

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 543.544

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУКРАЛОЗЫ В КОМБИНИРОВАННЫХ
ПОДСЛАСТИТЕЛЯХ НА КОМПЛЕКСООБРАЗУЮЩЕМ
СОРБЕНТЕ В УСЛОВИЯХ ГИДРОФИЛЬНОЙ ХРОМАТОГРАФИИ**

**Андрей Юрьевич Лаптев, Нина Борисовна Рожманова, Павел Николаевич
Нестеренко**

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический
факультет, Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Андрей Юрьевич Лаптев,
andrey.u.l@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке простого хроматографического способа определения низкого содержания сукралозы в комбинированных подсластителях. Методом жидкостной хроматографии гидрофильных взаимодействий (ЖХГВ) на комплексообразующем сорбенте на основе силикагеля с привитыми группами 2-гидроксиэтилиминодиуксусной кислоты, насыщенного La^{3+} , показана возможность определения низкого содержания сукралозы на фоне 1000-кратного количества эритрита за счет относительного концентрирования в ацетонитриле. Наилучшее разделение сукралозы и эритрита получено при использовании в качестве подвижной фазы смеси ацетонитрила и воды (95:5 об.%). Разработанный способ определения сукралозы ЖХГВ с применением рефрактометрического детектора использован для определения ее в образцах комбинированных подсластителей на основе эритрита. Предел обнаружения сукралозы составляет 28 мкг/мл.

Ключевые слова: жидкостная хроматография гидрофильных взаимодействий, хелатный сорбент, подсластители, эритрит, сукралоза

DOI: 10.55959/MSU0579-9384-2-2025-66-6-493-501

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственных заданий МГУ имени М.В. Ломоносова, регистрационные номера № АААА-А21-121011990019-4 и АААА-А21-121011590089-1.

Для цитирования: Лаптев А.Ю., Рожманова Н.Б., Нестеренко П.Н. Определение сукралозы в комбинированных подсластителях на комплексообразующем сорбенте в условиях гидрофильной хроматографии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2025. Т. 66. № 6. С. 493–501.

ORIGINAL ARTICLE

**DETERMINATION OF SUCRALOSE IN COMBINED SWEETENERS
ON A COMPLEXING SORBENT UNDER CONDITIONS OF HYDROPHILIC
INTERACTION LIQUID CHROMATOGRAPHY**

Andrei Yu. Laptev, Nina B. Rozhmanova, Pavel N. Nesterenko

Lomonosov Moscow State University, Chemistry Department, Moscow, Russia

Corresponding author: Andrei Yu. Laptev, andrey.u.l@mail.ru

Adstract. The article is devoted to the development of a simple chromatographic analysis for the determination artificial sweetener sucralose at low concentrations in combined sweeteners. The method of hydrophilic interaction liquid chromatography

(HILIC) using a silica with immobilized 2-hydroxyethyliminodiacetic acid (HEIDA) groups in La^{3+} form as a stationary phase is developed to determine low concentrations of sucralose in the presence of large excess of erythritol, using a relative preconcentration due to different solubility in acetonitrile. The best separation of sucralose and erythritol was achieved using a acetonitrile:water (95:5 vol.%) mixture as the mobile phase. The refractive index detector was used for quantitative determination of sucralose in combined sweeteners with limit of detection (LOD) of 28 $\mu\text{g/ml}$.

Keywords: hydrophilic interaction liquid chromatography, chelating adsorbent, 2-hydroxyethyliminodiacetic acid, sweeteners, sucralose

Financial Support. The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, registration numbers AAAA-A21-121011990019-4 and AAAA-A21-121011590089-1.

For citation: Laptev A.Yu., Rozhmanova N.B., Nesterenko P.N. Determination of Sucralose in Combined Sweeteners on a Complexing Sorbent under Conditions of Hydrophilic Interaction Liquid Chromatography // Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 2. Khimiya. 2025. T. 66. № 6. S. 493–501.

В настоящее время заменители сахара, известные как подсластители, широко используются производителями продуктов питания. Возможность применения этих добавок в пищевых продуктах имеет ряд преимуществ, включая увеличенный срок годности и сладкий вкус [1]. Подсластители могут быть классифицированы как натуральные и искусственные (в зависимости от их происхождения), калорийные и бескалорийные (исходя из их энергетической ценности), объемные (уровень сладости близок к сахарозе) и интенсивные (во много раз слаще сахарозы), с учетом степени сладости относительно сахарозы [2].

