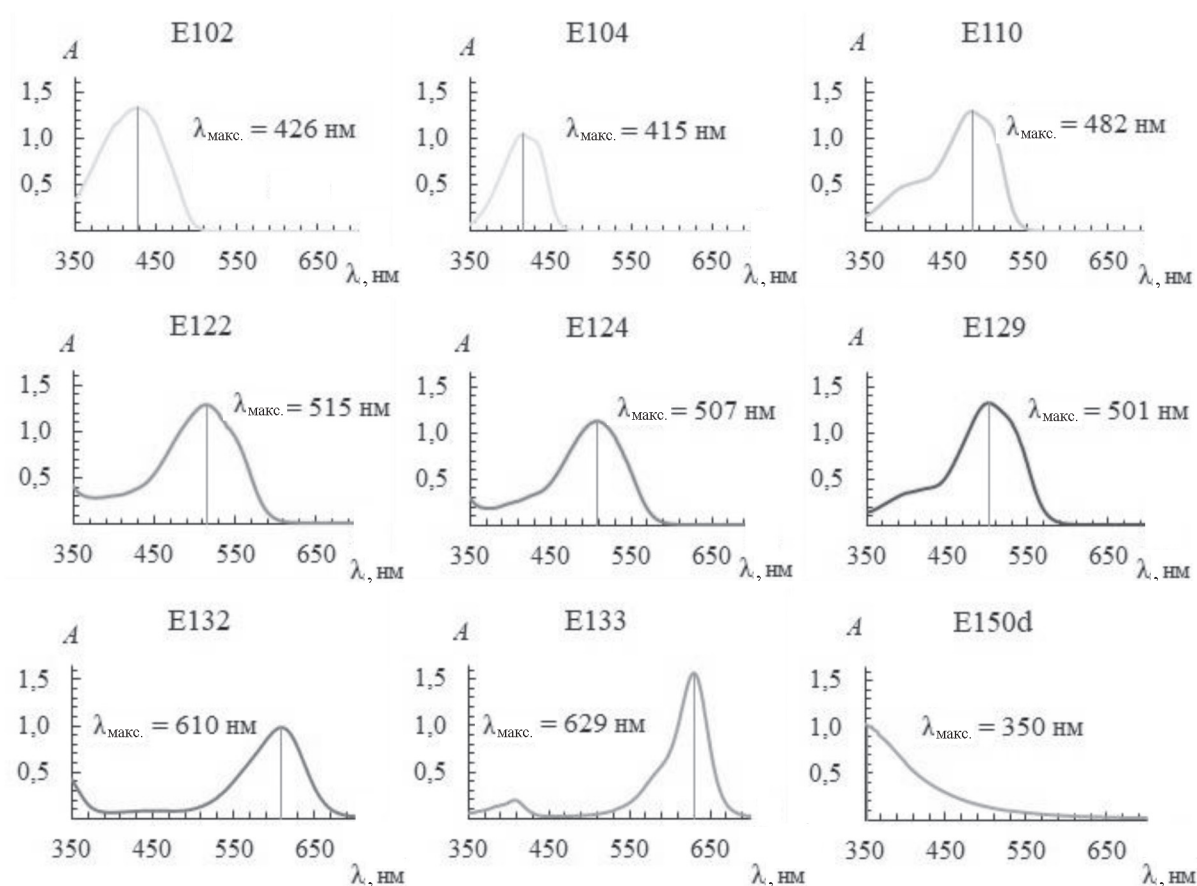


Рис. 2. Оптические спектры поглощения растворов синтетических пищевых красителей

1 нм (рис. 2). Измеренные спектры поглощения красителей позволяют выбрать наиболее подходящие для анализа напитки. Чем следует руководствоваться? Достаточно большая удаленность по шкале длин волн максимумов полос поглощения растворов двух красителей позволяет определять их при совместном присутствии с приемлемой точностью. Это необходимое, но не достаточное условие. Рабочий диапазон отношений концентраций аналитов заметно ограничен положением их полос поглощения на шкале длин волн. Для проведения цветометрического анализа реальных двухкомпонентных систем выбраны газированные напитки российского производства, содержащие два пищевых красителя, полосы поглощения которых либо расположены в окрестности максимумов полос пропускания светофильтров байеровской матрицы, либо очень слабо перекрывают друг друга (рис. 2). Из индивидуальных растворов приготовлены модельные смеси красителей, соотношение компонентов в которых выбрано в соответствии с их концентрацией в напитках (табл. 2). По модельным смесям пищевых красителей определены регрессионные

