

Фатєєва К.О.

<https://orcid.org/0009-0009-0781-0034>

Одеський національний технологічний університет

ЗАСТОСУВАННЯ МІКРОХВИЛЬОВОГО НАГРІВУ В ПРОЦЕСАХ ЕКСТРАГУВАННЯ БІОЛОГІЧНО АКТИВНИХ РЕЧОВИН ІЗ РОСЛИННИХ МАТЕРІАЛІВ

Розглядається проблема ефективного отримання та використання екстрактів біологічно активних речовин із рослинних матеріалів за використання різних методів екстрагування. Основна увага роботи зосереджується на екстрактах, що передбачаються використовувати у сільському господарстві для підвищення стійкості рослин. Застосування інноваційних методів екстракції, одним з яких є мікрохвильова екстракція як нетоксичний та сталий метод, забезпечує більш екологічний продукт, який не містить небезпечних хімічних речовин. Встановлено за результатами аналітичного огляду, що використання нових та комбінованих технологій підвищує екстрагованість, а також до зменшення кількості домішок у кінцевому екстракті та збереження термочутливих сполук при зниженні енергоспоживання. Наведені визначальні умови екстрагування, яких необхідно дотримуватись незалежно від методу. Обговорені результати використання методу мікрохвильового екстрагування при вилученні біологічно активних речовин з різної сировини. Продемонстровано, що метод мікрохвильової екстракції дозволяє досягти високої концентрації біологічно активних речовин за оптимальних умов співвідношення твердої речовини до розчинника. Визначено, що мікрохвильова екстракція без розчинників також може бути виконана з використанням залишкової води рослинного матеріалу, що мінімізує додаткові реакції. Наведені приклади ефективного використання мікрохвильового поля в екстрагуванні різних речовин з зазначенням потужності мікрохвильового поля, розчинника та часу. Обговорено застосування рослинних екстрактів для покращення стійкості рослин та їх відновлення. Запропонована методика проведення лабораторних досліджень ефективності мікрохвильового екстрагування біологічно активних речовин з суміші кропиви, хвоща та люцерни для розсади томатів. Мікрохвильовий режим повинен бути організований таким чином, щоб температура не перевищувала 60–65 °С, переважними є імпульсні режими.

Ключові слова: екстракт, ефективність, температура, потужність мікрохвильового поля, технічні умови, методика досліджень.

Постановка проблеми. Зіткнувшись із серйозними екологічними викликами нашого часу, такими як порушення клімату, руйнуванням біорізноманіття, забрудненням ґрунту та води – органічне землеробство є важливим рішенням на майбутнє, як показано в дослідженнях Кузьменко О. Б. [1], Павленко О. М. [2], Нікумані К. та Арвінду Й. [3]. Споживачі, які все більше усвідомлюють проблеми громадського здоров'я та навколишнього середовища, віддають перевагу органічним продуктам, створюючи тим самим нові можливості для фермерів у перехідному періоді. У цьому контексті рослинні екстракти та ефірні олії є особливо перспективними природними альтернативами, як показано в дослідженні Тайрусу М. та ін. [4]. Ці рішення, отримані з ретельно відібраних рослин завдяки їхнім захисним та стимулюючим

властивостям, дозволяють досягти наступного:

- значного скорочення використання хімічних речовин
- збереження ґрунтового життя та біорізноманіття
- підтримку задовільної врожайності
- гарантію якості продукції

Недавні дослідження Годлевської К. [5], Чоудхарі М. [6], Пател Р. [7] показують, що перехід на ці природні рішення не тільки технічно можливий, але й економічно доцільний. Дійсно, хоча початкові інвестиції можуть здаватися значними, зниження витрат на виробництво та підвищення цінності органічних продуктів зазвичай забезпечують вищу прибутковість з другого чи третього року.

