

О. В. НЄМІРІЧ

кандидат технічних наук,
доцент кафедри технології ресторанної і аюрведичної продукції
Національний університет харчових технологій
ORCID: 0009-0005-3479-1466

Д. Б. РАХМЕТОВ

доктор сільськогосподарських наук, професор,
член-кореспондент Національної академії наук України,
завідувач відділу культурної флори
Національний ботанічний сад імені М. М. Гришка
Національної академії наук
ORCID: 0000-0001-7260-3263

Р. Ю. ДОРОШКЕВИЧ

аспірант кафедри технології ресторанної і аюрведичної продукції
Національний університет харчових технологій
ORCID: 0009-0009-8009-2542

ФІТОХІМІЧНИЙ ПРОФІЛЬ ЛЕТКИХ СПОЛУК НАСІННЯ NIGELLA ТА ЙОГО ЗНАЧЕННЯ ДЛЯ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

У статті представлено результати дослідження фітохімічного профілю летких сполук насіння представників роду *Nigella* з акцентом на чорнушку посівну (*Nigella sativa* L.), яка відома своєю цінністю як лікарська та харчова рослина. Чорнушка посівна здавна використовується у народній медицині та харчовій промисловості завдяки унікальному складу біологічно активних компонентів, серед яких особливе місце займає тимохінон – ключова біоактивна сполука ефірної олії з вираженими антиоксидантними, протизапальними та імуномодуючими властивостями. У науковій літературі зазначається, що якісний і кількісний склад летких компонентів *Nigella sativa* може варіювати залежно від сорту, умов вирощування та технології обробки сировини, що зумовлює актуальність проведеного дослідження.

Метою роботи було здійснення якісного та кількісного визначення летких речовин насіння чорнушки за допомогою методу газової хроматографії, а також проведення порівняльного аналізу хімічного складу насіння різних видів і сортів роду *Nigella*. У ході експерименту було ідентифіковано понад 30 летких компонентів, серед яких домінують представники класів моно- та сесквітерпенів, що формують характерний ароматичний та функціональний профіль рослини. Встановлено, що найбільш насичений та різноманітний склад летких сполук притаманний чорнушці посівній сорту «Айсу», яка може розглядатися як перспективний об'єкт подальших досліджень і селекційної роботи.

Отримані результати підтверджують, що насіння *Nigella sativa* є високopersпективною сировиною для створення нових харчових продуктів функціонального призначення, нутрицевтичних засобів та фармацевтичних препаратів. Висока концентрація біологічно активних речовин в олії чорнушки відкриває можливості для її використання як джерела природних антиоксидантів і ароматичних добавок у харчовій промисловості, а також як складової комплексних лікарських і профілактичних засобів.

Ключові слова: *Nigella sativa*, чорнушка посівна, ефірна олія, тимохінон, газова хроматографія, леткі речовини, біоактивні компоненти.

O. V. NEMIRICH

PhD in Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Restaurant
and Ayurvedic Products Technology
National University of Food Technologies
ORCID: 0009-0005-3479-1466

D. B. RAKHMETOV

Doctor of Agricultural Sciences, Professor,
Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Head of the Department of Cultural Flora
M. M. Gryshko National Botanical Garden
of National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0000-0001-7260-3263

R. YU. DOROSHKVYCH

Postgraduate Student at the Department of Restaurant
and Ayurvedic Products Technology
National University of Food Technologies
ORCID: 0009-0009-8009-2542

PHYTOCHEMICAL PROFILE OF VOLATILE COMPOUNDS OF NIGELLA SEEDS AND ITS SIGNIFICANCE FOR THE FOOD INDUSTRY

The article presents the results of a study on the phytochemical profile of volatile compounds in seeds of the genus Nigella, with particular emphasis on black cumin (Nigella sativa L.), known for its value as a medicinal and food plant. Nigella sativa has long been used in traditional medicine and the food industry due to its unique composition of biologically active substances, among which thymoquinone occupies a special place. Thymoquinone is recognized as the key bioactive compound of the essential oil, exhibiting pronounced antioxidant, anti-inflammatory, and immunomodulatory properties. According to the scientific literature, the qualitative and quantitative composition of volatile constituents in Nigella sativa can vary significantly depending on cultivar, growing conditions, and processing methods, which highlights the relevance of the present research.

The aim of the study was to perform qualitative and quantitative determination of volatile compounds in Nigella seeds using gas chromatography, as well as to carry out a comparative analysis of the chemical composition of seeds from different species and cultivars. More than 30 volatile constituents were identified, with monoterpenes and sesquiterpenes being the dominant groups that form the characteristic aromatic and functional profile of the plant. It was found that the most saturated and diverse volatile composition was characteristic of Nigella sativa cultivar "Aisu," which can be considered a promising object for further investigation and breeding.

The obtained results confirm that Nigella sativa seeds represent a valuable raw material for the development of new functional food products, nutraceuticals, and pharmaceutical preparations. The high concentration of bioactive compounds in black cumin oil provides opportunities for its application as a source of natural antioxidants and aromatic additives in the food industry, as well as a component of complex therapeutic and preventive remedies.

Key words: *Nigella sativa, black cumin, essential oil, thymoquinone, gas chromatography, volatile compounds, bioactive components.*

Постановка проблеми

Харчова промисловість потребує нових джерел природних біоактивних речовин, здатних підвищувати якість і функціональну цінність продукції. Рослини роду *Nigella*, зокрема чорнушка посівна (*Nigella sativa* L.), вирізняються високим вмістом ефірної олії та комплексу летких сполук, які зумовлюють її лікувально-профілактичні властивості. Серед них особливу роль відіграє тимохінон, що проявляє антиоксидантну, протизапальну й імуномодулюючу активність.

Попри значну кількість робіт, присвячених дослідженню чорнушки, бракує систематизованих даних щодо якісного й кількісного складу летких компонентів насіння різних сортів. Недостатньо також вивчено, як ці сполуки впливають на формування властивостей харчових продуктів і перспективність використання чорнушки у нутрицевтиці.

Таким чином, актуальною науковою задачею є визначення фітохімічного профілю летких речовин *Nigella sativa* з метою обґрунтування можливостей її застосування у харчовій промисловості та фармацевтичній практиці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Фітохімічний склад насіння *Nigella sativa* активно досліджується у харчовій технології та фармакології. Встановлено, що ефірна олія чорнушки є джерелом летких компонентів, серед яких провідним є тимохінон з вираженою антиоксидантною та протизапальною активністю [7]. Також ідентифіковано р-цимен, α - та β -пінен, карвакрол, анетол, сапоніни, стерини та фенольні сполуки [16, 27].

Дослідження показують, що географічне походження та умови вирощування впливають на якісний і кількісний профіль летких речовин [19]. Водночас сучасні публікації підкреслюють перспективи використання чорнушки у створенні нутрицевтиків і функціональних продуктів харчування [6, 28].

Незважаючи на значну кількість наукових робіт, особливості складу летких речовин різних сортів *Nigella sativa* та їхній вплив на якість харчових продуктів вивчені недостатньо, що обґрунтовує потребу подальших досліджень із застосуванням газової хроматографії.

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження провести якісну та кількісну оцінку летких сполук різних видів чорнушки (*Nigella*) за допомогою газової хроматографії з метою визначення їх хімічного складу, порівняння профілів біологічно активних компонентів та обґрунтування перспектив використання насіння як цінної сировини для харчової, фармацевтичної та нутрицевтичної промисловості.