коэффициенты (табл. 4). Значимого различия результатов определения пищевых красителей в газированных напитках методами спектрофотометрии и цифровой цветометрии не обнаружено (табл. 5). С помощью методов спектрофотометрии и цифровой цветометрии построены тепловые карты относительной погрешности определения различных пищевых красителей в смеси в зависимости от их соотношения (рис. 3, 4). Из приведенных тепловых карт видно, что независимо от природы красителя при низких концентрациях относительная погрешность, как правило, достаточно велика. Следует отметить зависимость погрешности от взаимного расположения полос поглощения красителей. Так, например, максимальная относительная погрешность наблюдается для красителей E104 и E129 в смеси, что обусловлено близостью их максимумов полос поглощения (рис. 2), а также достаточной удаленностью от максимумов полос пропускания светофильтров байеровской матрицы. В свою очередь, для двухкомпонентных систем красителей E133-E150d, E133-E102 и E133-E122 полосы поглощения полностью

Т а б л и ц а 4

Коэффициенты регрессионной модели при двухкомпонентном анализе газированных напитков (концентрации красителей, мг/л)

Киви Микс 1.0.	$R,G,B, RG, RB, GB [K]^{E150d, E133}$					
	$4,2 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^6$	$-1,6 \cdot 10^6$	$-1,8 \cdot 10^6$	$1,4 \cdot 10^6$	$2,8 \cdot 10^5$
	$-1,1 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^4$	$-7,3 \cdot 10^3$	$-9,6 \cdot 10^3$	$1,1 \cdot 10^4$	$-3,3 \cdot 10^3$
Мэджик Скиллс 1.0.	$R,G,B, RG, RB, GB [K]^{E122, E133}$					
	$-5,7 \cdot 10^2$	$9,5 \cdot 10^3$	$-2,0 \cdot 10^4$	$-1,5 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^4$	$5,2 \cdot 10^3$
	$-8,2 \cdot 10^2$	$1,6 \cdot 10^4$	$-2,5 \cdot 10^4$	$-2,0 \cdot 10^4$	$2,1 \cdot 10^4$	$4,0 \cdot 10^3$
Мандарин	$R,G,B, RG, RB, GB [K]^{E104, E129}$					
	$-2,2 \cdot 10^6$	$-5,5 \cdot 10^6$	$1,1 \cdot 10^6$	$4,4 \cdot 10^6$	$-2,2 \cdot 10^6$	$1,1 \cdot 10^6$
	$-2,6 \cdot 10^5$	$-2,5 \cdot 10^5$	$-4,6 \cdot 10^4$	$2,3 \cdot 10^5$	$2,7 \cdot 10^4$	$1,9 \cdot 10^4$
Тархун	$R,G,B, RG, RB, GB [K]^{E102, E133}$					
	$-6,2 \cdot 10^2$	$2,3 \cdot 10^4$	$-8,3 \cdot 10^3$	$-1,6 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^4$	$-7,6 \cdot 10^3$
	$6,7 \cdot 10^1$	$3,2 \cdot 10^3$	$-2,6 \cdot 10^2$	$-1,8 \cdot 10^3$	$1,8 \cdot 10^3$	$-1,5 \cdot 10^3$

Т а б л и ц а 5

Результаты определения красителей в газированных напитках ($P = 0,95, f = 3$)

Газированные напитки		Краситель	$\lambda_{\text{макс.}}, \text{ нм}$	$c, \text{ мг/л}$	
				цифровая цветометрия	спектрофотометрия
Fresh Bar	Киви Микс 1.0.	E150d	350	720 ± 50	750 ± 30
		E133	629	$1,0 \pm 0,1$	$0,8 \pm 0,1$
	Мэджик Скиллс 1.0.	E122	515	11 ± 2	$9,1 \pm 0,2$
		E133	629	$2,1 \pm 0,6$	$1,9 \pm 0,1$
Черноголовка	Мандарин	E104	415	19 ± 2	21 ± 1
		E129	501	$3,1 \pm 0,5$	$3,6 \pm 0,2$
	Тархун	E102	426	$19,9 \pm 0,6$	$20,6 \pm 0,3$
		E133	629	$1,5 \pm 0,1$	$1,6 \pm 0,1$