Задачею роботи є розкриття перспектив застосування мікрохвильового нагріву в процесах ек-



трагування біологічно активних речовин із рослинних матеріалів на підставі аналізу сучасних наукових досліджень, що сприяє вирішенню проблеми ефективного отримання та використання екстрактів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Традиційне сільське господарство після десятиліть інтенсивного використання хімічних речовин тепер демонструє обмеження. Нещодавні дослідження виявляють негативні наслідки:

- середня втрата 1,2% органічної речовини в сільськогосподарських ґрунтах на рік (Райлі Х. [8], Е. Заець [9]);
- скорочення популяцій комах на 75% протягом 30 років (Р. ван Клінк [10]);
- залишки пестицидів виявлені у 72% звичайних фруктів та овочів (Frank R. [11], G. M. Teló [12]);
- зростання забруднення ґрунтових вод нітрами та пестицидами (Ліхо О. А. [13], Л. Л. Березюк [14]).

Для усунення розглянутих негативних явищ пропонується використання екстрактів з біологічно активними речовинами, які вилучаються з рослинних матеріалів. З огляду на ці спостереження, природні рішення, такі як рослинні екстракти, виступають як надійна та необхідна альтернатива.

Першим кроком у виділенні та очищенні біоактивних сполук з рослинного матеріалу є екстракція – Джа А. К. [15], (рис. 1). Екстракція вторинних метаболітів, таких як фенольні кислоти та флавоноїди, є складною через їхню нерозчинну природу. Хоча традиційні методи екстракції, такі як метод Сокслета, нагрівання з рефлюксом та мацерація, є успішними процедурами екстракції біоактивних сполук, обладнання, що використовується в цих методах, відрізняється один від одного. Для екстракції біоактивних сполук з рослинних тканин слід використовувати відповідну техніку екстракції, яка поєднує якість продукту, ефективність процесу, виробничі витрати та екологічно прийнятні методи.

Застосування інноваційних методів екстракції в харчовій промисловості було ретельно досліджено через зростання очікувань споживачів щодо більш екологічних варіантів, які не містять небезпечних хімічних речовин, а також занепокоєння промисловості щодо сталих, нетоксичних методів екстракції. Інноваційні технології, такі як високий гідростатичний тиск (ВГТ), ультразвук (УЗ), імпульсне електричне поле (ІЕП), надкритична рідина (НР) та інші, все частіше замінюють традиційні методи. Використання нових та комбінованих технологій підвищує екстрагованість,