Викладення основного матеріалу дослідження

Чорнушка [1, 2] (*Nigella* L.) – рід однорічних трав'янистих рослин родини жовтецевих (Ranunculaceae). Відомо близько 20 видів, у тому числі в Україні зустрічається 3 види. Крім того, 2 середземноморські види використовуються як культурні рослини:

Чорнушка посівна (*N. sativa* L.) використовують як пряність в хлібопекарській промисловості, при квашенні капусти та солінні огірків та кавунів, вона приємного пряного присмаку. Насіння чорнушки містить стероїди: кампестерин, ситостерин, стигмастерин, холестерин, а-спінастерин; алкалоїд нігелін, ефірну олію (0,46–1,4 %), тритерпенові сапоніни, кумарини, тимохінон, фермент ліпазу і жирну олію (30,8–44,2 %), у складі якої є олеїнова (48,76 %), лінолева (37,56 %), міристинова, пальмітинова, стеаринова, ліноленова, ейкозадієнова і петрозелінова кислоти.

Чорнушка дамаська (*N. damascena* L.) – декоративна рослина, містить ефірну олію яку використовують в парфумерії. В листі цього виду міститься до 430 мг% вітаміну С.

Усі види чорнушок декоративні та відмінні медоноси.

Чорнушка відома своїми лікарськими властивостями. В народній медицині з чорнушки готують чай та застосовують його як сечогінний, жовчогінний, глистогінний, шлунковий засіб. Насіння чорнушки використовують для лікування захворювань шкіри, для підвищення секреції молочних залоз у матерів-годувальниць. Давно було помічено, що ті молоді мами, які вживають чорнушку, мають вдосталь молока, щоб вигодувати немовлят. Добре впливає чорнушка на регуляцію серцевого ритму, уповільнюючи його.

У народній медицині застосовується як протипухлинний засіб. Також відомо, що чорнушка має протирадіаційні властивості.

Найбільш розповсюджені види чорнушки:

- *Nigella arvensis* L. – Чорнушка польова
- *Nigella carpatha* Strid
- *Nigella damascena* L. – Чорнушка дамаська
- *Nigella degenii* Vierh.
- *Nigella elata* Boiss.
- *Nigella fumariifolia* Kotschy
- *Nigella glandulifera* Freyn & Sint.
- *Nigella hispanica* L.
- *Nigella latisecta* P.H. Davis
- *Nigella nigellastrum* (L.) Willk.
- *Nigella orientalis* L.
- *Nigella oxypetala* Boiss.
- *Nigella papillosa* G.López
- *Nigella sativa* L. – Чорнушка посівна
- *Nigella segetalis* M.Bieb.
- *Nigella stricta* Strid
- *Nigella unguicularis* (Poir) Spenn.

Чорнушка посівна (*Nigella sativa*) [1], або чорнушка сійнар [2], або кмин чорний походить з Південно-Західної Азії та Середземномор'я. У дикому вигляді росте у Середземномор'ї, на Балканському півострові, на Кавказі, у Малій Азії. В Україні росте повсюдно, вирощують на городах і в садах як декоративну та пряну рослину.

Насіння має інсектицидні властивості, його застосовують для захисту одягу від пошкодження мілью.

Ефірна олія придатна в їжу, також вона використовується у миловарінні та парфумерії.

Насіння калінджі має гострий гіркий смак та запах, використовується в основному при виробництві кондитерських виробів та напоїв. Також часто його застосовують як чорний перець, однак перевага чорного кмину в тому, що він не подразнює слизову оболонку шлунку.

Насіння використовують як прянощі при засолюванні огірків, кавунів, квашенні капусти, а також як приправу в кулінарії.

Як спеції традиційно використовується у єгипетській кухні, а також у арабських країнах та в Індії [3].

Насіння містить тригліцериди (до 44 %), глікозид мелантин, ефірну олію (0,8–1,5 %). У листках чорнушки посівної міститься до 0,43 % аскорбінової кислоти.

Ефірна олія являє собою рідину жовтого кольору з гострим пряним запахом. Хімічний склад вивчений недостатньо, ймовірно присутня в ній сполука терпенового ряду – мелантол.

Максимальна поживна цінність чорного кмину пояснюється наявністю в ньому значної кількості рослинного білка, клітковини, мінеральних речовин і вітамінів. Поживний склад, отриманий з різних джерел, показав 20–85 % білка, 38,20 % жиру, 7–94 % клітковини та 31,94 % вуглеводів. Серед різних ідентифікованих амінокислот глутамат, аргінін і аспартат, тоді як цистеїн і 12 метіонін були основними і другорядними амінокислотами відповідно. Насіння чорного кмину також містить значні рівні заліза, міді, цинку, фосфору, кальцію, тіаміну, ніацину, піридоксину та фолієвої кислоти [5]. Крім того, фітохімічні аналізи *Nigella sativa* показали наявність понад сотні фітокомпонентів, які включають в основному алкалоїди, сапоніни, стерини та ефірну олію, але склад багатьох із них не був хімічно визнаний і не підтверджений біологічно. Насіння *Nigella sativa* містить 26–34 % нелеткої олії, з яких основними жирними кислотами є лінолева кислота (64,6 %) і пальмітинова кислота (20,4 %). Олія насіння складається з 0,4 %–2,5 % ефірної олії [6]. Серед різних активних компонентів, про які повідомлялося досі, тимохінон, який є основним компонентом ефірної олії, є найбільш біоактивною сполукою та демонструє широкий спектр терапевтичних переваг [7]. У літературі повідомлялося про декілька біоактивних сполук із насіння *Nigella sativa*, серед них найважливішими біоактивними є тимохінони. Інші основні фітохімічні речовини, про які повідомляється з різних *Nigella sativa*, включають стерини та сапоніни, фенольні сполуки, алкалоїди, нові ліпідні компоненти та жирні кислоти, а також леткі олії різного складу [8]. Склад ефірної олії (0,4–0,45 %), про який повідомляється в різних дослідженнях, представляє близько сорока різних сполук, серед яких виявлено велику кількість п-цимоллімонен, карвон, тимохінон (TQ), тимогідрохінон (THQ), дитимохінон, карвакрол і β -пінен з різною концентрацією [9, 11]. Кількість найбільш важливого біологічно активного компонента, тимохінону, присутнього в леткій олії, виділеній різними методами екстракції з насіння *Nigella sativa*, змінювалася в широкому діапазоні: з використанням SC-CO₂ (1,06, 4,07 мг/г) [34] і екстракцією Сокслета (2940,43 мг/кг) [35] та (8,8 мг/г) олії [36]. Склад жирних кислот насіння *Nigella sativa* (32–40 %), як повідомляється різними авторами, містить в основному лінолеву, ліноленову, олеїнову, пальмітолеїнову, пальмітинову кислоти разом з арахідоновою, 13 ейкозадієновою, стеариновою та міристиновою кислотами [12, 14]. Новий дієноат і два відомих моноєфіру разом із новими ліпідами були виділені з неомиленого екстракту насіння, а саме метилнонадека-15,17дієноат, пентилгексадек-12-єноат і пентилпентадек-11-єноат [15]. Фітостероли є важливою частиною раціону людини і набувають все більшого інтересу через їх нутрицевтичну та лікувальну користь у зниженні рівня ліпопротеїнів низької щільності та загального холестерину [16]. Фітостероли також важливі як характерні сполуки для оцінки якості рослинних олій і маркування харчових продуктів. За оцінками різних дослідників, загальний вміст стеролів в олії насіння чорного кмину становить від 18 до 42 % неомиленої речовини. Основними ідентифікованими стеринами були β -ситостерин, кампестерол, стигмастерол і 5-авенастерол [15, 17]. Токофероли демонструють привабливий потенціал поглинання вільних радикалів, які, як вважають, припиняють перекисне окислення ліпідів [18]. Загальний вміст токоферолу в олії чорного кмину в різних кількостях, отриманих з різних джерел, коливався від 9,15 до 27,92 мг/100 г. Серед основних токоферолів, які містяться в насінні чорного кмину, добре відомі α - і γ -токоферол і β -токотрієнол [15].