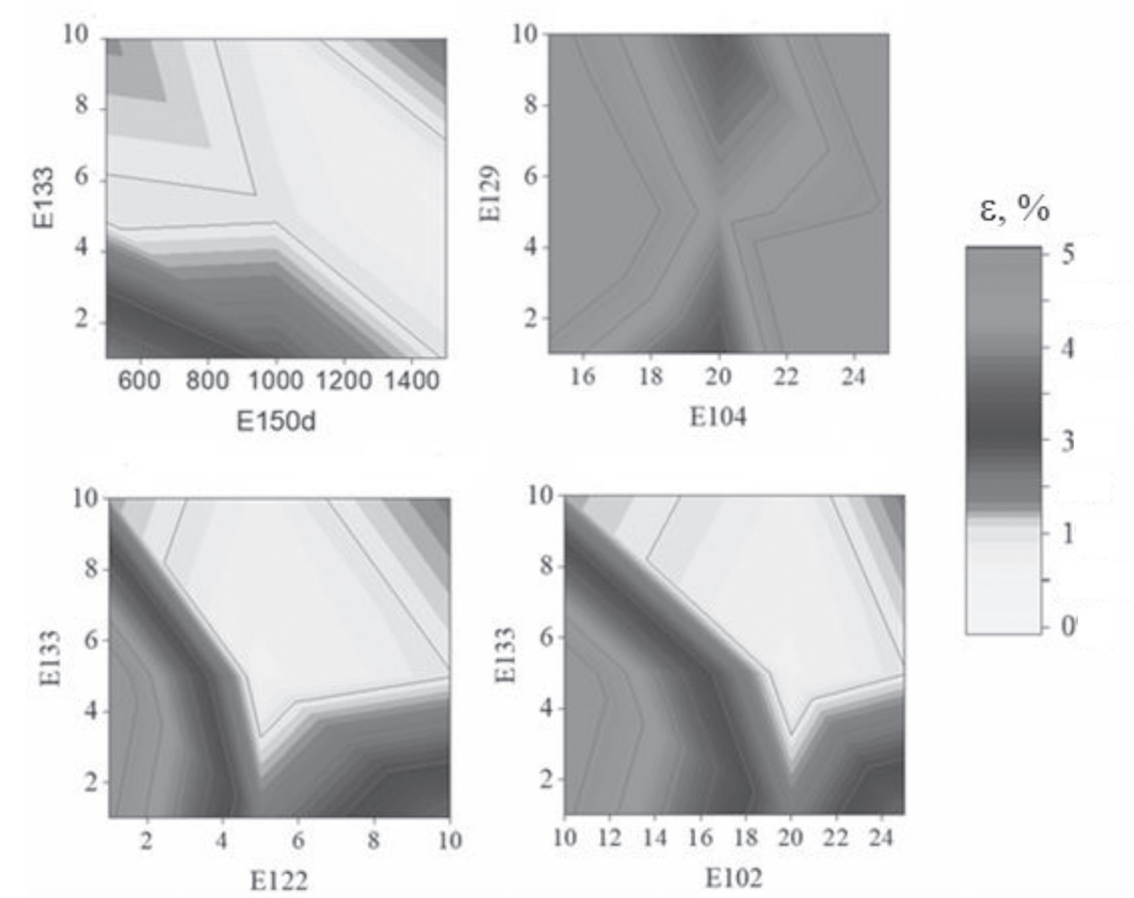


Рис. 3. Тепловые карты относительной погрешности ($\epsilon, \%$) определения пищевых красителей в смеси в зависимости от концентрации, полученные методом спектрофотометрии

