

<https://doi.org/10.47370/2072-0920-2024-20-1-50-62>

УДК 664.34:547.15:543.426.1

© 2024



Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interests

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL ARTICLE

Адаптация метода идентификации и количественного определения моно- и диацилглицеринов в растительных маслах

Дмитрий Д. Жданов, Елена А. Бутина*, Ирина А. Дубровская,
Евгений О. Герасименко, Аслан Ю. Шаззо

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»,
Россия, 350072, г. Краснодар, ул. Московская 2 Г

Аннотация. Работа посвящена исследованиям по адаптации и внедрению метода определения моно- и диацилглицеринов в растительных маслах. Актуальность исследований определяется введением с 2025 года нормирования монохлорпропандиолов и глицидола в растительных маслах и некоторых видах масложировой продукции. По данным научной литературы моно- и диацилглицерины, образующиеся в период созревания масличных семян под воздействием фермента – липазы, являются прекурсорами монохлорпропандиолов и глицидола, которые, в свою очередь, по данным Всемирной организации здравоохранения, относятся к канцерогенным веществам. Рассмотрены некоторые наиболее вероятные механизмы образования контаминантов из моно- и диацилглицеринов, исходя из которых основным источником глицидоловых эфиров являются диацилглицерины, а источником монохлорпропандиолов – моноацилглицерины. Важным фактором, влияющим на скорость и полноту протекания описанных реакций, является присутствие в системе молекул воды, ионов хлора, протонов водорода, а также высокие температуры. Катализаторами таких побочных реакций являются тяжелые металлы, в том числе их соли. Таким образом, для реализации эффективных мероприятий по контролю образования контаминантов в масле важно иметь полную картину показателей качества исходного сырья и, прежде всего, данные по содержанию моно- и диацилглицеринов, методы определения которых в лабораторной практике РФ отсутствуют.

Целью работы является разработка метода для количественного определения моно- и диацилглицеринов в растительных маслах.

В результате исследований усовершенствована методика подготовки проб, определены калибровочные зависимости с применением внутреннего стандарта, предложена методика идентификации и количественного анализа, основанная на использовании метода газовой хроматографии с пламенно-ионизационным детектором и применением высокотемпературной капиллярной колонки. Проведены работы по верификации и определены метрологические характеристики предлагаемого метода. Метод апробирован на реальных объектах – различных видах растительных масел.

Ключевые слова: моноацилглицерины, диацилглицерины, растительное масло, идентификация, количественный анализ, газовая хроматография, пламенно-ионизационный детектор, пробоподготовка, адаптация методики

Благодарности

Исследования выполнены в рамках госзадания Минобрнауки РФ,
проект № FZEZ-2023-0004.

Для цитирования: Жданов Д.Д., Бутина Е.А., Дубровская И.А. и др. Адаптация метода идентификации и количественного определения моно- и диацилглицеринов в растительных маслах. *Новые технологии / New technologies*. 2024; 20(1): <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2024-20-1-50-62>

Adaptation of the method for identification and quantification of mono- and diacylglycerols in vegetable oils

Dmitry D. Zhdanov, Elena A. Butina*, Irina A. Dubrovskaya,
Evgeniy O. Gerasimenko, Aslan Y. Shazzo

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Kuban State Technological University»,
Russia, 350072, Krasnodar, 2 G Moskovskaya str.

Abstract. The article presents the research on the adaptation and implementation of a method for determining mono- and diacylglycerols in vegetable oils. The relevance of the research is determined by the introduction of standardization of monochloropropanediols and glycidol in vegetable oils and some types of fat and oil products since 2025. According to the scientific literature, mono- and diacylglycerols, formed during the ripening of oil seeds under the influence of the enzyme lipase, are precursors of monochloropropanediols and glycidol, which, in turn, according to the World Health Organization, are carcinogenic substances. Some of the most probable mechanisms for the formation of contaminants from mono- and diacylglycerols have been considered; according to them diacylglycerols are considered to be the main source of glycidyl ethers, and monoacylglycerols are that of monochloropropanediols. An important factor influencing the speed and completeness of the described reactions is the presence in the system of water molecules, chlorine ions, hydrogen protons, as well as high temperatures. Catalysts for such side reactions are heavy metals, including their salts. Thus, in order to implement effective measures to control the formation of contaminants in oil, it is important to have a complete picture of the quality indicators of the feedstock and, above all, data on the content of mono- and diacylglycerols, methods for determining which are not available in laboratory practice in the Russian Federation.

The goal of the research is to develop a method for the quantitative determination of mono- and diacylglycerols in vegetable oils.

As a result of the research, the sample preparation method has been improved, calibration dependencies have been determined using an internal standard, and an identification and quantitative analysis technique has been proposed, on the basis of gas chromatography with a flame ionization detector and the use of a high-temperature capillary column. Verification work has been carried out and the metrological characteristics of the proposed method have been determined. The method has been tested on real objects – various types of vegetable oils.

Keywords: monoacylglycerols, diacylglycerols, vegetable oil, identification, quantitative analysis, gas chromatography, flame ionization detector, sample preparation, method adaptation

Acknowledgments

The research was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, project No. FZEZ-2023-0004.