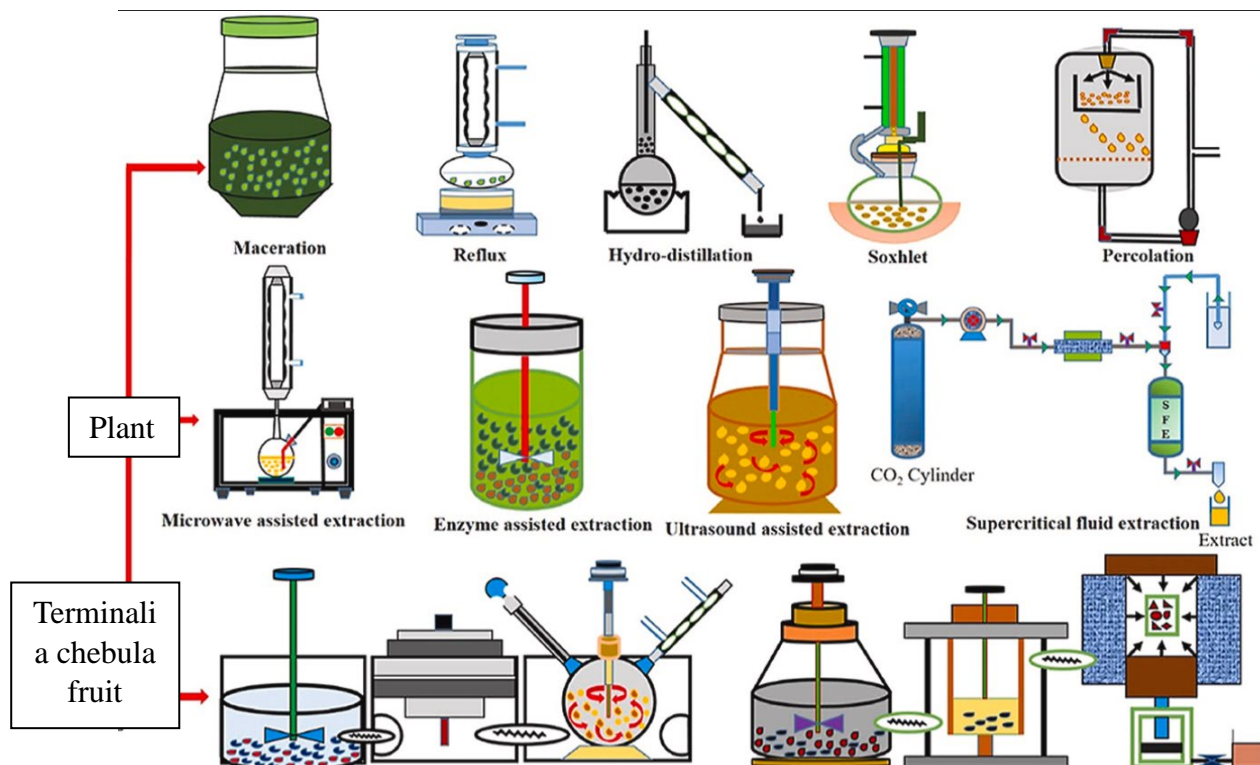


Рис. 1. Вилучення біологічно активних сполук із рослинної сировини з використанням комбінації різних нових методів [15]

що призводить до виходу з вищими показниками екстракції. Це також призводить до зменшення кількості домішок у кінцевому екстракті та збереження термочутливих сполук, використання різних неорганічних розчинників та низького енергоспоживання. Метою цього огляду є оцінка ефективності різних традиційних, нових та комбінованих технологій, що використовуються для екстракції біологічно активних сполук з рослинних матеріалів.

Порівняння методів екстракції з боку економічної доцільності відповідно даним Адрієн [16] та Багдікян Б. [17] наведено в табл. 1.

Таблиця 1
Порівняння методів екстракції з рослинної сировини

Метод	Тривалість	Рослини	Питомі витрати
Мацерація	18-24 год	Кропива, живокіст	€0,15/л
Відвар	45 хв	Хвощ, папороть	€0,35/л
Ферментація	10-12 днів	Деревій, ромашка	€0,20/л
МАЕ	5 хв	Гарпагофітум	€0,30/л

Незалежно від методу екстрагування, слід дотримуватись наступних правил, викладених в роботі Д. Торрес-Ортіс та ін.[18]: не використовувати хлоровану воду, тому що вона нейтралізує ферменти; запобігати впливу ультрафіолетового випромінювання під час зберігання – це приводить зниженню ефективності екстрагування на 40%; не припускати змішування компонентів, які вступають в молекулярний антагонізм, при якому одна речовина зменшує або повністю скасовує дію іншої речовини шляхом взаємодії на молекулярному рівні (наприклад: кропиву та папорот). Також неприпустимо використання об'єму листів більш за 10% та при застосуванні методу ферментації – не перевищувати температуру 25°C. Мікрохвильова екстракція, як стверджують А. А. Закі та ін. [19], також є ефективною зеленою технологією, яка стала одним з основних методів екстракції біологічно активних компонентів зі складних рослинних препаратів.

Постановка завдання. Метою роботи є вивчення ефективності використання енергії мікрохвильового поля в процесі екстрагування біологічно активних речовин з рослинних матеріалів для їх подальшого використання в сільському господарстві.

Виклад основного матеріалу

Технічні умови використання мікрохвильової екстракції

У дослідженні Багдікян Б. та ін. [17] гарпагофітум екстрагували за допомогою звичайних ультраз-

вукових (UAE) та мікрохвильових (MAE) методів. Оптимальні умови MAE були наступними: етанол, співвідношення тверда/рідина 1/2,5, потужність мікрохвиль 100 Вт, час екстракції 5 хв. За оптимальних умов, вміст цільового компоненту (ЦК) в екстракті становив 10,50% (мас./мас.). Оптимальні умови UAE були: етанол, співвідношення тверда/рідина 1/2,5 та час екстракції 10 хв. За цих оптимальних умов, вміст ЦК в екстракті становив 10,88% (мас./мас.). MAE та UAE, розроблені в цьому дослідженні, є перспективними методами відповідно до сталого розвитку.