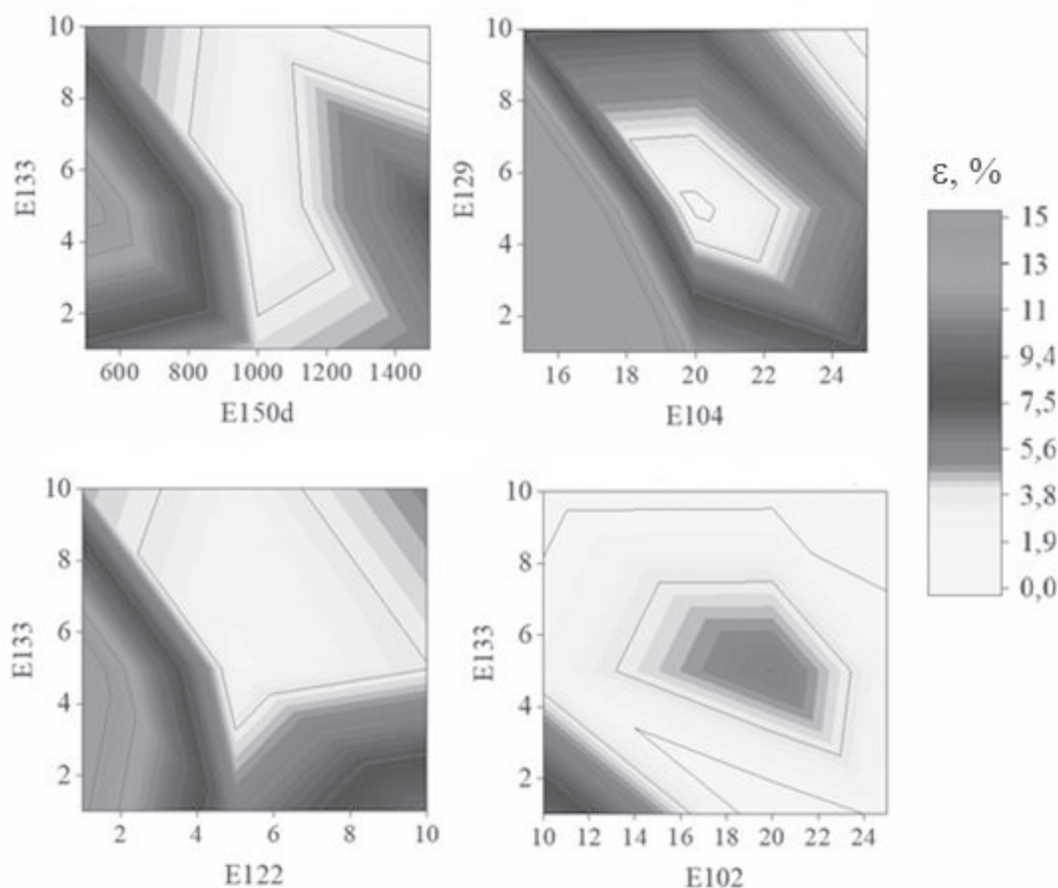


Рис. 4. Тепловые карты относительной погрешности (ϵ , %) определения пищевых красителей в смеси в зависимости от концентрации, полученные методом цифровой цветометрии

разнесены, что позволяет получить высокую точность результатов определения этих аналитов при совместном присутствии.

Заключение

В настоящей работе показана принципиальная возможность проведения одновременного двухкомпонентного анализа растворов красителей методом цифровой цветометрии. Для анализа растворов в 96-луночном микропланшете создан прототип измерительного бокса, позволяющего снизить вклад рассеянного излучения в измеряемый сигнал до уровня циф-