For citation: Zhdanov D.D., Butina E.A., Dubrovskaya I.A. et al. Adaptation of the method for identification and quantitative determination of mono- and diacylglycerols in vegetable oils. *Novye tehnologii / New technologies*. 2024; 20(1): <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2024-20-1-50-62>

Введение. Известно, что в масличном сырье глицидиловые эфиры (ГЭ) и сложные эфиры монохлорпропандиолов (МХПДЭ), являющихся новыми загрязнителями, отсутствуют, однако в нем находятся предполагаемые прекурсоры (предшественники) этих соединений [1–3].

По данным различных исследований, одними из основных прекурсоров, как ГЭ, так и МХПДЭ, являются моно- и диацилглицерины [4–6]. Моно- и диацилглицерины являются эндогенными компонентами липидов масличных семян. Их образование происходит в период созревания масличных семян в результате протекания ферментативных процессов: фермент липаза расщепляет триглицериды жирных кислот до диацилглицеридов (ДАГ) и моноацилглицеридов (МАГ).

Достоверные механизмы образования МХПДЭ и ГЭ до настоящего времени не установлены. По данным одних исследователей, моноацилглицерины являются наиболее активными потенциальными

предшественниками образования МХПДЭ в растительных маслах [7]. Однако другими исследователями было обнаружено, что присутствие диацилглицеринов в большей степени влияет на образование и накопление МХПДЭ, чем присутствие моноацилглицеринов [8]. Несмотря на это, считается, что одним из основных технологических факторов, инициирующих этот процесс, является повышенная (более 150°C) температура [9, 10].

Одним из вариантов образования эфиров монохлорпропандиолов является предположение о том, что в результате внутримолекулярной перегруппировки моноацилглицеридов в присутствии ионов водорода и молекул воды происходит образование промежуточного циклического иона ацилоксония [11]. В результате последующего раскрытия цикла ионом хлора и его присоединением во втором или третьем положении атома углерода глицеринового остатка происходит образование МХПДЭ. Схема протекающих реакций представлена на рис. 1.

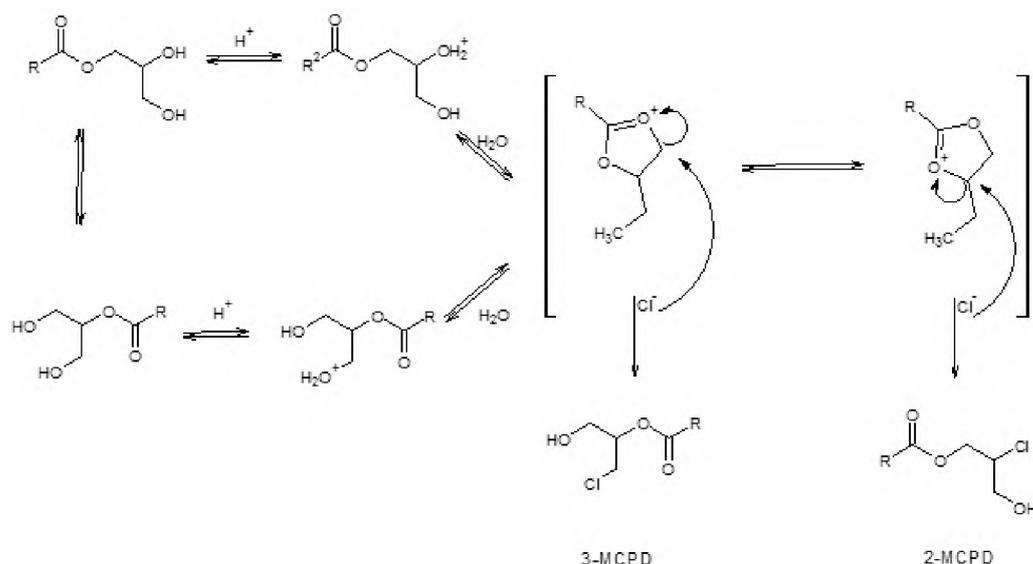


Рис. 1. Возможные механизмы образования МХПД из 1- и 2-моноацилглицеринов [11]

Fig. 1. Possible mechanisms for the formation of MCPD from 1- and 2-monoacylglycerols [11]

Образование глицидиловых эфиров из диацилглицеридов также может происходить при высоких температурах путем внутримолекулярной перегруппировки с последующим удалением жирных кислот. Удаление жирной кислоты из диацилглицеридов может быть инициировано отрывом протона гидроксильной группы вицинальной карбоксильной группой.

Образующийся ацилоксоний – промежуточное соединение, затем перегруппируется за счет миграции заряда, что приводит к высвобождению жирной кислоты. Затем образуется оксирановое кольцо в результате нуклеофильной реакции алкоксидной группы (см. рис. 2). Теоретически такая реакция может происходить как с 1,2-, так и с 1,3-диацилглицеридом [12].