Чорнушка цінна своїм насінням. Воно має гострий перцевий смак і мускатний запах, оскільки містить у собі ефірні олії [36]. Основними складовими насіння чорнушки є: 15 амінокислот, полісахариди і моносахариди, ненасичені і насичені жирні кислоти (лінолева, олеїнова, стеаринова, пальмітинова), 17 фосфоліпіди, фітостероли (β -ситостерол (48,35–51,92 %), 5-авенастерол, кампестерол, стигмастерол), макроелементи (кальцій, калій, фосфор, натрій), мікроелементи (нікель, марганець, селен, цинк, залізо, мідь), вітаміни E, D, C, групи B (B1, B2, B3, B6, B9), каротиноїди, дубильні речовини, алкалоїди (магнофлорин), токофероли (α -токоферол 1,70–4,12 мг/100 г; β -токоферол 4,90–17,91 мг/100 г; γ -токоферол 0,97–4,51 мг/100 г), флавоноїди, ефірні олії (1,3–4 %), сапоніни, ензими [14, 15].

Олія з насіння чорнушки – це зеленувато-коричнева рідина, яка має гострий пряний аромат, а також для неї є характерним дуже терпкий смак. Цій олії притаманні висока біологічна і поживна цінність, оскільки вона містить понад 100 різних компонентів у своєму складі, половина з них виступає каталізаторами обмінних процесів, які проходять в організмі людини [14].

Основні компоненти хімічного складу олії чорного кмину: від 0,4 до 0,45 % маси насіння чорнушки посівної займає ефірна олія. Вона містить наступні компоненти: тимохінон – 30,6–82,4 %, р-цимен – 13,6–33,8 %; лімонен – 1,6–3,4 %, карвакрол – 1,4–5,1 %, карвон – 2,9 %; 4-терпинеол – 0,6–5,6 %, α -пінен – 2,7–12,2 %, β -пінен – 1,6–3,5 %, т-анетол – 0,2–19,4 %. До того ж у ефірній олії утворюється тимохінгідрон, складовими якого є тимохінон та гідрохінон. Ці сполуки володіють антиоксидантними властивостями [13, 16, 17].

Основна відмінність хімічного складу ефірної олії чорнушки посівної та чорнушки дамаської полягає у тому, що чорнушка дамаська містить алкалоїд дамасценін, який відсутній у чорнушці посівній. У той же час леткий екстракт чорнушки дамаської не містить тимохінону, одного з активних компонентів чорнушки посівної [17].

Вивчення хімічного складу олії чорнушки показало, що вона багата жирними кислотами, перелік яких представлений у таблиці 1. Встановлено також наявність у олії з насіння чорного кмину гліцерину, селінену, бензойної, фенілоцтової, гептадеценової, маргароолеїнової кислот.

Аналізуючи таблицю, слід зазначити, що регіон вирощування значною мірою впливає на жирнокислотний склад насіння чорнушки. Значення певних жирних кислот у різних регіонах значно різняться. Це підтверджує залежність якісного та кількісного складу біоактивних компонентів від ґрунтово-кліматичних умов.

Олія з насіння чорнушки також містить велику кількість фітостеролів. В організмі людини вони беруть участь у синтезі жовчних кислот, гормонів, а також провітаміну D. Фітостероли відомі своєю здатністю зменшувати в крові вміст холестерину та цукру, а також бактерицидною, протизапальною та імуностимулюючою діями. Фітостероли застосовують як складові компонентів різних лікарських препаратів, які призначені для профілактики та лікування серцево-судинних, ендокринних захворювань, захворювань передміхурової залози [14].

Таблиця 1

Жирнокислотний склад олії з насіння чорнушки

Найменування кислоти	Вміст у олії чорного кмину, %						
	Туніс	Іран	Індія	Україна	Болгарія	Туреччина	Марокко
Пальмітинова	17,2 ± 0,15	18,4 ± 0,25	9,68	9,66–13,7	10,60	10,1–12,5	17,1 ± 0,1
Пальмітолеїнова	1,15 ± 0,05	0,78 ± 0,25		4,20	4,20		0,2 ± 0,1
Лінолева	50,31 ± 0,25	49,15 ± 0,06	13,48	56–58,6		40,3–58,9	58,5 ± 0,1
Олеїнова	25,0 ± 0,24	23,7 ± 0,06		3,53–23,7	1,67		23,8 ± 0,1
Стеаринова	2,84 ± 0,08	3,69 ± 0,12		1,4–3,4	1,38	2,6–3,2	2,3 ± 0,1
Бегенова	1,98 ± 0,08	2,60 ± 0,05					
Лауринова				65,70	64,92		
Арахінова				12,02	11,72		
Міристинова				0,45–2,13	1,43	0,1–1,1	1,0 ± 0,1
Пентадеценова				1,34	1,94		
Пентадеканова				0,03	0,14		
Ліноленова				0,18–0,21			0,4 ± 0,1

Олія, отримана з насіння чорнушки, часто використовується в народній медицині країн Азії та Середземномор'я як природний засіб від ряду хвороб та станів, таких як астма, гіпертонія, діабет, запалення, бронхіт, головний біль, екзема, лихоманка, запаморочення та шлунково-кишкові розлади. Дослідження вчених довели, що олія з насіння чорнушки має наступні біоактивні властивості: антибактеріальна, протигрибкова, антиканцерогенна, протиприродна, антигіпертензивна, гепатопротекторна, протизапальна, проти набрякова, жарознижувальна та знеболювальна. Також вона вдало може використовуватися як сечогінний, жовчогінний і антигельмінтний засіб, а також як засіб, що покращує лактацію [17, 21, 22, 28].

Радзієвська І.В. відзначила, що: «Олія *N. sativa* ефективна проти широкого спектра організмів. Зокрема таких бактерій, як *B. cereus*, *B. subtilis*, *B. pumilus*, *S. aureus*, *S. epidermis*, *E. coli*, *Salmonella abony*, і патогенних грибків – *Candida albicans* та багатьох інших». Декілька фабрик випускають олію з насіння чорнушки для споживання в їжу: Amana, EI Baraka, EI Hawag, Tasnim [28]. Також олія чорного кмину є компонентом у багатьох косметичних засобах. Вона використовується у шампунях, масках та оліях для волосся; кремах, скрабах, масках для обличчя, а також у парфумерних композиціях [28].

Таблиця 2

Жирнокислотний склад олії із насіння чорнушки сорту

Назва жирної кислоти	Вміст, %
Пальмітинова	10,95
Пальмітолеїнова	0,10
Стеаринова	2,72
Олеїнова	34,94
Лінолева	46,62
Арахінова	0,65
Ейкозадієнова	4,03

Аналізуючи одержані результати, слід відзначити високий вміст ненасичених жирних кислот: олеїнової (ω -9) і лінолевої (ω -6), за рахунок чого підвищується біологічна цінність чорнушкової олії. Ці та інші цінні речовини, які містяться у насінні чорнушки, дають підставу вважати перспективною цю сировину для отримання корисних харчових та фармацевтичних продуктів. Необхідними є подальші дослідження параметрів одержання олії із вивченого насіння.