Мікрохвилі, як електромагнітні хвилі з частотою від 300 МГц до 300 ГГц, відповідають за нагрівання речовин за допомогою комбінації іонної провідності та дипольного руху Хорікоші С.та ін. [20]. Розчинники, такі як вода, що мають високу діелектричну проникність, можуть поглинати та вивільняти мікрохвильову енергію, що, в свою чергу, підвищує температуру, необхідну для збільшення швидкості екстракції. В дослідженні Сімсека та ін. [21] фенольні компоненти (сирингова, ванільна, епікатехін, гентизинова та кверцетин) були виділені з вишневого вичавку за допомогою MAE. Конденсовані таніни та поліфеноли були ефективно екстраговані з виноградних відходів за допомогою оптимізованого MAE в роботі Брахім, М. та ін. [22]. Чисті екстракти поліфенольного пігменту беталаїну були отримані зі шкірки плодів індійської опунції Сірімінною та ін. [23] за допомогою MAE (1 год при 70 °C). Ліазід та ін. [24] використовували MAE для екстракції антоціанового пігменту з виноградної шкірки та виявили, що екстракт антоціану демонструє більшу стабільність за температури 100 °C. Однак, вище цієї температури, вихід екстракту та стабільність знижувалися, що свідчить про розпад молекули. Аналогічно, К. Торрес-Леон та ін. [25] продемонстрували, що MAE може екстрагувати високу концентрацію біологічно активних речовин з насіння манго за оптимальних умов співвідношення твердої речовини до розчинника 1/60 г/мл. Поряд з цим, мікрохвильова екстракція без розчинників також може бути виконана з використанням залишкової води рослинного матеріалу, що мінімізує додаткові реакції гідролізу. Екстракцію кисневмісних сполук без розчинників з олії кардамону (*Elletaria cardamomum* L.) виконали та оптимізували Луккезі та ін. [26]. В іншій роботі Мішель та ін. [27] виконали MAE на основі прямого опромінення для виділення полярних антиоксидантних компонентів з морських ягід (*Hipporphae rhamnoides*) з використанням залишкового вмісту води. Порівняно зі звичайною екстракцією Сок-

слета, швидкий метод екстракції двох основних капсаїциноїдів з перцю хабанеро за допомогою нових методів екстракції на основі ультразвуку, ближнього інфрачервоного або мікрохвильового випромінювання призвів до вищого загального виходу та вищого співвідношення капсаїцину до дигідрокапсаїцину, що показано у дослідженнях Х. Мартінеса та ін. [28]. З досвіду авторів, МАЕ вважається цінною альтернативою традиційним методам екстракції численних біологічно активних сполук із сирих рослин та побічних продуктів. Основними перевагами МАЕ є вищий вихід екстракції та коротший час екстракції. Приклади ефективного використання мікрохвильового поля в екстрагуванні наведені в табл. 2.

Застосування рослинних екстрактів для покращення стійкості рослин та їх відновлення

Рослинні екстракти широко застосовують для підвищення стійкості рослин та відновлення після стресу. Як біостимулятори та адаптогени, рослинні екстракти підвищують стійкість до посухи, холоду та спеки, допомагають відновитися після гербіцидного стресу, посилюють імунітет до хвороб, прискорюють ріст коріння та листя, покращують фотосинтез та обмін речовин. Рослинні

екстракти є сумішшю різних біологічно активних речовин, яка може містити фітогормони (ауксини, цитокініни), фенольні сполуки, флавоноїди, амінокислоти, вітаміни, антиоксиданти. У комплексі активують захисні механізми рослини. Екстракти, що найчастіше використовуються для поліпшення стійкості рослин і їх відновлення (табл. 3).

Рослинні екстракти активують антиоксидантні ферменти, стабілізують мембрани клітин, регулюють водний баланс, знижують накопичення активних форм кисню. Вони підвищують адаптацію, що не є примусовим прискорювачем зростання. Їх застосовують в обробці насіння, для листового підживлення, а також для відновлення після заморозків, посухи та обробки хімікатами.

Важливо відзначити, що ефект залежить від концентрації та якості екстракту і краще працюють суміші, а не поодинокі речовини. У табл. 4 наведено методи використання рослинних екстрактів у сільському господарстві.