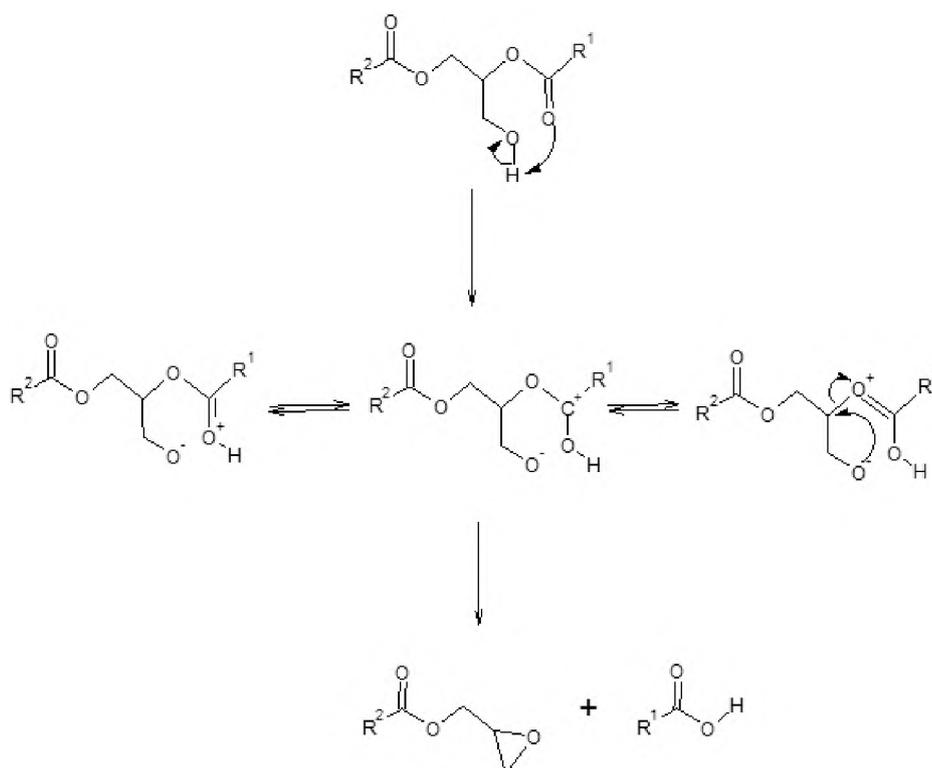


Рис. 2. Возможный механизм образования глицидилового эфира из диацилглицерина при высоких температурах [12]

Fig. 2. Possible mechanism for the formation of glycidyl ether from diacylglycerol at high temperatures [12]

Исходя из предполагаемых механизмов, определение содержания моно- и диацилглицеринов в исходном сырье позволяет с высокой долей вероятности прогнозировать качество конечной продукции по таким важным показателям, как концентрация контаминантов – МХПДЭ и ГЭ, обладающих токсичными и генотоксичными свойствами [13, 14].

Таким образом, с целью разработки эффективных мероприятий по снижению

содержания МХПДЭ и ГЭ в масложировой продукции производителям необходимо контролировать содержание наиболее вероятных прекурсоров в исходном сырье – нерафинированных растительных масла.

До возникновения данной проблемы количественное определение остаточных количеств моно-, диацилглицеридов, а также свободного глицерина в основном являлось предметом исследования процессов получения метиловых эфиров жирных

кислот, применяемых в качестве замены дизельного топлива [15]. Соответственно, используемые методы были разработаны для данного вида продукции или отдельных конкретных видов продуктов переработки растительных масел и жиров [16, 17]. С учетом вышеизложенного, в настоящее время требуется универсальный метод для определения моно- и диацилглицеринов в широком спектре масло-жировой продукции с применением достаточно распространенного в лабораториях РФ аналитического оборудования – газовых хроматографов (ГХ) с капиллярной колонкой и пламенно-ионизационными детекторами.

Таким образом, учитывая, что в РФ отсутствуют стандартизированные методы количественного определения моно- и диацилглицеринов, актуальным является проведение экспериментальных исследований с целью адаптации наиболее эффективных методик идентификации и количественного определения этих веществ в растительных маслах.

При проведении исследований решали следующие задачи:

- построение калибровочной зависимости применительно к имеющемуся аналитическому оборудованию;
- разработка методики пробоподготовки;
- адаптация метода идентификации и количественного определения моно- и диацилглицеринов в растительных маслах с использованием ГХ;
- верификация и определение метрологических характеристик;
- апробация метода на реальных образцах растительных масел

Объекты и методы исследований. В качестве объектов исследований использовали следующие растительные масла: подсолнечные рафинированное и нерафинированное, рыжиковое, соевое; два вида пальмового рафинированного дезодорированного отбеленного масла и три вида переэтерифицированного жира на основе тропических масел. Все образцы масел и

жиров были взяты из коллекции Испытательного центра ФГБОУ ВО «КубГТУ», составленной из проб продукции отечественных и зарубежных производителей, поступающих на испытания.

В качестве стандартных образцов использовали 1,2-диолеоилглицерол ($\geq 97\%$) и 1-моноолеоилглицерол ($\geq 97\%$), приобретенные у фирмы Sigma-Aldrich. В качестве внутреннего стандарта использовали трикаприн ($\geq 98\%$), также приобретенный у фирмы Sigma-Aldrich.

Хроматографический анализ осуществляли на газовом хроматографе – «Хроматэк-Кристалл 5000.2» при следующих условиях:

- объем пробы: 1 мкл
- колонка капиллярная – ZB-1, длина 15 м, диаметр – 0,32 мм, толщина неподвижной фазы 1 мкм.
- программирование температуры колонки: начальная температура 50°C, выдержка – 2 мин; нагрев со скоростью 15 град/мин до 180°C, выдержка – 2 мин; нагрев со скоростью 7 град/мин до 230°C, выдержка – 2 мин; нагрев со скоростью 7 град/мин до 300°C, выдержка – 10 мин; нагрев со скоростью 15 град/мин до 370°C, выдержка – 5 мин.
- пламенно-ионизационный детектор (ПИД), температура 380°C, расход водорода 25 мл/мин, расход воздуха 250 мл/мин.
- испаритель, температура 330°C, деление потока 1:30.
- газ-носитель – гелий, давление – 80 кПа [18].