Основною метою цього дослідження було проведення дослідження хроматографічних профілів летких сполук у 4 зразках чорнушки: чорнушка польова, чорнушка дамаська, чорнушка посівна, чорнушка посівна сорту Айсу для визначення відмінностей в якісному та кількісному складі.

Матеріали та методи

Зразки та їх приготування. Зразки 4 видів чорнушки розподіляли порціями по 1 г у скляні флакони об'ємом 50 мл, герметично закривали для запобігання втрати летких сполук. Зразки во флаконах витримували на протязі 1 доби при кімнатній температурі.

Якісний та кількісний аналіз летких речовин. Для дослідження хроматографічних профілів летких сполук в зразках чорнушки використовували капілярну газову хроматографію.

Розділення компонентів здійснювали за допомогою стандартної хроматографічної капілярної колонки колонка фірми «Agilent Technologies» HP-5 (нерухома фаза 5%-феніл-95%-поліметилсилоксан), довжина 30 м, внутрішній діаметр 0,32 мм, товщина шару нерухомої фази 0,25 мкм, каталожний № 1909J-413.

Таблиця 3

Умови хроматографічного аналізу

Програмування температури колонок	Від 50 до 250 °C зі швидкістю 3 °C/хв.
Температура детектора ПІД	250 °C
Температура випарника	100 °C
Вхідний тиск газу-носія (азот ОСЧ)	1 атм.
Піддув газу-носія на колонку	30 см ³ /хв.
Скидання газу-носія	5 см ³ /хв.
Витрата повітря	250 см ³ /хв.
Витрата водню	30 см ³ /хв.

Умови хроматографічного аналізу наведені в таблиці 3. Об'єм повітря, що хроматографується – 0,5 см³.

Розрахунок кількісного вмісту компонентів дослідних зразків відбувалося за методом внутрішньої нормалізації із статистичною обробкою даних трьох паралельних дослідів. Масова частка досліджуваних компонентів mR, % розраховувалася як відношення площі піка компонента SR до сумарної площі усіх компонентів. За остаточний результат використовували середнє значення з розрахунком середньоквадратичного відхилення S. Рівень

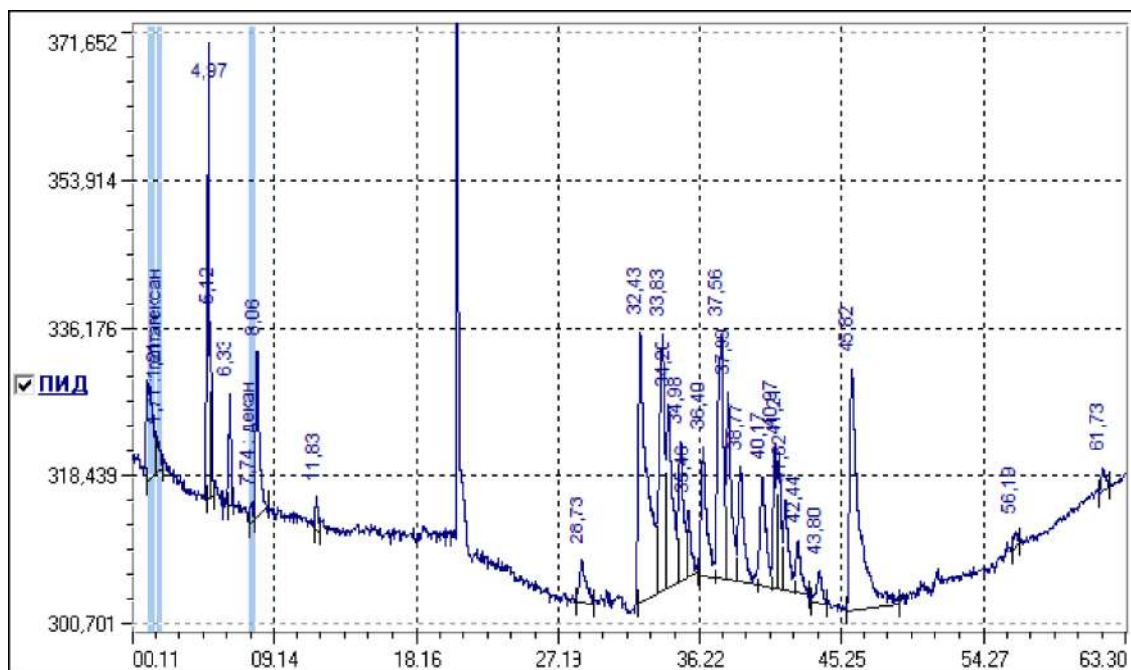


Рис. 1. Хроматограма летких сполук із зразка чорнушки польової

вірогідності за довірчої ймовірності $p = 0,95$ не перевищував $\alpha = 0,05$, критичний критерій Стюдента = 5,47. За результат бралися середні значення.

Результати

На рисунках 1, 2, 3 та 4 подано хроматограми летких компонентів дослідних зразків насіння чорнушки, які відображають якісний та кількісний склад ефірної олії й дають можливість порівняти профіль основних біоактивних сполук між різними зразками

Ідентифікацію отриманих компонентів здійснювали з урахуванням їх абсолютного часу утримання на хроматографічній колонці, що дозволяло визначати послідовність виходу летких речовин та співставляти отримані результати з наявними довідковими даними. Для більшої достовірності та у випадках, коли суміші летких компонентів містили невідомі речовини або сполуки зі схожими характеристиками, додатково розраховували логарифмічні індекси утримання (індекси Ковача). Цей показник давав змогу підвищити точність ідентифікації, оскільки