Среди доступных искусственных подсластителей особенно популярны высокоинтенсивные подсластители, такие как ацесульфам калия, адвантам, аспартам, цикламат, неогесперидин дигидрохалкон, неотам, сахарин, сукралоза, тауматин и стевииоловые гликозиды. Наиболее часто применяемыми гликозидами стевииола, обладающими наибольшей подслащивающей способностью, являются стевииозид и ребаудиозид А. Второстепенные гликозиды – дулькозид А, рубузозид и ребаудиозид С, D, E и F [3].

В качестве объемных подсластителей используют альдиты, такие как сорбит, ксилит, лактитол, маннит, эритрит, трегалоза и мальтит. Они представляют собой плохо усваиваемые углеводы, полученные путем гидрогенизации сахара. Одним из самых популярных многоатомных спиртов, используемых в качестве пищевой добавки (E968) и заменителя сахара, является эритрит (рис. 1). Эритрит (четырёхатомный сахарный спирт) широко распространен в природе, а

также встречается в пищевых продуктах, таких как вино, пиво, грибы, виноград и соевый соус [4, 5]. Следует отметить, что в окружающей среде (в растениях) встречается только один изомер – мезоэритрит, а коммерческий эритритол представлен смесью изомеров.

Все подсластители считаются безопасными, если они употребляются в пределах суточной дозы, однако их влияние на организм человека до сих пор изучается [6, 7]. На практике используются комбинации различных подсластителей. Так, в пищевые добавки, содержащие высокоинтенсивные подсластители, добавляют наполнители и дополнительные подсластители, чтобы довести продукт до соответствующего объема и текстуры эквивалентного количества сахара. Однако повышенное содержание некоторых из них может отрицательно влиять на организм человека [8–10].

Что касается здоровья потребителей, то чрезвычайно важно контролировать наличие подсластителей не только в пищевых, но и в фармацевтических продуктах. В настоящее время актуален контроль состава комбинированных подсластителей. Для определения состава подсластителей используют различные методы, такие как газовая хроматография (ГХ) [11], ионообменная хроматография (ИОХ) [12, 13], тонкослойная хроматография (ТСХ) [14], мицеллярная электрокинетическая хроматография (МЭКХ) [15] и капиллярный электрофорез (КЭ) [16].

Среди вышеупомянутых аналитических методов ВЭЖХ является наиболее распространенным методом анализа [17]. Так, для определения подсластителей применяют методы ВЭЖХ, основан-

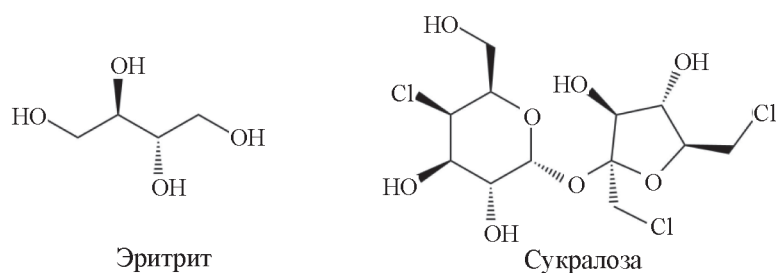


Рис. 1. Структурные формулы сукралозы и эритрита

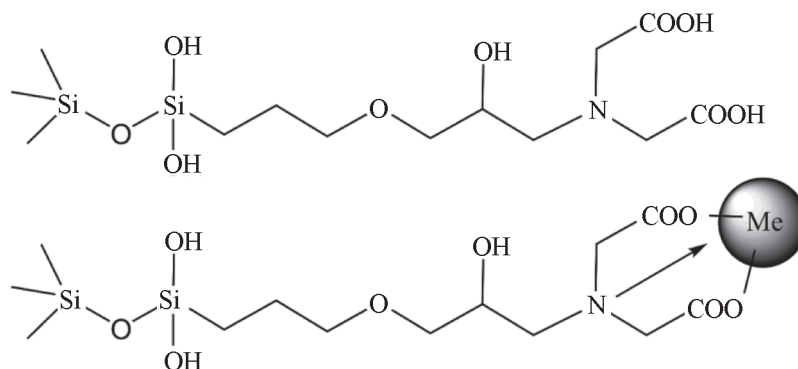


Рис. 2. Комплексообразующий сорбент Диасорб-130-ИДК в свободной форме (H^+ форме) и в форме комплексов с координированным ионом металла