Результат обрабатывали посредством программного обеспечения для хроматографии «Аналитик 3.1».

Исследования проводились на оборудовании ЦКП «Исследовательский центр пищевых и химических технологий» ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» (СКР_3111), развитие которого осуществляется при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение № 075-15-2021-679).

Результаты исследований и их обсуждение. При проведении исследований в качестве базовой была выбрана методика, регламентированная ГОСТ Р ЕН 14105-2008 «Производные жиров и масел. Метилловые эфиры жирных кислот, определение содержания свободного и общего глицерина, моно-, ди-, триглицеридов (метод сравнения)». Данный стандарт был разработан для количественного определения свободного и общего глицерина, моно-, ди-, триглицеридов, содержащихся в метиловых эфирах жирных кислот (FAME), предназначенных для использования в качестве добавки к минеральным маслам.

На первом этапе исследования нами были построены градуировочные графики с использованием стандартных образцов моно- (МАГ) и диацилглицеринов (ДАГ).

Для получения градуировочного графика готовили 4 калибровочных раствора смеси стандартов следующим образом: в четыре стеклянные пробирки микрошприцем вносили исходные растворы

моноолеина в пиридине концентрацией 5 мг/мл, объемом 50, 120, 190, 250 мкл и исходные растворы диолеина в пиридине концентрацией 5 мг/мл, объемом 10, 40, 70, 100 мкл.

Также в каждую пробирку вносили по 100 мкл внутреннего стандарта (трикаприн) концентрацией 5 мг/мл и 100 мкл силирующего агента – N-Метил-N-(триметилсилил)трифторацетамид (MSTFA). Полученные реакционные смеси выдерживали 15 минут при температуре $23 \pm 2^\circ\text{C}$, после чего в каждый из них добавляли по 8 мл н-гептана.

Калибровочные растворы вводили в хроматограф в объеме по 1 мкл. Каждый раствор анализировали дважды. На основе результатов анализа строили калибровочные графики для каждого определяемого вещества, откладывая по оси X отношение площади пика стандарта к площади пика внутреннего стандарта, по оси Y – отношение массы стандарта к массе внутреннего стандарта (см. рис. 3–4).