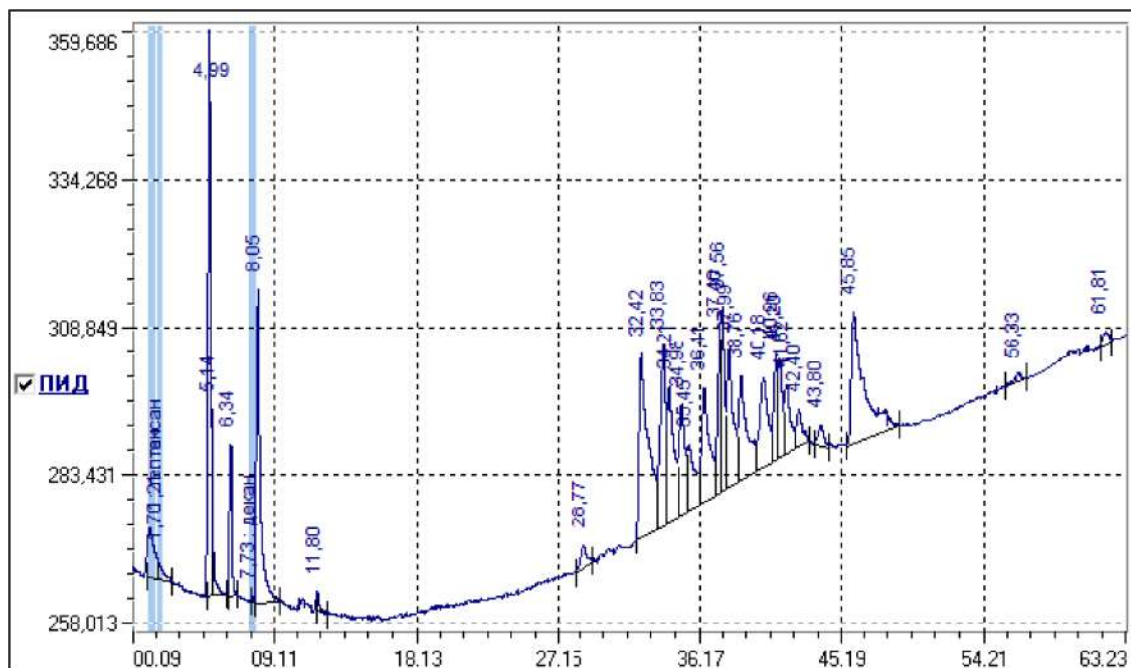


Рис. 2. Хроматограма зразка летких сполук із зразка чорнушки дамаської

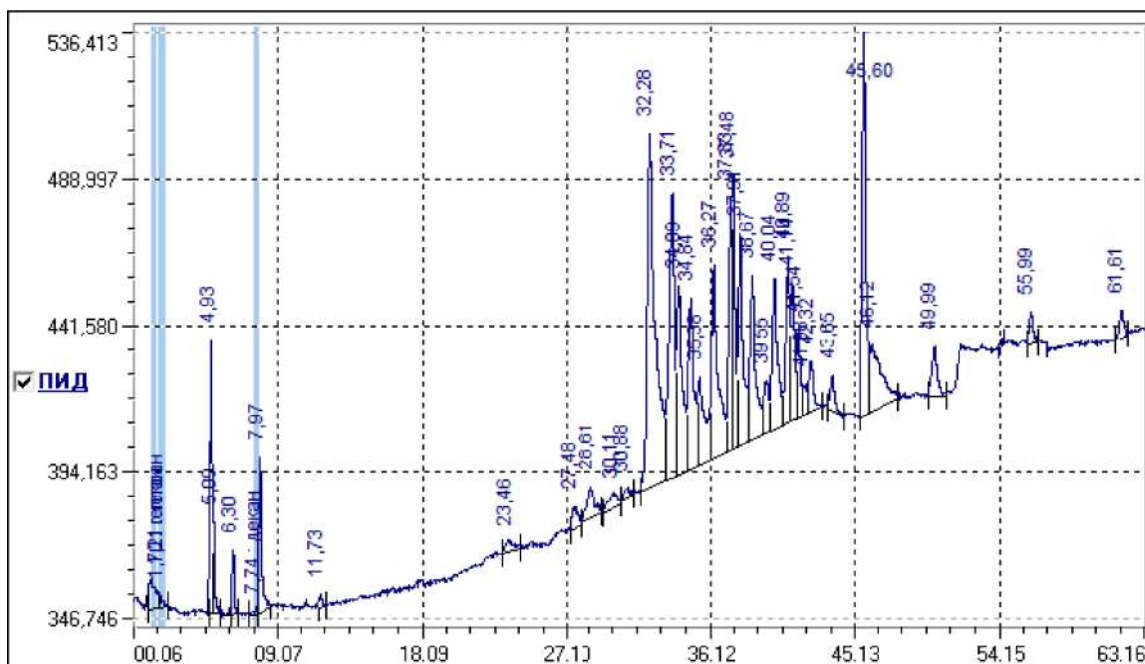


Рис. 3. Хроматограма зразка летких сполук із чорнушки посівної

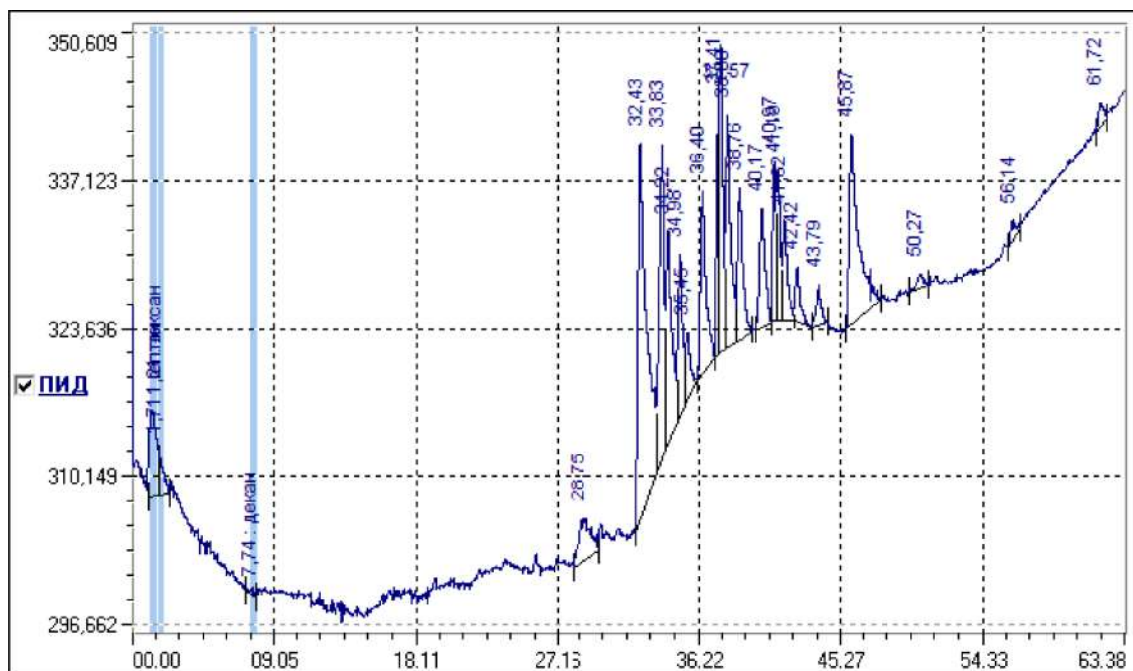


Рис. 4. Хроматограма зразка летких сполук із зразка чорнушки посівної сорту Айсу

Таблиця 4

Ідентифіковані за індексами Ковача леткі компоненти та їх кількісний вміст в дослідних зразках

№	Час утримання, хв.	Компоненти індекс Ковача	Площа піка, % від загальної площі			
			чорнушка польова	чорнушка дамаська	чорнушка посівна	чорнушка посівна, сорт Айсу
1	1,21	Гексан/600	3,5668	2,0612	0,9506	3,2996
2	1,70	Гептан/700	0,9997	0,6798	0,3505	1,4562
3	4,99	913,34	3,8617	5,7157	2,1384	
4	5,14	914,92	1,6159	2,2179	0,8208	
5	6,34	960,83	1,1285	1,8843	0,6243	
6	7,74	Декан/1000	3,5668	0,0590	0,0930	0,1652
7	8,05	1007,82	0,3259	6,7667	1,9076	
8	11,80	1083,44	3,0436	0,3641	0,1488	
9	23,46	1219,11			0,4062	
10	28,77	1259,60	0,4057	0,7606	1,1182	2,6759
11	30,11	1268,40			0,5787	
12	30,88	1273,34			0,2932	
13	32,42	1283,23	1,6051	10,7713	14,7257	18,5050
14	33,83	1291,61	13,5709	6,0731	7,8557	8,6972
15	34,21	1293,85	8,1612	5,8261	5,6535	7,0436
16	34,98	1298,21	6,4080	3,6762	4,5936	4,1080
17	35,45	1300,88	4,0344	3,5214	3,2995	1,9349
18	36,41	1306,16	3,9948	5,5595	6,1938	5,5238
19	37,40	1311,48	3,9948	2,7179	3,3487	3,0920
20	37,56	1312,28	7,9982	4,3889	4,3607	6,3296
21	37,99	1314,56	5,2886	5,5249	5,3016	6,8608
22	38,76	1318,49	3,6538	5,4879	4,3831	4,2581
23	39,55	1322,26			1,3394	
24	40,18	1325,64	3,8085	4,8367	4,0597	3,5669
25	40,96	1329,43	2,6012	2,2245	2,9931	2,6106
26	41,20	1330,59	3,0512	2,5778	2,8796	3,3431
27	41,63	1332,61	2,7025	2,7605	1,6975	2,6200
28	41,98	1334,07			0,5821	
29	42,40	1336,26	1,3744	1,2976	1,0870	1,4666
30	43,80	1342,66	0,8779	0,7248	0,7152	0,9604
31	45,85	1351,72	13,2935	10,6060	6,4921	9,8123
32	50,27	1371,35				0,4643
33	56,33	1392,41	0,3733	0,3800	0,6389	0,5066
34	61,81	1410,76	0,5780	0,5355	0,6103	0,6993