Методика проведення лабораторних досліджень на розсаді томатів

Як приклад досліджень ефективності дії мікрохвильових екстрактів розглядається їхній вплив на зростання розсади томатів. Рослинний

Таблиця 2

Приклади ефективного використання мікрохвильового поля в екстрагуванні

Рослина/Матеріал	Екстрагована речовина	Оптимальні умови / результати
Scutellaria baicalensis і S. lateriflora	Феноли, флавоноїди, антиоксиданти, протизапальні речовини	Мікрохвильова потужність ~63 Вт, час ~10 хв, 70 % етанолу давали найвищі показники фенолів, сильну антиоксидантну та LOX-інгібууючу дію [29]
Rosmarinus officinalis (розмарин)	Біоактивні речовини із листя	Найкращий розчинник — етиловий спирт 80 %, потужність 720 Вт, час ~6.5 хв. [30]
Mentha piperita (м'ята перцева)	Феноли, флавоноїди, хлорофіли, загальний антиоксидантний потенціал	Після обробки мікрохвилями значно зросла концентрація фенолів (порівняно з необробленими зразками) [31]
Moringa oleifera насіння	Олія, зокрема жирні кислоти	МАЕ скоротило час екстракції з ~8 годин (традиційний метод) до ~1 години; одержано ~42 % вихід олії при оптимальних умовах (співвідношення твердого/рідкого, потужність, температура) без значної зміни складу жирних кислот [32]
Cinnamomum iners листя	Поліфеноли, загальна антиоксидантна активність	Оптимум: час ~24-25 хв, потужність ~150-250 Вт, співвідношення рослина:розчинник (solid:liquid) близько 1:60–1:130, 50-70 % етанолу. Зниження IC ₅₀ (краще антирадикальна активність) [33]

Таблиця 3

Екстракти, що найчастіше використовуються для поліпшення стійкості рослин і їх відновлення

Рослинний матеріал	Цільові компоненти	Результат
Люцерна	Тріаконтанол, цитокінінів	природний жирний спирт, що посилює фотосинтез та зростання рослин. [34]. Покращує фотосинтез та зростання
Хвощ польовий	кремнієва кислота	Підсилює клітинні стінки, підвищує стійкість до грибкових захворювань, знижує стрес від посухи [35].
Кропива	Мікроелементи, органічні кислоти	допомагає відновленню після пошкоджень [36]
Часник, верба	саліцилат	Стимулюють імунну відповідь [37]

Методи використання рослинних екстрактів у сільському господарстві

Застосування	Ступінь розведення	Метод використання
Листове оброблення	1:10	обприскування вранці або ввечері без прямого сонця до змочування листа 1 раз на 7–14 днів
Полив під корінь	1:5	Полив 0,5-1 л на рослину після звичайного поливу 1 раз на 2-3 тижні
Розсада та стресовані рослини	1:20	Полив після пересадки розсади, після заморозків, обробки пестицидами, при посуші або перегріві, уповільнення росту.

екстракт на основі кропиви, хвоща та люцерни надає стимулюючу та адаптогенну дію на рослини томату, підвищуючи ростові показники та стійкість до стресу. Згідно дослідженням Мурада А. А. та ін. [38], для томатів рекомендується комбінований рослинний екстракт на основі кропиви для харчування та відновлення рослини, хвоща польового для посилення стійкості до хвороб та люцерна, що посилює ріст та фотосинтез.

При застосуванні мікрохвильової обробки підготовлену сировину спочатку обробляють у мікрохвильовому полі для руйнування целюлозної тканини та інтенсифікації виходу цільового компонента при подальшій екстракції. Мікрохвильовий режим повинен бути організований таким чином, щоб температура не перевищувала 60–65 °С. Переважними є імпульсні режими.

Для досліджень рекомендуються екстракти з розведенням 1:20, 1:10 та 1:5 при мікрохвильовій та традиційній підготовці сировини, контроль – обробка розсади водою. Співвідношення компонентів, що рекомендується, наступне: кропива – 50 г, хвощ – 30 г, люцерна – 20 г (на 1 л води).

Для вирощування розсади рекомендуються наступні умови: температура 22-25 °С, фотоперіод 14 год, вологість 60-70%.

Обробка полягає в листовому обприскуванні до повного змочування листа 1 раз на 7 днів, тривалістю 21 день. Необхідно фіксувати такі показники: висота рослини, довжина кореня, суха та сира маса.