ные на обращенно-фазовой хроматографии (ОФ ВЭЖХ) в сочетании с рефрактометрическим и спектрофотометрическим детекторами, а также с детектором светорассеивания [18–20]. Кроме того, для разделения подсластителей применяют метод ЖХГВ, представляющий собой альтернативный вариант ОФ ВЭЖХ, который позволяет достичь разделения большого количества натуральных и искусственных подсластителей, обладающих высокой гидрофильностью [3, 21–23].

Цель настоящей работы – создание простого экспрессного подхода, позволяющего проводить хроматографическое определение содержания сукралозы на фоне большого количества эритрита в комбинированных подсластителях методом ЖХГВ с рефрактометрическим детектированием при использовании комплексообразующего сорбента на основе силикагеля с привитыми группами ГИДК (рис. 2), насыщенного ионами La^{3+} .

Экспериментальная часть

Реагенты

В работе использовали: эритрит (ООО DopDrops, Россия), сукралозу (ООО Spirulina Food, Китай), комбинированные подсластители «Эритрит со стевией» (ООО Компания

«Сладкий мир») и «Fit Parad» (ООО «Питэко»), ацетат лантана гидрат («Химкрафт», Россия, «х.ч.»), деионизованную воду с сопротивлением 18,2 МОм×см (Портлаб, Россия), ацетонитрил (HPLC gradient grade, Panreac, Германия).

Аппаратура

В работе использовали хроматографическую систему Хроматэк-Кристалл ВЭЖХ 2014 (Россия 2019), снабженную дегазатором подвижной фазы, насосом высокого давления, термостатом, спектрофотометрическим и рефрактометрическим детекторами. Для обработки данных использовали программное обеспечение «Хроматэк Аналитик 3.1». Разделение подсластителей осуществляли на колонке (250×4,0 мм) Диасорб-130-ИДК производства БиоХимМак СТ. Колонка заполнена сорбентом (размер частиц 6 мкм) с привитыми группами ГИДК.

Детектирование осуществляли с помощью рефрактометрического детектора, температура ячейки 35 °С. Все разделения проводили при постоянном расходе подвижной фазы 1,0 мл/мин. В качестве подвижной фазы использовали смесь ацетонитрила и деионизованной воды с сопротивлением 18,2 МОм×см в разных соотношениях

с последующей фильтрацией от пыли и дегазацией с помощью ультразвуковой ванны «Сапфир» (НПФ «Сапфир», Россия), рабочая частота 35 кГц, мощность 60 Вт. Объем вводимой пробы составлял 20 мкл. Температура термостатирования колонки 30 °С.

Для насыщения колонки ионами La^{3+} через нее пропускали 1 мМ раствор ацетата лантана (III) в течение 100 мин, затем промывали деионизованной водой до постоянной базовой линии рефрактометра.

Приготовление образцов для анализа

Стандартный раствор эритрита (2,0 мг/мл) готовили растворением точной навески в смеси ацетонитрила и воды (95:5). Стандартный раствор сукралозы (1,0 мг/мл) готовили растворением точной навески в ацетонитриле. Растворы сукралозы для построения градуировочного графика (0,02; 0,04; 0,06; 0,08; 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1,0 мг/мл) готовили разбавлением стандартного раствора в ацетонитриле.

Для определения содержания сукралозы в комбинированных подсластителях «Эритрит со стевией» и «Fit Parad» использовали метод абсолютной градуировки. Для этого в вials вместимостью 5 мл взвешивали на аналитических весах исследуемый образец смеси подсластителей: 500 мг в случае сахарозаменителя «Эритрит со стевией» и 100 мг в случае сахарозаменителя «Fit Parad», добавляли 5 мл ацетонитрила, закрывали крышкой, тщательно перемешивали в течение нескольких минут, используя лабораторный вортекс, и обрабатывали в ультразвуковой ванне в течение 5 мин. Затем полученный раствор образца комбинированного подсластителя центрифугировали при 2800–3500 об/мин в течение 15 мин для отделения не полностью растворившегося осадка эритрита. Далее отбирали супернатант и разбавляли в два раза. Полученные растворы хранили в холодильнике при (+4) – (+6) °С до проведения анализа.