рового шума светочувствительного датчика. Дано обоснование применению регрессионных моделей, позволяющих учесть взаимное влияние цветовых каналов светочувствительного датчика. Предложенный способ отличается технической простотой, доступностью, малым расходом реактивов и экспрессностью. Разработанный подход апробирован при определении синтетических пищевых красителей в газированных напитках. Показано, что метрологические характеристики результатов анализа цветометрическим и фотометрическим методами отличаются незначительно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Capitan-Vallvey L.F., Lopez-Ruiz N., Martinez-Olmos A., Erinas M.M., Palma A.J. // *Anal. Chim. Acta*. 2015. Vol. 899. P. 23–56 (DOI: 10.1016/j.aca.2015.10.009).
2. Апяри В.В., Горбунова М.В., Исаченко А.И., Дмитриенко С.Г., Золотов Ю.А. // *Журн. аналит. химии*. 2017. Т. 72. № 11. С. 963–977 (DOI: 10.7868/S0044450217110019).
3. Моногарова О.В., Осолок К.В., Апяри В.В. // *Журн. аналит. химии*. 2018. Т. 73. № 11. С. 857–867 (DOI: 10.1134/S0044450218110063).
4. Choodum A., Kanatharana P., Wongniramaikul W., Daeid N.N. // *Talanta*. 2013. Vol. 115. P. 143–149 (DOI: 10.1016/j.talanta.2013.04.037).
5. Chung S., Park T.S., Park S.H., Kim J.Y., Park S., Son D., Bae Y.M., Cho S.I. // *Sensors*. 2015. Vol. 15. P. 18197–18208 (DOI: 10.3390/s150818197).

6. Ledesma C.M, Krepsky L.M., Borges E.M. // J. Chem. Educ. 2019. Vol. 96. N 10. P. 2315–2321 (DOI: 10.1021/acs.jchemed.8b01037).
7. Sens da Silva R., Borges E.M. // J. Chem. Educ. 2019. Vol. 96. N 7. P. 1519–1526 (DOI: 10.1021/acs.jchemed.8b00620).
8. Amelin V.G., Shogah Z.A.C., Bolshakov D.S., Tretyakov A.V. // J. Appl. Spectrosc. 2022. Vol. 89. N 1. P. 75–83 (DOI: 10.1007/s10812-022-01328-2).
9. Suslick B.A., Feng L., Suslick K.S. // Anal. Chem. 2010. Vol. 82. P. 2067–2073 (DOI: 10.1021/ac902823w).
10. Monogarova O.V., Chaplenko A.A., Oskolok K.V. // Sensors and Actuators, B: Chemical. 2019. Vol. 299 (DOI: 10.1016/j.snb.2019.126909).
11. Zhang C., Bailey D.P., Suslick K.S. Colorimetric sensor arrays for the analysis of beers: a feasibility study // J. Agric. Food Chem. 2006. Vol. 54. P. 4925–4931 (DOI: 10.1021/jf060110a).
12. Zhang C., Suslick K.S. // J. Agric. Food Chem. 2007. Vol. 55. P. 237–242 (DOI: 10.1021/jf0624695).
13. Feng L., Musto C. J., Kemling J.W., Lim S.H., Zhong W., Suslick K.S. // Anal. Chem. 2010. Vol. 82. T. 22. P. 9433–9440 (DOI: 10.1021/ac1020886).
14. Feng L., Li H., Li X., Chen L., Shen Z., Guan Y. // Anal. Chim. Acta. 2012. Vol. 743. P. 1–8 (DOI: 10.1016/j.aca.2012.06.041).
15. Lamarca R.S., de Lima Gomes P.C.F. // Microchem. J. 2020. Vol. 152. P. 104297–104312 (DOI: 10.1016/j.microsc.2019.104297).
16. Смирнов Е.В. Пищевые красители: справочник. СПб., 2009. 346 с.
17. Брынских Г.Т., Михеева Л.А., Терехина Н.В., Брынских В.Э. // Ульяновский медико-биологический журнал. 2014. № 4. С. 72–75.
18. Санитарные правила и нормы: гигиенические требования по применению пищевых добавок. М., 2007. 273 с.
19. СанПиН 2.3.2.1293-03 Гигиенические требования по применению пищевых добавок. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. 2023. 413 с.
20. ImageJ. <https://imagej.nih.gov/ij/> (дата обращения: 10.12.2024)
21. Image Sensors and Signal Processing for Digital Still Cameras, in J. Nakamura (Eds). CRC Press, Taylor & Francis Group, NW, 2006, 321 p.

Информация об авторах

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

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

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

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

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Соблюдение этических стандартов

В данной работе отсутствуют исследования человека и животных.

Статья поступила в редакцию 28.12.2024;
одобрена после рецензирования 09.01.2025;
принята к публикации 25.03.2025.