Під час підготовки сировини свіже листя та стебла слід очистити від гнилі та забруднень, потім 100 г подрібненої свіжої сировини або 20 г

сухої сировини залити 1 літр дистильованої води з температурою 30–40 °С.

Для контролю ефекту через 5–10 днів оцінюють колір листя, тургор, швидкість зростання та появу нового листя.

Можливі помилки при використанні екстрактів полягають у надто високій концентрації, обробці в спеку, зберіганні екстракту більше 48 годин, змішуванні з агресивною хімією.

Висновки. Методи МАЕ з певними робочими умовами можуть бути ефективно використані для екстракції рослин, при цьому продуктивність МАЕ залежить від правильного налаштування обладнання та процедури екстракції з оптимізованими робочими параметрами. Система МАЕ вважається перспективним методом екстракції рослин.

Мікрохвильове екстрагування має значний потенціал завдяки швидкості та селективності, однак нерівномірний нагрів, обмежена глибина проникнення та низький ККД істотно стримують його широке промислове застосування. Для подолання цих проблем необхідні оптимізація конструкції апаратів, комбінування з іншими методами нагріву, точний контроль параметрів процесу.

При застосуванні мікрохвильової обробки підготовлену сировину спочатку обробляють у мікрохвильовому полі для руйнування целюлозної тканини та інтенсифікації виходу цільового компонента при подальшій екстракції. Мікрохвильовий режим повинен бути організований таким чином, щоб температура не перевищувала 60–65 °С. Переважними є імпульсні режими.

Список літератури:

1. Кузьменко О. Б. Органічне землеробство як фактор євроінтеграції України. Вісник Полтавської державної аграрної академії. 2013. № 3. С. 151–155. <https://doi.org/10.31210/visnyk2013.03.32>.
2. Павленко О. Органічне землеробство як механізм забезпечення сталого продовольчого виробництва. Bulletin of Sumy National Agrarian University. 2025. № 1 (101). С. 15–19. <https://doi.org/10.32782/bsnau.2025.1.3>.
3. Nikumani C., Arvind Y. Organic Agriculture: Conventional farming vs organic farming. 2020. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4971958>.
4. Tyrus M., Lykhochvor V., Olifir Y. Green mass of amaranth as an alternative of mineral fertilizers. Foothill and mountain agriculture and stockbreeding. 2024. Vol. 75, no. 1. P. 120–131. [https://doi.org/10.32636/01308521.2024-\(75\)-1-11](https://doi.org/10.32636/01308521.2024-(75)-1-11).