Результаты и их обсуждение

В качестве объектов исследования были выбраны коммерчески доступные комбинированные подсластители «Эритрит со стевией» (в составе содержатся эритрит, стевиязид сукралоза) и «Fit Parad» (в составе содержатся эритрит, инулин, сукралоза). Разделение и определение компонентов осуществляли методом ЖХГВ на комплексобразующем сорбенте в форме комплексов с координированным ионом La^{3+} .

Сукралоза – дисахарид, состоящий из 1,6-дихлор-1,6-дидезоксифруктозы и 4-хлор-4-дезоксигалактозы, является производным сахарозы. Ее получают из сахарозы за счет замещения трех гидроксильных групп на атомы хлора. В отличие от сахарозы, сукралоза практически не усваивается и выводится из организма почти в неизменном виде, обладает схожими вкусовыми качествами без какого-либо послевкусия и примерно в 600 раз превышает сладость сахарозы [24].

В настоящее время сукралоза занимает значительную долю рынка высокоинтенсивных подсластителей. Ассортимент продуктов с ее использованием шире, чем у большинства других искусственных подсластителей, благодаря физико-химическим свойствам, таким как растворимость в воде и спирте [25]. Это позволяет использовать сукралозу в продуктах на жировой основе и напитках на водной основе, включая алкогольные напитки, в отличие от других распространенных искусственных подсластителей, таких как аспартам, сахарин и ацесульфам К, которые слабо растворимы в спирте и имеют более ограниченное применение в продуктах. Еще одним свойством сукралозы, которое делает ее популярным подсластителем, является отсутствие горького привкуса, который часто присутствует в других высокоинтенсивных подсластителях [24]. Структуры подсластителей представлены на рис. 1.

Удерживание подсластителей

Разделение подсластителей проводили на колонке, заполненной силикагелем с привитыми группами ГИДК. Этот комплексобразующий сорбент (рис. 2) представляет собой силикагель с ковалентно привитыми группами ГИДК, способными образовывать прочные координационные комплексы с переходными и редкоземельными металлами [26, 27]. Ранее сорбенты с такими хелатными функциональными группами использовали в лигандообменной хроматографии (ЛОХ) и металл-хелатной аффинной хроматографии (Immobilized Metal-Affinity Chromatography, IMAC) для разделения аминокислот, пептидов и белков [28–31].

Механизм удерживания в методах ЛОХ и IMAC осуществляется в основном за счет образования специфических координационных связей между связанным с сорбентом металлом и функциональными группами определяемых соединений. Тогда как в предложенном варианте ЖХГВ при использовании сорбента с привитыми

хелатными группами 2-гидроксиэтилиминодиуксусной кислоты (ГИДК) помимо координационного взаимодействия между металлом и определяемым веществом возможны другие межмолекулярные взаимодействия, характерные для ЖХГВ. Авторами настоящей статьи ранее была изучена возможность использования данного сорбента в свободной форме (H^+) и в форме комплексов с различными ионами металлов для разделения углеводов в условиях гидрофильной хроматографии [32]. Показано, что насыщение сорбента ионами La^{3+} увеличило время удерживания сахаров за счет образования комплексов. Ионы La^{3+} способны также ускорять скорость мутаротации сахаров, что в свою очередь улучшает эффективность, разрешение и симметрию пиков по сравнению с другими изученными ионами металлов и сорбентом в свободной форме. На рис. 3 показана хроматограмма модельной смеси девяти углеводов. Способность ионов La^{3+} образовывать прочные комплексы с альдитами позволит добиться лучшего разделения подсластителей.