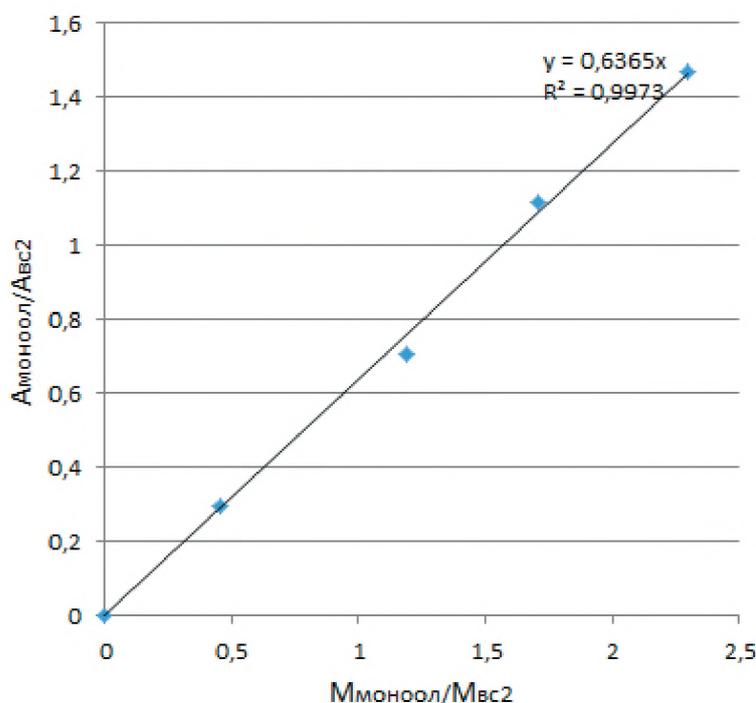


Рис. 3. Калибровочная кривая для количественного расчета моноацилглицеринов

Fig. 3. Calibration curve for quantitative calculation of monoacylglycerols

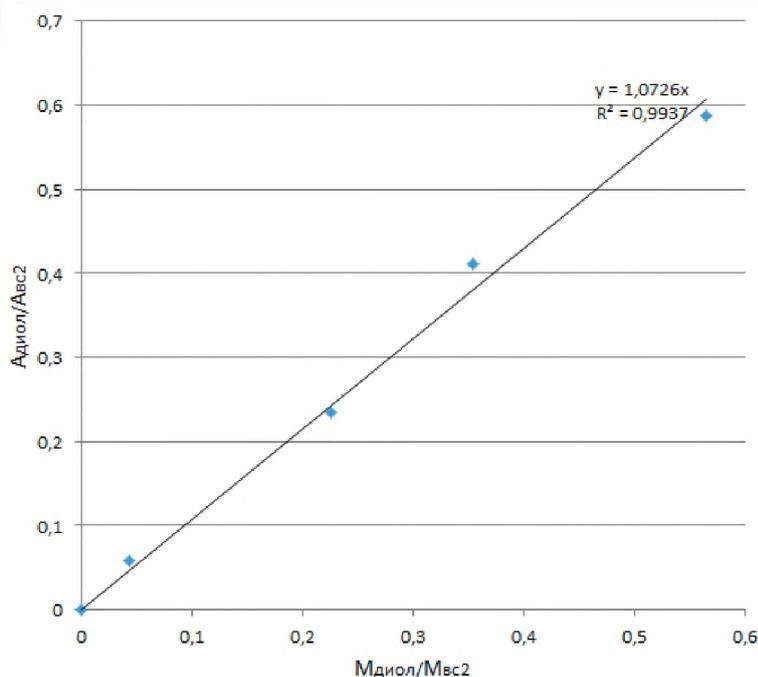


Рис. 4. Калибровочная кривая для количественного расчета диацилглицеринов

Fig. 4. Calibration curve for quantitative calculation of diacylglycerols

Из полученных калибровочных графиков определяли константы регрессионной зависимости a , b , где a – тангенс угла наклона, b – точка пересечения с осью Y . Адекватность полученных зависимостей оценивали по коэффициенту корреляции (R^2), значение которого должно быть не менее 0,95.

На втором этапе исследований разрабатывали методику подготовки пробы.

Отбирали навески образцов масла массой от 100 до 110 мг (с точностью до 0,01 мг) в стеклянные пробирки объемом 10 мл, куда затем добавляли 100 мкл рабочего раствора внутреннего стандарта – трикаприн в пиридине, концентрацией 5,0 мг/мл и 100 мкл MSTFA. Следует отметить, что необходимо избегать попадания влаги в реакционные смеси, так как наличие воды мешает преобразованию спиртов в TMS-производные. Учитывая это, рекомендуется использовать безводный пиридин. Полученную смесь выдерживали в течение 15 минут при температуре $23 \pm 2^\circ\text{C}$, затем добавляли 8 мл n -гептана и перемешивали.

Анализировали по 1 мкл реакционной

смеси методом газовой хроматографии с пламенно-ионизационным детектором при указанных условиях.

Концентрацию массовой доли моно- и диацилглицеринов рассчитывали по формуле:

$$X = [a(A_x/A_{ст}) + b](M_{ст}/M_x)100, \quad (1)$$

где X – массовая доля определяемого компонента в образце, % масс.;

A_x – площадь пика определяемого компонента;

$A_{ст}$ – площадь пика внутреннего стандарта;

$M_{ст}$ – масса внутреннего стандарта, мг;

M_x – масса навески образца, мг;

a – константа регрессионной зависимости, равная тангенсу угла наклона калибровочной прямой;

b – константа регрессионной зависимости, равная точке пересечения калибровочной прямой с осью Y .

На рис. 5–6 приведены типичные хроматограммы, полученные при определении МАГ и ДАГ в анализируемых образцах.