5. Godlewska K., Ronga D., Michalak I. Plant extracts – importance in sustainable agriculture. *Italian Journal of Agronomy*. 2021. Vol. 16, no. 2. <https://doi.org/10.4081/ija.2021.1851>.
6. Chaudhary M. V., Thakur N. Future Prospects of Organic Farming: A Review. *Bhartiya Krishi Anusandhan Patrika*. 2021. <https://doi.org/10.18805/bkap274>.
7. Patel R., Makwana V. M. Natural Organic Compounds in Organic Farming: Roles, Mechanisms, and Future Prospects – A Narrative Review. *Biointerface Research in Applied Chemistry*. 2026. Vol. 16, no. 1. <https://doi.org/10.33263/briac161.002>.
8. Riley H., Bakkegard M. Declines of soil organic matter content under arable cropping in southeast Norway. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Plant Soil Science*. 2006. Vol. 56, no. 3. P. 217–223. <https://doi.org/10.1080/09064710510029141>.
9. Changes in Soil Organic Carbon Stocks and Chemical Properties in Organogenic Soils Under Long-Term Agricultural Use in Central Europe, Poland / E. Zając et al. *Land Degradation & Development*. 2025. 36 (11). P. 3756–3768. <https://doi.org/10.1002/ldr.5597>.
10. Meta-analysis reveals declines in terrestrial but increases in freshwater insect abundances / R. van Klink et al. *Science*. 2020. Vol. 368, no. 6489. P. 417–420. <https://doi.org/10.1126/science.aax9931>.
11. Frank R., Braun H. E., Ripley B. D. Residues of insecticides, and fungicides in fruit produced in Ontario, Canada, 1986–1988. *Food Additives and Contaminants*. 1990. Vol. 7, no. 5. P. 637–648. <https://doi.org/10.1080/02652039009373929>.
12. Residues of Fungicides and Insecticides in Rice Field / G. M. Teló et al. *Agronomy Journal*. 2015. Vol. 107, no. 3. P. 851–863. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0475>.
13. Ліхо О. А., Гакало О. І. Формування зон забруднення підземних вод нітратами на території рівненської області. *Bulletin National University of Water and Environmental Engineering*. 2024. Т. 2, № 94. С. 72–83. <https://doi.org/10.31713/vs220217>.
14. Dynamics study of the underground water biological pollution (Ukr) / L. L. Bereziuk et al. *Scientific Works of Vinnytsia National Technical University*. 2025. No. 2. <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2025-2-176-181>.
15. Jha, A. K., Sit, N. Extraction of bioactive compounds from plant materials using combination of various novel methods: A review. *Trends in Food Science & Technology*. 2022. Vol. 119. P. 579–591. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.11.019>.
16. Adrien. *Plant extracts for organic farming: Professional guide*. Home. [https://blog.landema.com/en/natural-solutions/pest-control/botanical-extracts-organic-farming/..](https://blog.landema.com/en/natural-solutions/pest-control/botanical-extracts-organic-farming/)
17. Extraction by solvent using microwave and ultrasound-assisted techniques followed by HPLC analysis of Harpagoside from *Harpagophytum procumbens* and comparison with conventional solvent extraction methods / B. Baghdikian et al. *Comptes Rendus Chimie*. 2016. Vol. 19, no. 6. P. 692–698. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2016.02.020>.
18. Green extraction of secondary metabolites from plants: obstacles, current status, and trends / D. Torres-Ortiz et al. *Sustainable Chemistry for the Environment*. 2024. P. 100157. <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2024.100157>.
19. Bioactive compounds from plants and by-products: Novel extraction methods, applications, and limitations / A. A. Zaky et al. *AIMS Molecular Science*. 2024. Vol. 11, no. 2. P. 150–188. <https://doi.org/10.3934/molsci.2024010>.
20. Electromagnetic Fields and Electromagnetic Waves / S. Horikoshi et al. *Microwave Chemical and Materials Processing*. Singapore, 2024. P. 37–51. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-97-5795-4_3.
21. Simsek M., Sumnu G., Sahin S. Microwave Assisted Extraction of Phenolic Compounds from Sour Cherry Pomace. *Separation Science and Technology*. 2012. Vol. 47, no. 8. P. 1248–1254. <https://doi.org/10.1080/01496395.2011.644616>.
22. Brahim, M., Gambier, F., Brosse, N. Optimization of polyphenols extraction from grape residues in water medium. *Industrial Crops and Products*. 2014. Vol. 52. P. 18–22. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.10.030>.
23. Integral Extraction of *Opuntia ficus-indica* Peel Bioproducts via Microwave-Assisted Hydrodiffusion and Hydrodistillation / R. Ciriminna et al. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2019. Vol. 7, no. 8. P. 7884–7891. <https://doi.org/10.1021/acsuschemeng.9b00502>.
24. Microwave assisted extraction of anthocyanins from grape skins / A. Liazid et al. *Food Chemistry*. 2011. Vol. 124, no. 3. P. 1238–1243. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.07.053>.
25. Extraction of antioxidants from mango seed kernel: Optimization assisted by microwave / C. Torres-León et al. *Food and Bioproducts Processing*. 2017. Vol. 105. P. 188–196. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.07.005>.
26. Solvent free microwave extraction of *Elletaria cardamomum* L.: A multivariate study of a new technique for the extraction of essential oil / M. E. Lucchesi et al. *Journal of Food Engineering*. 2007. Vol. 79, no. 3. P. 1079–1086. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.03.029>.
27. Michel T., Destandau E., Elfakir C. Evaluation of a simple and promising method for extraction of antioxidants from sea buckthorn (*Hippophaë rhamnoides* L.) berries: Pressurised solvent-free microwave assisted extraction. *Food Chemistry*. 2011. Vol. 126, no. 3. P. 1380–1386. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.09.112>.