Таблиця 5

Відносна кількість летких речовин в дослідних зразках

№	Час утримання, хв.	Компонент/індекс Ковача	Площа піка, мВ*хв.			
			чорнушка польова	чорнушка дамаська	чорнушка посівна	чорнушка посівна, сорт Айсу
1	1,21	Гексан/600	4,8866	3,8166	4,0107	3,5252
2	1,70	Гептан/700	1,3696	1,2587	1,4788	1,5558
3	4,99	913,34	5,2906	10,5832	9,0222	
4	5,14	514,92	2,2139	4,1068	3,4630	
5	6,34	960,83	1,5461	3,4891	2,6342	
6	7,74	Декан/1000	0,4465	0,1093	0,3923	0,1765
7	8,05	1007,82	19,690	12,5292	8,0486	
8	11,80	1083,44	3,876	0,6741	0,6280	
9	23,46	1219,11			1,7137	
10	28,77	1259,60	4,992	1,4083	4,7177	2,8589
11	30,11	1268,40			2,4415	
12	30,88	1273,34			1,2369	
13	32,42	1283,23	32,487	19,9443	62,1311	19,7704
14	33,83	1291,61	31,035	11,2450	33,1449	9,2920
15	34,21	1293,85	21,944	10,7877	23,8533	7,5253
16	34,98	1298,21	16,695	6,8069	19,3815	4,3890
17	35,45	1300,88	7,996	6,5203	13,9211	2,0672
18	36,41	1306,16	5,4730	10,2941	26,1330	5,9015
19	37,40	1311,48	5,4730	5,0325	14,1290	3,3034
20	37,56	1312,28	10,9576	8,1266	18,3987	6,7624
21	37,99	1314,56	7,2454	10,2300	22,3685	7,3299
22	38,76	1318,49	5,0058	10,1615	18,4933	4,5493
23	39,55	1322,26			5,6511	
24	40,18	1325,64	5,2178	8,9557	17,1289	3,8109
25	40,96	1329,43	3,5638	4,1189	12,6284	2,7891
26	41,20	1330,59	4,1802	4,7731	12,1496	3,5717
27	41,63	1332,61	3,7024	5,1114	7,1620	2,7991
28	41,98	1334,07			2,4561	
29	42,40	1336,26	1,8830	2,4027	4,5863	1,5669
30	43,80	1342,66	1,2027	1,3420	3,0175	1,0261
31	45,85	1351,72	18,2123	19,6382	27,3917	10,4832
32	50,27	1371,35				0,4960
33	56,33	1392,41	0,5115	0,7035	2,6958	0,5413
34	61,81	1410,76	0,7919	0,9915	2,5748	0,7472

враховував не лише час проходження сполуки через колонку, а й її відносне співвідношення з низкою стандартних вуглеводнів, що є загальноприйнятим методом у хроматографічних дослідженнях.

Таким чином, комбінація аналізу за абсолютним часом утримання та використання індексів Ковача забезпечувала комплексний підхід до визначення якісного складу досліджуваних зразків. Це дозволяло виявити навіть ті компоненти, які були присутні у незначних концентраціях, та забезпечувало високу відтворюваність результатів. Остаточні дані щодо вмісту ідентифікованих речовин у досліджуваних зразках чорнушки наведені в узагальненій таблиці, яка відображає як якісний, так і кількісний профіль летких компонентів.

Досліджувані зразки практично не відрізняються за якісним складом летких речовин, проте мають різний кількісний вміст компонентів, що відображено в Таблиці 5. В ароматі зразків чорнушки польової та чорнушки дамаської виявлено 29 летких речовин ідентичних за складом, в ароматі зразка чорнушки посівної знайдено 33 леткі речовини, чорнушки посівної сорту Айсу представлено 26 летких компоненти. Як можна побачити, в аромат чорнушки посівної більш насичений леткими речовинами за складом та концентрацією компонентів.

Висновки

У результаті проведених досліджень встановлено, що всі досліджувані види чорнушки (*Nigella arvensis* L., *Nigella damascena* L., *Nigella sativa* L. та *Nigella sativa* L. сорту «Айсу») характеризуються подібним якісним складом летких сполук, проте суттєво відрізняються за їх кількісним вмістом. Газохроматографічний аналіз дозволив ідентифікувати понад тридцять компонентів, серед яких переважають моно- та сесквітерпени, що формують специфічний аромат та визначають біологічну активність насіння.

Встановлено, що найбільш насиченим за кількістю і концентрацією летких речовин є профіль чорнушки посівної, зокрема сорту «Айсу», що підтверджує перспективність його використання у харчовій і фармацевтичній галузях. Порівняння зразків показало відмінності у співвідношенні ключових ароматичних компонентів, що може слугувати критерієм ідентифікації та контролю якості рослинної сировини.

Отримані результати свідчать про значний потенціал насіння чорнушки як джерела біологічно активних сполук із вираженими антиоксидантними, протизапальними та протимікробними властивостями. Подальші дослідження доцільно спрямувати на оптимізацію технологій екстракції, визначення стабільності компонентів у різних умовах та оцінку їх функціональних властивостей у складі харчових і фармацевтичних продуктів.