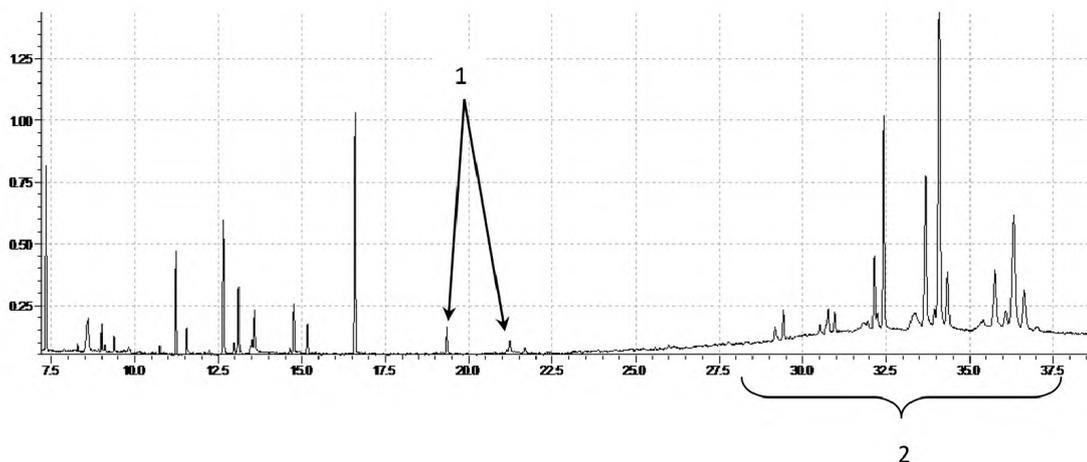


Рис. 5. Типичная хроматограмма пальмового масла: 1 – пики МАГ, 2 – пики ДАГ

Fig. 5. Typical palm oil chromatogram: 1 – MAG peaks, 2 – DAG peaks

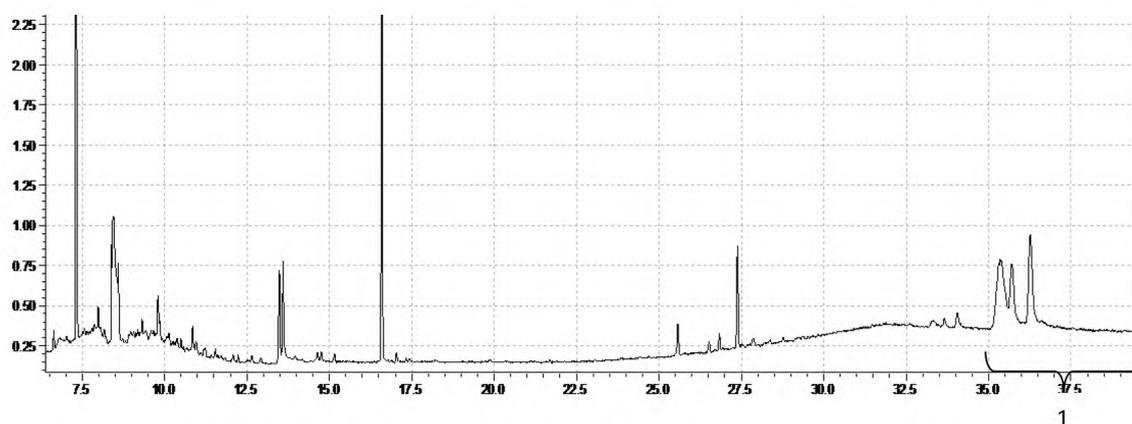


Рис. 6. Типичная хроматограмма подсолнечного рафинированного масла: 1 – пики ДАГ.

Fig. 6. Typical chromatogram of refined sunflower oil: 1 – DAG peaks.

Как видно на представленных хроматограммах, моно- и диацилглицерины элюируются в зонах свободных от мешающих компонентов (жирные кислоты, воск и т. д.), что значительно упрощает идентификацию и повышает точность метода. Кроме того, в отличие от образцов метиловых эфиров жирных кислот (FAME), произведенных из кокосового и пальмового масел, для которых данный метод не пригоден согласно ГОСТ РЕН 14105-2008 из-за перекрывания пиков, для образцов пальмового и кокосового масел, анализируемых предлагаемым

методом, такое ограничение отсутствует, так как время выхода основной массы относительно легкокипящих компонентов меньше, чем у дипальмитатов и монопальмитатов.

Верификацию, включающую оценку метрологических характеристик, осуществляли в соответствии с требованиями РМГ 76-2014 [19]. Установлено, что диапазон измерений как моно-, так и диацилглицеринов составляет от 0,05% до 5,0%. Результаты оценки относительной погрешности предлагаемого метода представлены в таблице 1.

Таблица 1

Относительная погрешность метода

Table 1

Relative error of the method

Диапазон концентраций, %	Относительная погрешность метода Δ, %	
	ДАГ	МАГ
0,05–0,5	10	15
0,5–1	5	8
1–5	3	5

Представленные данные свидетельствуют о том, что предлагаемый метод обладает достаточно высокой чувствительностью и точностью.

С использованием предлагаемого метода были проанализированы образцы растительных масел. Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты анализа образцов растительных масел

Table 2

The results of the analysis of vegetable oil samples

Наименование образца	Содержание компонентов, % масс.	
	МАГ	ДАГ
Масло подсолнечное рафинированное дезодорированное «Первый сорт»	Менее 0,05	0,89±0,04
Масло подсолнечное нерафинированное	Менее 0,05	0,98±0,05
Масло рыжиковое нерафинированное	0,13±0,02	Менее 0,004
Масло соевое нерафинированное	Менее 0,05	0,66±0,03
Масло пальмовое рафинированное дезодорированное отбеленное (Образец 1)	0,07±0,01	3,06±0,31
Масло пальмовое рафинированное дезодорированное отбеленное (Образец 2)	0,05±0,01	2,29±0,23
Жир пальмовый перэтерифицированный (Образец 3)	0,14±0,02	3,17±0,30
Жир пальмовый перэтерифицированный (Образец 4)	0,14±0,02	2,68±0,27
Жир пальмовый перэтерифицированный (Образец 5)	0,07±0,01	2,85±0,29

Полученные данные соответствуют литературным данным [20]. Это, а также высокая сходимости дают сделать вывод о том, что предлагаемая методика позволяет получать данные, адекватно характеризующие содержание моно- и

диацилглицеринов в растительных маслах и жирах.

Учитывая достаточную простоту и доступность предлагаемого метода, можно сделать вывод, что он может быть внедрен в практику не только исследовательских,

но и производственных лабораторий для определения содержания сульфорафана в продовольственном сырье – брокколи и других овощах и частях растений семейства капустных, пищевых и биологически активных добавках.