28. Green approach to the extraction of major capsaicinoids from habanero pepper using near-infrared, microwave, ultrasound and Soxhlet methods, a comparative study / J. Martínez et al. *Natural Product Research*. 2018. Vol. 33, no. 3. P. 447–452. <https://doi.org/10.1080/14786419.2018.1455038>.

29. The Influence of Microwave-Assisted Extraction on the Phenolic Compound Profile and Biological Activities of Extracts from Selected *Scutellaria* Species / J. Oracz et al. *Molecules*. 2023. Vol. 28, no. 9. P. 3877. <https://doi.org/10.3390/molecules28093877>.

30. The effect of ethanol/water concentration on phenolic composition, antioxidant, and antimicrobial activities of *Rosmarinus tournefortii* de Noé hydrodistillation solid residues / I. Ziani et al. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01722-6>.

31. The Influence of Microwave Treatments on Bioactive Compounds and Antioxidant Capacity of *Mentha piperita* L. / L. Bandici et al. *Materials*. 2022. Vol. 15, no. 21. P. 7789. <https://doi.org/10.3390/ma15217789>.

32. Microwave-Assisted vs. Conventional Extraction of *Moringa oleifera* Seed Oil: Process Optimization and Efficiency Comparison / D. E. S. Souza et al. *Foods*. 2024. Vol. 13, no. 19. P. 3141. <https://doi.org/10.3390/foods13193141>.

33. Optimization of Microwave-Assisted Extraction Process for Production of Polyphenol-Rich Crude Extract from *Cinnamomum iners* Leaves / K. Tanruean et al. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, no. 3. P. 1265. <https://doi.org/10.3390/app15031265>.

34. Gardner F. P. *Physiology of Crop Plants*. SENTIFIC, 2022. 327 p.

35. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. Elsevier, 2012. URL: <https://doi.org/10.1016/c2009-0-63043-9>.

36. *Biostimulants in Agriculture* / ed. by Y. Rouphael, G. Colla. Frontiers Media SA, 2020. URL: <https://doi.org/10.3389/978-2-88963-558-0>

37. *Plant Immunity* / ed. by J. M. McDowell. Totowa, NJ : Humana Press, 2011. URL: <https://doi.org/10.1007/978-1-61737-998-7>.

38. Murad A. A., Al-wagaa A. H., Hammad H. S. Effect of soil covering and spraying with plant extracts in vegetative growth properties of tomato. *Diyala Agricultural Sciences Journal*. 2019. Vol. 11, no. 1. P. 34–44. <https://doi.org/10.52951/dasj.19110104>.

Fateeva K.O. APPLICATION OF MICROWAVE HEATING IN THE EXTRACTION OF BIOLOGICALLY ACTIVE COMPOUNDS FROM PLANT MATERIALS

The problem of efficient extraction and utilization of biologically active compounds from plant materials using various extraction methods is considered. The main focus of the work is on extracts intended for use in agriculture to enhance plant resistance. The application of innovative extraction methods, one of which is microwave extraction as a non-toxic and sustainable technique, ensures a more environmentally friendly product that does not contain hazardous chemical substances. Based on the results of an analytical review, it has been established that the use of new and combined technologies increases extraction efficiency, reduces the amount of impurities in the final extract, and preserves thermosensitive compounds while lowering energy consumption. The determining extraction conditions that must be maintained regardless of the method are presented. The results of applying the microwave extraction method for the recovery of biologically active compounds from various raw materials are discussed. It is demonstrated that the microwave extraction method makes it possible to achieve a high concentration of biologically active substances under optimal solid-to-solvent ratio conditions. It has also been determined that solvent-free microwave extraction can be carried out using the residual water contained in plant materials, which minimizes additional reactions. Examples of the effective use of microwave fields for extracting various substances are provided, including the microwave power, solvent type, and processing time. The application of plant extracts to improve plant resistance and recovery is discussed. A methodology for laboratory studies of the efficiency of microwave extraction of biologically active compounds from a mixture of nettle, horsetail, and alfalfa for tomato seedlings is proposed. The microwave regime should be organized in such a way that the temperature does not exceed 60–65 °C, with pulsed modes being preferable.

Keywords: extract, efficiency, temperature, microwave field power, technical conditions, research methodology.

Дата першого надходження статті до видання: 18.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026