Список використаної літератури

1. USDA GRIN Taxonomy.
2. Кобів Ю. Чорнушка сійна//Словник українських наукових і народних назв судинних рослин – К. : Наук. думка, 2004. – С. 286.
3. Bharat B Aggarwal. Molecular Targets and Therapeutic Uses of Spices. Google Books. с. 259. ISBN 978-981-4468-95-4
4. Mohammad Hossein Boskabady, Batool Shirmohammadi (2002). Effect of Nigella Sativa on Isolated Guinea Pig Trachea (PDF). Arch. Iran. Med. 5 (2): 103–107.
5. Takruri H. R. H., Dameh M. A. Study of the nutritional value of black cumin seeds (Nigella sativa L.). Journal of the Science of Food and Agriculture. 1998. Vol. 76, Issue 3. P. 404–410.
6. Yimer E. M., Tuem K. B., Karim A., Ur-Rehman N., Anwar F. Nigella sativa L. (Black Cumin): A promising natural remedy for wide range of illnesses. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine. 2019. Vol. 2019. P. 1–16.
7. Ahmad A., Husain A., Mujeeb M., Khan S. A., Najmi A. K., Siddique N. A., Damanhour Z. A., Anwar F. A review on therapeutic potential of Nigella sativa. Journal of Ethnopharmacology. 2013. Vol. 131, No. 1. P. 180–196.
8. Ahmad A., Husain A., Mujeeb M., Khan S. A., Najmi A. K., Siddique N. A., Damanhour Z. A., Anwar F. A review on therapeutic potential of Nigella sativa. Journal of Ethnopharmacology. 2013. Vol. 131, No. 1. P. 180–196. DOI: 10.1016/j.jep.2010.07.005
9. S. Isik, M. Kartal, and S. A. Erdem, “Quantitative analysis of thymoquinone in Nigella Sativa L. (Black Cumin) seeds and commercial seed oils and seed oil capsules from Turkey,” Ankara Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Dergisi, vol. 41, no. 1, pp. 34–41, 2017.
10. Z. Solati, B. S. Baharin, and H. Bagheri, “Antioxidant property, thymoquinone content and chemical characteristics of different extracts from Nigella sativa L. seeds”, Journal of the American Oil Chemists’ Society, vol. 91, no. 2, pp. 295–300, 2014.
11. Herlina, S. A. Aziz, A. Kurniawati, and D. N. Faridah, “Changes of thymoquinone, thymol, and malondialdehyde content of black cumin (Nigella sativa L.) in response to Indonesia tropical”, Journal of Biosciences, vol. 24, no. 3, pp. 156–161, 2017.
12. R. Salea, E. Widjojokusumo, A. W. Hartanti, B. Veriansyah, and R. R. Tjandrawinata, “Supercritical fluid carbon dioxide extraction of Nigella sativa (black cumin) seeds using taguchi method and full factorial design”, Biochemical Compounds, vol. 1, no. 1, p. 1, 2013.
13. Amin B., Hosseinzadeh H. Black Cumin (Nigella sativa) and Its Active Constituent, Thymoquinone: A Review on Pharmacological Effects and Mechanisms of Action. Iranian Journal of Basic Medical Sciences. 2016. Vol. 19, No. 9. P. 929–944.
14. B. K. Mehta, M. Verma, and M. Gupta, “Novel lipid constituents identified in seeds of Nigella sativa (Linn)”, Journal of the Brazilian Chemical Society, vol. 19, no. 3, pp. 458–462, 2008.
15. I. San Mauro-Martín, J. A. Blumenfeld-Olivares, E. Garicano-Vilar, M. Á. Cuadrado, M. J. Ciudad-Cabañas, and L. Collado-Yurrita, “Differences in the effect of plant sterols on lipid metabolism in men and women”, Topics in Clinical Nutrition, vol. 33, no. 1, pp. 31–40, 2018.
16. S. Cheikh-Rouhou, S. Besbes, B. Hentati, C. Blecker, C. Deroanne, and H. Attia, “Nigella sativa L.: chemical composition and physicochemical characteristics of lipid fraction”, Food Chemistry, vol. 101, no. 2, pp. 673681, 2007.
17. M. Zaunschirm, M. Pignitter, J. Kienesberger et al., “Contribution of the ratio of tocopherol homologs to the oxidative stability of commercial vegetable oils”, Molecules, vol. 23, no. 1, p. 206, 2018.
18. R. Daryabeygi-Khotbehsara, M. Golzarand, M. P. Ghaffari, and K. Djafarian, “Nigella sativa improves glucose homeostasis and serum.
19. Shahbazi E., Safipor B., Saeidi K., Golkar P. Responses of Nigella damascena L. and Nigella sativa L. to drought stress: yield, fatty acid composition and antioxidant activity. Journal of Agricultural Science and Technology. 2022. Vol. 24, Issue 3. PP. 693– 705.

20. Бойко М., Подобій О., Житнецький І. Розробка технології харчової добавки на основі кмину чорного. Актуальні проблеми хімії та хімічної технології: 71 зб. матеріалів доп. учасн. III Міжнар. наук.-практ. конф., 21–22 листопада. 2018 р. К. : НУХТ, 2018. С. 192–193. 37. Савчук, Ю. Ю., Усатюк С. І. Методи виявлення фальсифікації олії чорного кмину. Якість і безпека харчових продуктів: міжнар. наук.-практ. конф., 14–15 листопада 2013 р. К. : НУХТ, 2013. С. 82–83.
21. Matthaus B., Özcan M.M. Fatty acids, tocopherol, and sterol contents of some *Nigella* species seed oil. *Czech Journal of Food Sciences*. 2011. Vol. 29, no. 2. PP. 145–150.
22. Margout D., Kelly M.T., Meunier S., Auinger D., Pelissier Y., Larroque M. Morphological, microscopic and chemical comparison between *Nigella sativa* L. cv. (black cumin) and *Nigella damascena* L. cv. *Journal of Food, Agriculture & Environment*. 2013. Vol.11. PP. 165–171.
23. Toma C.-C., Olah N.-K., Vlase L., Mogoşan C., Mocan A. Comparative studies on polyphenolic composition, antioxidant and diuretic effects of *Nigella sativa* L. (black cumin) and *Nigella damascena* L. (lady-in-a-mist) seeds. *Molecules*. 2015. Vol. 20. PP. 9560–9574.
24. Cheikh-Rouhou S., Besbes S., Hentati B., Blecker Ch., Deroanne C., Attia H. *Nigella sativa* L.: chemical composition and physicochemical characteristics of lipid fraction. *Food Chemistry*. 2007. Vol. 101, no. 2. PP. 673–681.
25. Dinakaran S., Sridhar S., Eganathan P. Chemical composition and antioxidant activities of black seed oil (*Nigella sativa* L.). *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*. 2016. Vol. 7, Issue 11. PP. 4473–4479.
26. Ніколова Н. С., Данилів С. І. Аналіз жирної олії *Nigella sativa* L. виробництва України та Болгарії. Вісник медичних і біологічних досліджень. 2022. № 1. С. 80–83.
27. Asdadi A., Harhar H., Gharby S., Bouzoubaâ Z., El Yadini A., Moutaj R., El Hadek M., Chebli B., Hassani L. M. I. Chemical composition and antifungal activity of *Nigella sativa* L. Oil seed cultivated in Morocco. *International Journal of Pharmaceutical Science Invention*. 2014. Vol. 3, Issue 11. PP. 9–15.
28. Salehi B., Quispe C., Imran M., Ul-Haq I., Živković J., Abu-Reidah I.M., Sen S., Taheri Y., Acharya K., Azadi H., del Mar Contreras M., Segura-Carretero A., Mnayer D., Sethi G., Martorell M., Abdull R. A. F., Sunusi U., Kamal R. M., Rasul S. H. A., SharifiRad J. *Nigella* plants – Traditional Uses, Bioactive Phytoconstituents, Preclinical and Clinical Studies. *Frontiers in Pharmacology*. 2021. Vol. 12. PP. 3–26.
29. Радзівєвська І. Г., Мельник О. П., Пушнова А. О. Використання олії чорного кмину у складі засобу для волосся. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2019. Т. 25. № 6. С. 164–171.