Возможность разделения сукралозы и эритрита проверяли путем изменения соотношения ацетонитрила и воды в подвижной фазе в изокра-

тическом режиме элюирования. Были исследованы подвижные фазы смеси ацетонитрила и воды (80:20, 90:10, 95:5) со скоростью потока 1 мл/мин. В подвижных фазах с содержанием воды более 5% сукралоза не удерживается и элюирует в пике мертвого времени. В ходе предварительного изучения хроматографического поведения сукралозы и эритрита установлено, что состав подвижной фазы ацетонитрил : вода (95:5 об.%) является оптимальным, поскольку позволяет получить достаточно высокое удерживания сукралозы за разумное время.

В оптимальных условиях получена хроматограмма (рис. 4) пробы комбинированного подсластителя «Эритрит со стевией», содержащего сукралозу, стевиозид и эритрит. Идентификацию компонентов пробы проводили по времени удерживания, которое предварительно определяли путем хроматографического анализа каждого подсластителя в отдельности.

Определение сукралозы в комбинированных подсластителях

В силу того, что сукралоза имеет высокую степень сладости, ее содержание в широко ис-

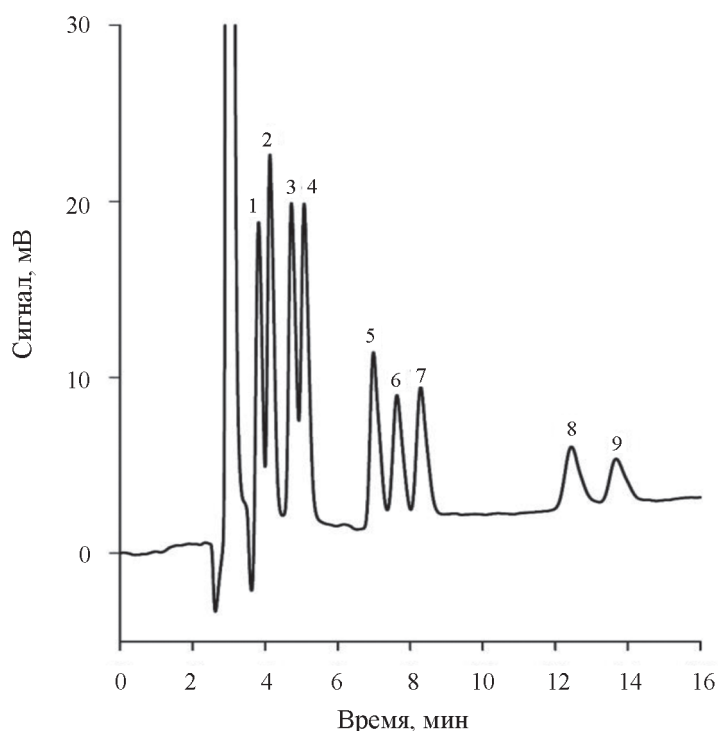


Рис. 3. Хроматограмма модельной смеси углеводов. Колонка - Диасорб-130-ИДК, насыщенная ионами La^{3+} . Элюент – ацетонитрил : 2,5 мМ буферный раствор PIPES, pH 7,0 (82,5:17,5). Температура колонки 80 °С. Рефрактометрическое детектирование (1 – рамноза, 2 – ксилоза, 3 – фруктоза, 4 – глюкоза, 5 – сахароза, 6 – мальтоза, 7 – лактоза, 8 – мальтотриоза, 9 – рафиноза [32])