Выводы. В результате проведенного исследования предложена методика идентификации и количественного определения МАГ и ДАГ в масличном растительном сырье, основанная на использовании метода газовой хроматографии с пламенно-ионизационным детектором. В результате вери-

фикации определен диапазон измерений (от 0,05 до 5,0%) и относительные погрешности, значения которых для МАГ не превышают 10% и для ДАГ 15%. Метод апробирован на реальных объектах различных маслах и жирах растительного происхождения. Метод может быть рекомендован для использования в исследовательских и производственных лабораториях, оснащенных необходимым оборудованием для контроля уровня МАГ и ДАГ в масличном сырье и корректировки технологических процессов на производстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Моргунова Е., Бабодей В, Пчельникова А. Глицидиловые эфиры жирных кислот. Мировой тренд в безопасности продуктов питания. Наука, питание и здоровье: сборник научных трудов. Минск: Белорусская наука; 2021: 400-407.
2. Chen H., Tsao C.H., Chang Y.H. et al. Occurrence of thermally induced glycidyl esters and 3-monochloropropane-1,2-diol esters in refined oils and pressed oils manufactured by different processes and associated with human health risks in Taiwan. *Food chemistry*. 2021; 360: 130053.
3. Cheng W.W., Liu G.Q., Wang L.Q. et al. Glycidyl fatty acid esters in refined edible oils: a review on formation, occurrence, analysis, and elimination methods. *Comp. Reviews in Food Sc. and Food Saf.* 2017; 16: 263-281.
4. Далабаев А.Б., Альжаскина Н.Е. Контроль содержания глицидиловых эфиров в масло-жировой продукции: вызов современности. Инновационные процессы в пищевых технологиях: наука и практика: материалы Международной научно-практической конференции (Москва, 16-17 февр. 2023 г.). М.; 2023: 168.
5. Changxia Sun, Ni Wu, Shunli Kou et al. Occurrence, formation mechanism, detection methods, and removal approaches for chloropropanols and their esters in food: An updated systematic review. *Food Chemistry: X* 17. 2023; 100529: 1-10.
6. Wenzl T., Lachenmeier D.W., Gkmen, V. Analysis of heat-induced contaminants (acrylamide, chloropropanols and furan) in carbohydrate-rich food. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2007; 389(1): 119-137.
7. Shimizu M., Vosmann K., Matthus B. Generation of 3-monochloro-1,2-propanediol and related materials from tri-, di-, and mono-olein at deodorization temperature. *European Journal of Lipid Science and Technology*. 2012; 114(11): 1268-1273.
8. Smidrkal J., Tesarova M., Hradkova I. Mechanism of formation of 3-chloropropan-1,2-diol (3-MCPD) esters under conditions of the vegetable oil refining. *Food Chemistry*. 2016; 211: 124-129.
9. Yu H.W., Muhamad H., Abas F. et al. Effects of temperature and NaCl on the formation of 3-MCPD esters and glycidyl esters in refined, bleached and deodorized palm olein during deep-fat frying of potato chips. *Food Chemistry*. 2017; 219: 126-130.
10. Rahn A., Yaylayan V.A. Thermal degradation of sucralose and its potential in generating chloropropanols in the presence of glycerol. *Food Chemistry*. 2010; 118(1): 56-61.
11. Hamlet C.G., Sadd P.A., Gray D.A. Generation of monochloropropanediols (MCPDs) in model dough systems. 1. Leavened doughs. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2004; 52(7): 2059-2066.
12. Destailats F. et al. Glycidyl esters in refined palm (*Elaeis guineensis*) oil and related fractions. Part I: Formation mechanism. *Food Chemistry*. 2012; 131(4): 1391-1398.

13. IARC (World Health Organization: International Agency for Research on Cancer) Glycidol IARC monographs on the evaluation of the carcinogenic risk of chemicals to humans. 2000; 77: 469-486.
14. Sawada S. et al. Proteomic analysis of 3-MCPD and 3-MCPD dipalmitate toxicity in rat testis. Food Chem. Toxicol. 2015; 83: 84-92.
15. Plank C., Lorbeer E. Simultaneous determination of glycerol, and mono-, di- and triglycerides in vegetable oil methyl esters by capillary gas chromatography. Journal of chromatography A. 1995; 697(1/2): 461-468.
16. Goh E.M., Timms R.E. Determination of mono- and diglycerides in palm oil, olein and stearin. Journal of the American Oil Chemists' Society. 1985; 62(4): 730-734.
17. Соколова Е.В., Султанова Я.М., Ахметова Т.И. Определение моноглицеридов и свободного глицерина в товарном продукте «Моностеарат глицерина» [Электронный ресурс]. Вестник Казанского технологического университета. 2016; 24. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-monoglitseridov-i-svobodnogo-glitserina-v-tovarnom-produkte-monostearat-glitserina> (дата обращения: 12.12.2023).
18. McNair H.M., Miller J.M., Snow N.H. Basic gas chromatography. John Wiley & Sons, 2019.
19. РМГ 61-2010 Государственная система обеспечения единства измерений. Показатели точности, правильности, прецизионности методик количественного химического анализа. Методы оценки. М.: Стандартинформ; 2013.
20. Риски для здоровья человека, связанные с наличием 3- и 2-моноклорпропандиолов, их эфиров жирных кислот и глицеридовых эфиров жирных кислот в пищевых продуктах. Масла и жиры. 2018; 7/8: 9.