References

1. USDA, ARS, National Genetic Resources Program. (n.d.). Germplasm Resources Information Network (GRIN-Taxonomy). National Germplasm Resources Laboratory, Beltsville, Maryland
2. Kobiv, Y. (2004). Chornushka siina. In Dictionary of Ukrainian scientific and folk names of vascular plants (p. 286). Kyiv: Naukova Dumka.
3. Aggarwal, B. B. (2012). Molecular targets and therapeutic uses of spices (p. 259). World Scientific. ISBN 978-981-4468-95-4.
4. Boskabady, M. H., & Shirmohammadi, B. (2002). Effect of *Nigella sativa* on isolated guinea pig trachea. *Archives of Iranian Medicine*, 5(2), 103–107.
5. Takruri, H. R. H., & Dameh, M. A. (1998). Study of the nutritional value of black cumin seeds (*Nigella sativa* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 76(3), 404–410.
6. Yimer, E. M., Tuem, K. B., Karim, A., Ur-Rehman, N., & Anwar, F. (2019). *Nigella sativa* L. (Black cumin): A promising natural remedy for wide range of illnesses. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2019, 1–16.
7. Ahmad, A., Husain, A., Mujeeb, M., Khan, S. A., Najmi, A. K., Siddique, N. A., Damanhour, Z. A., & Anwar, F. (2013). A review on therapeutic potential of *Nigella sativa*. *Journal of Ethnopharmacology*, 131(1), 180–196.
8. Ahmad, A., Husain, A., Mujeeb, M., Khan, S. A., Najmi, A. K., Siddique, N. A., Damanhour, Z. A., & Anwar, F. (2013). A review on therapeutic potential of *Nigella sativa*. *Journal of Ethnopharmacology*, 131(1), 180–196. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2010.07.005>
9. Isik, S., Kartal, M., & Erdem, S. A. (2017). Quantitative analysis of thymoquinone in *Nigella sativa* L. (Black cumin) seeds and commercial seed oils and seed oil capsules from Turkey. *Ankara Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Dergisi*, 41(1), 34–41.
10. Solati, Z., Baharin, B. S., & Bagheri, H. (2014). Antioxidant property, thymoquinone content and chemical characteristics of different extracts from *Nigella sativa* L. seeds. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 91(2), 295–300.
11. Herlina, Aziz, S. A., Kurniawati, A., & Faridah, D. N. (2017). Changes of thymoquinone, thymol, and malondialdehyde content of black cumin (*Nigella sativa* L.) in response to Indonesia tropical climate. *Journal of Biosciences*, 24(3), 156–161.

12. Salea, R., Widjojokusumo, E., Hartanti, A. W., Veriansyah, B., & Tjandrawinata, R. R. (2013). Supercritical fluid carbon dioxide extraction of *Nigella sativa* (black cumin) seeds using Taguchi method and full factorial design. *Biochemical Compounds*, 1(1), 1.
13. Amin, B., & Hosseinzadeh, H. (2016). Black cumin (*Nigella sativa*) and its active constituent, thymoquinone: A review on pharmacological effects and mechanisms of action. *Iranian Journal of Basic Medical Sciences*, 19(9), 929–944.
14. Mehta, B. K., Verma, M., & Gupta, M. (2008). Novel lipid constituents identified in seeds of *Nigella sativa* (Linn). *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 19(3), 458–462.
15. San Mauro-Martín, I., Blumenfeld-Olivares, J. A., Garicano-Vilar, E., Cuadrado, M. Á., Ciudad-Cabañas, M. J., & Collado-Yurrita, L. (2018). Differences in the effect of plant sterols on lipid metabolism in men and women. *Topics in Clinical Nutrition*, 33(1), 31–40.
16. Cheikh-Rouhou, S., Besbes, S., Hentati, B., Blecker, C., Deroanne, C., & Attia, H. (2007). *Nigella sativa* L.: Chemical composition and physicochemical characteristics of lipid fraction. *Food Chemistry*, 101(2), 673–681.
17. Zaunschirm, M., Pignitter, M., Kienesberger, J., et al. (2018). Contribution of the ratio of tocopherol homologs to the oxidative stability of commercial vegetable oils. *Molecules*, 23(1), 206.
18. Daryabeygi-Khotbehsara, R., Golzarand, M., Ghaffari, M. P., & Djafarian, K. (2017). *Nigella sativa* improves glucose homeostasis and serum lipids in type 2 diabetes: A systematic review and meta-analysis. *Complementary Therapies in Medicine*, 35, 6–13.
19. Shahbazi, E., Safipor, B., Saeidi, K., & Golkar, P. (2022). Responses of *Nigella damascena* L. and *Nigella sativa* L. to drought stress: Yield, fatty acid composition and antioxidant activity. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 24(3), 693–705.
20. Boyko, M., Podobii, O., & Zhytnetskyi, I. (2018). Development of a food additive technology based on black cumin. In *Actual Problems of Chemistry and Chemical Technology: Proceedings of the III International Scientific-Practical Conference* (pp. 192–193). Kyiv: NUFT.
21. Matthäus, B., & Özcan, M. M. (2011). Fatty acids, tocopherol, and sterol contents of some *Nigella* species seed oil. *Czech Journal of Food Sciences*, 29(2), 145–150.
22. Margout, D., Kelly, M. T., Meunier, S., Auinger, D., Pelissier, Y., & Larroque, M. (2013). Morphological, microscopic and chemical comparison between *Nigella sativa* L. cv. (black cumin) and *Nigella damascena* L. cv. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 11, 165–171.
23. Toma, C.-C., Olah, N.-K., Vlase, L., Mogoşan, C., & Mocan, A. (2015). Comparative studies on polyphenolic composition, antioxidant and diuretic effects of *Nigella sativa* L. (black cumin) and *Nigella damascena* L. (lady-in-a-mist) seeds. *Molecules*, 20, 9560–9574.
24. Cheikh-Rouhou, S., Besbes, S., Hentati, B., Blecker, C., Deroanne, C., & Attia, H. (2007). *Nigella sativa* L.: Chemical composition and physicochemical characteristics of lipid fraction. *Food Chemistry*, 101(2), 673–681.
25. Dinakaran, S., Sridhar, S., & Eganathan, P. (2016). Chemical composition and antioxidant activities of black seed oil (*Nigella sativa* L.). *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 7(11), 4473–4479.
26. Nikolova, N. S., & Danyliv, S. I. (2022). Analysis of fatty oil of *Nigella sativa* L. produced in Ukraine and Bulgaria. *Bulletin of Medical and Biological Research*, 1, 80–83.
27. Asdadi, A., Harhar, H., Gharby, S., Bouzoubaâ, Z., El Yadini, A., Moutaj, R., El Hadek, M., Chebli, B., & Hassani, L. M. I. (2014). Chemical composition and antifungal activity of *Nigella sativa* L. oil seed cultivated in Morocco. *International Journal of Pharmaceutical Science Invention*, 3(11), 9–15.
28. Salehi, B., Quispe, C., Imran, M., Ul-Haq, I., Živković, J., Abu-Reidah, I. M., Sen, S., Taheri, Y., Acharya, K., Azadi, H., del Mar Contreras, M., Segura-Carretero, A., Mnayer, D., Sethi, G., Martorell, M., Abdull, R. A. F., Sunusi, U., Kamal, R. M., Rasul, S. H. A., Sharifi-Rad, J. (2021). *Nigella* plants – Traditional uses, bioactive phytoconstituents, preclinical and clinical studies. *Frontiers in Pharmacology*, 12, 3–26.
29. Radziievska, I. H., Melnyk, O. P., & Pushnova, A. O. (2019). Use of black cumin oil in hair care products. *Scientific Works of the National University of Food Technologies*, 25(6), 164–171.

Дата першого надходження рукопису до видання: 22.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 17.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025