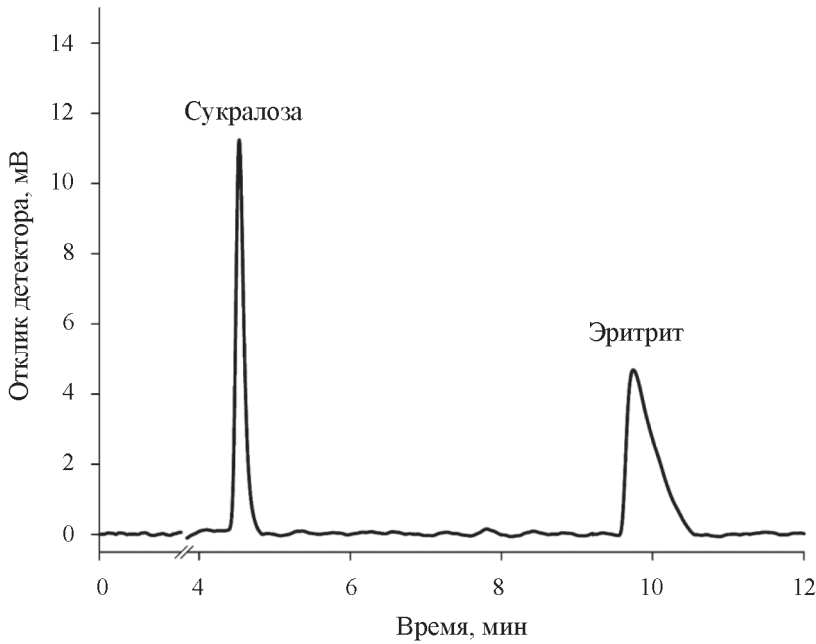


Рис. 4. Хроматограмма 20 мг/мл раствора подсластителя «Fit Parad» в ацетонитриле. Элюент – ацетонитрил : вода (95:5 об.%)

пользуемых комбинированных подсластителях весьма мало по сравнению с другими подсластителями, например эритритом. Так, в исследованных комбинированных подсластителях «Эритрит со стевией» и «Fit Parad» производители не заявляют процентное содержание каждого из подсластителей, однако указано, что данные смеси обладают сладостью, превышающей сладость сахара в 3 и 5 раз соответственно. Таким образом, на основании величины относительной сладости сукралозы и эритрита к сахарозе можно предположить, что в этих подсластителях содержание эритрита будет составлять более 96 мас. %.

Кроме того, сукралоза слабо поглощает в УФ-свете, что затрудняет ее детектирование. Молекула сукралозы ($\log P = -0,51$ [33]) более гидрофоб-

на, чем молекулы эритрита ($\log P = -2,29$ [34]), что открывает возможность проведения относительного концентрирования сукралозы в образцах комбинированных подсластителей, содержащих большое количество эритрита (1000-кратный избыток по отношению к сукралозе), путем перевода в ацетонитрильные растворы. В отличие от сукралозы, растворимость эритрита в чистом ацетонитриле ограничена [35, 36], что приводит к уменьшению соотношения этих компонентов в анализируемых пробах. Предложен способ относительного концентрирования в пробах микроколичеств сукралозы, необходимых для ее определения на фоне больших избыточных количеств эритрита в комбинированных подсластителях. Правильность предложенного подхода проверили методом «введено-найденно» с добавками сукра-

Т а б л и ц а 1

Результаты определения сукралозы ($n = 3, P = 0,95$)

Определяемое вещество	Комбинированный подсластитель	Найдено, мг/мл	Концентрация вводимой добавки № 1, мг/мл	Концентрация вводимой добавки № 2, мг/мл	Найденное содержание с добавкой № 1, мг/мл	Найденное содержание с добавкой № 2, мг/мл
Сукралоза	«Эритрит со стевией»	0,12±0,01	0,04	0,06	0,15±0,01	0,17±0,01
	«Fit Parad»	0,21±0,01	0,04	0,06	0,25±0,01	0,27±0,01

Т а б л и ц а 2

Содержание сукралозы в исследуемых образцах (*n* = 3, *P* = 0,95)

Определяемое вещество	Сукралоза	
Комбинированный подсластитель	«Эритрит со стевией»	«Fit Parad»
Найдено, мас. %	0,20 ± 0,03	2,1 ± 0,1

лозы (табл. 1). На рис. 4 представлена хроматограмма ацетонитрильного раствора комбинированного подсластителя «Эритрит со стевией».

На основании хроматограмм растворов с разными содержаниями подсластителей были измерены значения соответствующих площадей пиков сукралозы и построены градуировочные зависимости от концентрации сукралозы. Искомую концентрацию сукралозы находили с помощью метода абсолютной градуировки. Из уравнения градуировочного графика (рис. 5) было рассчитано содержание сукралозы. Диапазон линейности градуировочного графика 0,02–1,00 мг/мл. Предел обнаружения, рассчитанный по 3 σ -критерию, ра-

вен 28 мкг/мл. Результаты определения сукралозы в комбинированных подсластителях «Эритрит со стевией» и «Fit Parad» представлены в табл. 2.