REFERENCES:

1. Morgunova E., Babodey V, Pchelnikova A. Glycidyl esters of fatty acids. Global trend in food safety. Science, nutrition and health: a collection of scientific papers. Minsk: Belarusian Science; 2021: 400-407. [in Russian]
2. Chen H., Tsao C.H., Chang Y.H. et al. Occurrence of thermally induced glycidyl esters and 3-monochloropropane-1,2-diol esters in refined oils and pressed oils manufactured by different processes and associated with human health risks in Taiwan. Food chemistry. 2021; 360:130053.
3. Cheng W.W., Liu G.Q., Wang L.Q. et al. Glycidyl fatty acid esters in refined edible oils: a review on formation, occurrence, analysis, and elimination methods. Comp. Reviews in Food Sc. and, Food Saf. 2017; 16: 263-281.
4. Dalabaev A.B., Alzhaskina N.E. Control of glycidyl ether content in fat and oil products: a modern challenge. Innovative processes in food technologies: science and practice: materials of the International Scientific and Practical Conference (Moscow, February 16-17, 2023). M.; 2023: 168. [in Russian]
5. Changxia Sun, Ni Wu, Shunli Kou et al. Occurrence, formation mechanism, detection methods, and removal approaches for chloropropanols and their esters in food: An updated systematic review. Food Chemistry: X 17. 2023; 100529: 1-10.
6. Wenzl T., Lachenmeier D.W., Gkmen, V. Analysis of heat-induced contaminants (acrylamide, chloropropanols and furan) in carbohydrate-rich food. Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2007; 389(1): 119-137.
7. Shimizu M., Vosmann K., Matthus B. Generation of 3-monochloro-1,2-propanediol and related materials from tri-, di-, and mono-olein at deodorization temperature. European Journal of Lipid Science and Technology. 2012; 114(11): 1268-1273.
8. Smidrkal J., Tesarova M., Hradkova I. Mechanism of formation of 3-chloropropan-1,2-diol (3-MCPD) esters under conditions of the vegetable oil refining. Food Chemistry. 2016; 211: 124-129.
9. Yu H.W., Muhamad H., Abas F. et al. Effects of temperature and NaCl on the formation of 3-MCPD esters and glycidyl esters in refined, bleached and deodorized palm olein during deep-fat frying of potato chips. Food Chemistry. 2017; 219: 126-130.

10. Rahn A., Yaylayan V.A. Thermal degradation of sucralose and its potential in generating chloropropanols in the presence of glycerol. *Food Chemistry*. 2010; 118(1): 56-61.
11. Hamlet C.G., Sadd P.A., Gray D.A. Generation of monochloropropanediols (MCPDs) in model dough systems. 1. Leavened doughs. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2004; 52(7): 2059-2066.
12. Destailats F. et al. Glycidyl esters in refined palm (*Elaeis guineensis*) oil and related fractions. Part I: Formation mechanism. *Food Chemistry*. 2012; 131(4): 1391-1398.
13. IARC (World Health Organization: International Agency for Research on Cancer) Glycidol IARC monographs on the evaluation of the carcinogenic risk of chemicals to humans. 2000; 77: 469-486.
14. Sawada S. et al. Proteomic analysis of 3-MCPD and 3-MCPD dipalmitate toxicity in rat testis. *Food Chem. Toxicol.* 2015; 83: 84-92.
15. Plank C., Lorbeer E. Simultaneous determination of glycerol, and mono-, di- and triglycerides in vegetable oil methyl esters by capillary gas chromatography. *Journal of chromatography A*. 1995; 697(1/2): 461-468.
16. Goh E.M., Timms R.E. Determination of mono- and diglycerides in palm oil, olein and stearin. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 1985; 62(4): 730-734.
17. Sokolova E.V., Sultanova Y.M., Akhmetova T.I. Determination of monoglycerides and free glycerol in the commercial product «Glycerol monostearate» [Electronic resource]. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2016; 24. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-monoglitseridov-i-svobodnogo-glitserina-v-tovarnom-produkte-monostearat-glitserina> (date of access: 12.12.2023). [in Russian]
18. McNair H.M., Miller J.M., Snow N.H. *Basic gas chromatography*. John Wiley & Sons, 2019.
19. RMG 61-2010 State system for ensuring the uniformity of measurements. Indicators of accuracy, correctness of precision of methods of quantitative chemical analysis. Assessment methods. M.: Standartinform; 2013. [in Russian]
20. Risks to human health associated with the presence of 3- and 2-monochloropropanediols, their fatty acid esters and fatty acid glycidyl esters in foods. *Oils and fats*. 2018; 7/8: 9. [in Russian]

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Дмитриевич Жданов, ведущий инженер, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»

Dmitry D. Zhdanov, Leading engineer, FSBEI HE «Kuban State Technological University»

Елена Александровна Бутина, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»
butina_elen@mail.ru

Elena A. Butina, Dr Sci (Eng.), Professor, FSBEI HE «Kuban State Technological University»
butina_elen@mail.ru

Ирина Александровна Дубровская, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»

Irina A. Dubrovskaya, PhD (Eng.), Associate Professor, FSBEI HE «Kuban State Technological University»

Евгений Олегович Герасименко, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»

Evgeniy O. Gerasimenko, Dr Sci (Eng.), Professor, FSBEI HE «Kuban State Technological University»

Аслан Юсуфович Шаззо, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»

Aslan Yu. Shazzo, Dr Sci (Eng.), Professor, FSBEI HE «Kuban State Technological University»

Заявленный вклад соавторов

Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Claimed contribution of co-authors

All authors of the research were directly involved in the design, execution, and analysis of the research. All authors of this article have read and approved the final version submitted.

Поступила в редакцию 11.12.2023; поступила после рецензирования 21.02.2024; принята к публикации 23.02.2024

Received 11.12.2023; Revised 21.02.2024; Accepted 23.02.2024