Таким образом, разработан простой хроматографический способ определения низкого содержания сукралозы в комбинированных подсластителях, содержащих 1000-кратные избытки эритрита по отношению к сукралозе. Способ заключается в относительном концентрировании путем растворения проб в ацетонитриле и последующего ее разделения на колонке с комплексообразующим сорбентом Диасорб-130-ИДК в форме комплексов с координированным ионом лантана при рефрактометрическом детектировании.

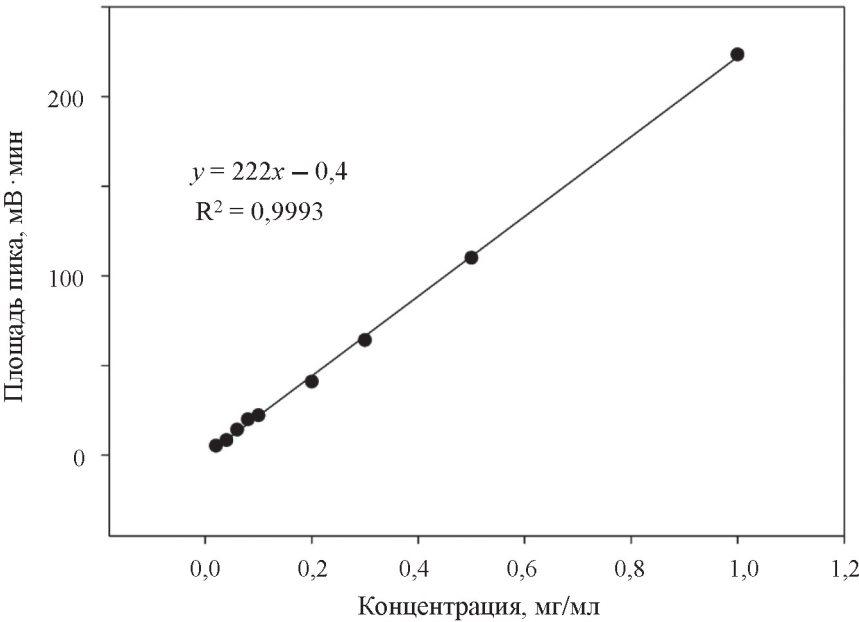


Рис. 5. Градуировочная зависимость для определения сукралозы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chen L., Zhang Y., Zhou Y., Shi D., Feng X.-s. // Food Chem. 2023. Vol. 408. P. 135248.

2. Merillon J.-M., Ramawat K.G. // Sweeteners - pharmacology, biotechnology & applications. Springer. 2018. P. 1..

3. Kubica P., Namieśnik J., Wasik A. // J. Pharm. Biomed. Anal. 2016. Vol. 127. P. 184.
4. Arrigoni E., Brouns F., Amadò R. // British Journal of Nutrition. 2007. Vol. 94. P. 643.
5. Lin S.-D., Hwang C.-F., Yeh C.-H. // J. Food Sci. 2003. Vol. 68. P. 2107.
6. Rodriguez Furlán L.T., Campderrós M.E. // International Journal of Gastronomy and Food Science. 2017. Vol. 10. P. 16.
7. Mooradian A.D., Smith M., Tokuda M. // Clinical Nutrition ESPEN. 2017. Vol. 18. P. 1.
8. Shearer J., Swithers S.E. // Reviews in Endocrine and Metabolic Disorders. 2016. Vol. 17. P. 179.
9. Moriconi E., Feraco A., Marzolla V., Infante M., Lombardo M., Fabbri A., Caprio M. // Frontiers in Endocrinology. 2020. Vol. 11. P. 444.
10. Hong E., Lee S.Y., Jeong J.Y., Park J.M., Kim B.H., Kwon K., Chun H.S. // J. Sci. Food Agric. 2017. Vol. 97. P. 3877.
11. Hashemi M., Habibi A., Jahanshahi N. // Food Chem. 2011. Vol. 124. P. 1258.
12. Лаптев А.Ю., Рожманова Н.Б., Севко А.В., Нестеренко П.Н. // Ж. аналит. химии. 2025. Т. 80. № 1. С. 95.
13. Zhu Y., Guo Y., Ye M., James F.S. // J. Chromatogr. A. 2005. Vol. 1085. P. 143.
14. Morlock G.E., Meyer S., Zimmermann B.F., Roussel J.-M. // J. Chromatogr. A. 2014. Vol. 1350. P. 102.
15. Frazier R.A., Inns E.L., Dossi N., Ames J.M., Nursten H.E. // J. Chromatogr. A. 2000. Vol. 876. P. 213.
16. Vistuba J.P., Dolzan M.D., Vitali L., de Oliveira M.A.L., Mücke G.A. // J. Chromatogr. A. 2015. Vol. 1396. P. 148.
17. Oktavirina V., Prabawati N.B., Fathimah R.N., Palma M., Kurnia K.A., Darmawan N., Yulianto B., Setyaningsih W. // Molecules. 2021. Vol. 26. P. 3135.
18. Zygler A., Wasik A., Kot-Wasik A., Namieśnik J. // Anal. Bioanal. Chem. 2011. Vol. 400. P. 2159.
19. Ferrer I., Zweigenbaum J.A., Thurman E.M. // Anal. Chem. 2013. Vol. 85. P. 9581.
20. Нестеренко П.Н., Савельев В.И. // Ж. аналит. химии. 1990. Т. 45. № 6. С. 1134.
21. Hutchinson J.P., Remenyi T.A., Nesterenko P.N., Farrell W., Groeber E., Szucs R., Dicinoski G.W., Haddad P.R. // Anal. Chim. Acta. 2012. Vol. 750. P. 199.
22. Kokotou M.G., Thomaidis N.S. // Anal. Methods. 2013. Vol. 5. P. 3825.
23. Захарова А.М., Гринштейн И.Л., Карцова Л.А. // Ж. аналит. химии. 2013. Т. 68. С. 1208.
24. Lewis K., Tzilivakis J. // EFSA Supporting Publications. 2021. Vol. 18. P. 6918E.
25. Li X., Du Z., Huang X., Yuan W., Ying H. // J. Chem. Eng. Data. 2010. Vol. 55. P. 2600.
26. Nesterenko P., Jones P. // J. Liq. Chromatogr. Relat. Technol. 1996. Vol. 19. P. 1033.
27. Нестеренко П.Н., Шпигун О.А. // Координационная химия. 2002. Т. 28. № 10. С. 772.
28. Paunovic I., Schulin R., Nowack B. // J. Chromatogr. 2005. Vol. 1100. P. 176.
29. Luo Q., Zou H., Xiao X., Guo Z., Kong L., Mao X. // J. Chromatogr. A. 2001. Vol. 926. P. 255.
30. Ren D., Penner N.A., Slentz B.E., Inerowicz H.D., Rybalko M., Regnier F.E. // J. Chromatogr. 2004. Vol. 1031. P. 87.
31. Pero-Gascon R., Giménez E., Sanz-Nebot V., Benavente F. // Microchem. J. 2020. Vol. 157. 105013.
32. Laptev A.Y., Rozhmanova N.B., Nesterenko P.N. // J. Chromatogr. A. 2024. Vol. 1714. P. 464551.
33. Jenner M.R., Smithson A. // J. Food Sci. 1989. Vol. 54. P. 1646.
34. Программное обеспечение и база данных US EPA, KOWWIN доступна по ссылке <http://www.Epa.Gov/oppt/exposure/pubs/episuite.htm>. (дата обращения: 28.02.2025).
35. de Brito Cardoso G., Souza I.N., Mourão T., Freire M.G., Soares C.M.F., Lima Á.S. // Separation and Purification Technology. 2014. Vol. 124. P. 5460.
36. Adachi S., Nagae K., Matsuno R. // Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic. 1999. Vol. 6. P. 21.

Информация об авторах

Андрей Юрьевич Лаптев – аспирант кафедры аналитической химии химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (andrey.u.l@mail.ru);

Нина Борисовна Рожманова – доцент кафедры аналитической химии химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, канд. хим. наук (nb.rozhmanova@mail.ru);

Павел Николаевич Нестеренко – вед. науч. сотр., профессор кафедры физической химии химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, докт. хим. наук (p.nesterenko@phys.chem.msu.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 10.03.2025;
одобрена после рецензирования 16.04.2024;
принята к публикации 25.05.2025.