

УДК 532.082.2:544.034.54:664.29

<https://doi.org/10.31548/humanhealth.1.2024.20>

ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИКОРІЮ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ МІКРОБІОЛОГІЧНИХ ТА ДЕРИВАТОГРАФІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Попова Інна Володимирівна,*Доктор філософських наук, професор,*<https://orcid.org/0000-0003-0332-2681>,*Національний університет харчових технологій,**01601, вул. Володимирська, 68, м. Київ, Україна.***Василів Володимир Павлович,***Кандидат технічних наук доцент,*<https://orcid.org/0000-0002-2109-0522>,*Національний університет біоресурсів і природокористування України,**03041, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, Україна.***Паламарчук Ігор Павлович,***Доктор технічних наук професор,*<https://orcid.org/0000-0002-0441-6586>,*Національний університет біоресурсів і природокористування України,**03041, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, Україна.***Муштрук Наталія Михайлівна,***Здобувач ступеня доктора філософії,*<https://orcid.org/0000-0002-3292-9063>,*Національний університет біоресурсів і природокористування України,**03041, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, Україна.***Кукла Олексій Васильович,***Здобувач ступеня доктора філософії,*<https://orcid.org/0009-0005-0465-0136>,*Національний університет біоресурсів і природокористування України,**03041, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, Україна.*

Анотація. Наявність великої кількості важких металів у рослинах і ґрунтах, які використовуються для вирощування сільськогосподарських культур, постійно впливає на екологічну безпеку відповідного середовища. Збільшення концентрації мікроелементів та сполук важких металів в рослинних тканинах призводить до порушень обміну речовин рослинних і тваринних організмів. Таким чином, тривалий вплив високих концентрацій важких металів та їх сполук у ґрунті і рослинах може спричиняти патологічні зміни або порушення біологічних процесів. Аналіз взаємодії мікро- і макронутрієнтів з вуглеводними складовими рослинної сировини цикорію ставить на меті можливе нивелювання негативного впливу утворених комплексів на загальний екологічний стан навколишнього середовища. Для проведення дослідження використано неагресивний метод рентгенофлуоресцентного аналізу біологічно-активних сполук, що є найбільш точним та ефективним з точки зору часу проведення експерименту. Дериватографічні методи дослідження, або комбіновані методи термічного аналізу, дозволяють одночасно отримувати в автоматичному режимі дані про зміну маси речовини і швидкості цієї зміни, а також отримувати фізико-хімічні характеристики таких процесів. Вибір традиційних методів аналізу, зокрема тонкошарової хроматографії, спектрофотометрії, вимірювання кута поляризації, електрофорезу, зумовлено відносною простотою і точністю одержаних даних. Результати досліджень, проведених щодо вмісту мікроелементів та їх взаємодії з вуглеводами

рослинної інуліновмісної сировини, показали, що вміст 20 макро- та мікроелементів у коренях цикорію визначали методом рентгенофлуоресцентного аналізу. Дослідження підтвердило закономірність зміни вмісту мікроелементів в залежності від термічної обробки, зокрема в жорстких умовах. За результатами проведених досліджень, встановлено, що термічна обробка коренів цикорію, зокрема їх смаження, суттєво поліпшує мінеральний склад цієї рослинної сировини. Розроблений метод неструктивного аналізу вмісту мінеральних компонентів у рослинній сировині, що використовує вуглеводи як матрицю для вимірювань, дозволяє отримувати достовірні результати. Доведено, що тип вуглеводу майже не впливає на результати аналізу. На базі отриманих даних розроблено серію стандартних зразків для визначення вмісту елементів, таких як Cd, Zn, Pb та Hg, і побудовані відповідні калібрувальні криві. Дослідженням дериватографії підтверджено утворення комплексів кальцію та магнію з інуліном, а також стабілізацію сахаридів при комплексоутворенні з названими елементами та визначає подальшу стратегію зменшення негативного впливу зазначених сполук на живі організми.

Ключові слова: вплив на навколишнє середовище, інулін, вуглеводи, цикорій, мікроелементи, рентгенофлуоресцентний аналіз, дериватографічні термoeфекти.

UDC 532.082.2:544.034.54:664.29

<https://doi.org/10.31548/humanhealth.1.2024.20>

ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL SAFETY AND TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF CHICORY BASED ON THE RESULTS OF MICROBIOLOGICAL AND DERMATOGRAPHIA STUDIES

Inna Popova,

Doctor in Philosophical Sciences,

<https://orcid.org/0000-0003-0332-2681>,

National University of Food Technology,

01601, 68 Volodymyrska Str.t, Kyiv Ukraine.

Volodymyr Vasylyv,

PhD in Technical Sciences,

<https://orcid.org/0000-0002-2109-0522>,

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,

03040, 15 Heroiv Oborony Str., Kyiv, Ukraine.

Igor Palamarchuk,

Doctor in Technical Sciences,

<https://orcid.org/0000-0002-0441-6586>,

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,

03040, 15 Heroiv Oborony Str., Kyiv, Ukraine.

Natalia Mushtruk,

Postgraduate Student,

<https://orcid.org/0000-0002-3292-9063>,

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,

03040, 15 Heroiv Oborony Str., Kyiv, Ukraine.

Oleksii Kukla,

Postgraduate Student,

<https://orcid.org/0009-0005-0465-0136>,

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,

03040, 15 Heroiv Oborony Str., Kyiv, Ukraine.

Abstract. The presence of a large amount of heavy metals in plants and soils used for growing agricultural crops constantly affects the environmental safety of the respective environment. An increase in the concentration of trace elements and compounds of heavy metals in plant tissues leads to disturbances in the metabolism of plant and animal organisms. Thus, long-term exposure to high concentrations of heavy metals and their compounds in soil and plants can cause pathological changes or disruption of biological processes. The analysis of the interaction of micro- and macronutrients with the carbohydrate components of chicory plant raw materials aims at the possible leveling of the negative impact of the formed complexes on the general ecological state of the environment. The non-destructive method of X-ray fluorescence analysis of biologically active compounds was used to conduct the research, which is the most accurate and effective from the point of view of the time of conducting the experiment. Derivatographic methods of research, or combined methods of thermal analysis, allow simultaneously to obtain data on the change in the mass of a substance and the speed of this change in an automatic mode, as well as to obtain the physical and chemical characteristics of such processes. The choice of traditional methods of analysis, in particular thin-layer chromatography, spectrophotometry, measurement of the polarization angle, electrophoresis, is determined by the relative simplicity and accuracy of the obtained data. The results of research conducted on the content of microelements and their interaction with carbohydrates of vegetable inulin-containing raw materials showed that the content of 20 macro- and microelements in chicory roots was determined by X-ray fluorescence analysis. The study confirmed the regularity of changes in the content of trace elements depending on heat treatment, in particular in harsh conditions. Based on the results of the research, it was established that the heat treatment of chicory roots, in particular their frying, significantly improves the mineral composition of this plant material. The developed method of non-destructive analysis of the content of mineral components in vegetable raw materials, which uses carbohydrates as a matrix for measurements, allows obtaining reliable results. It has been proven that the type of carbohydrate has almost no effect on the results of the analysis. Based on the obtained data, a series of standard samples was developed to determine the content of elements such as Cd, Zn, Pb and Hg, and the corresponding calibration curves were constructed. The derivatography study confirmed the formation of calcium and magnesium complexes with inulin, as well as the stabilization of saccharides when complexed with the mentioned elements and determines the further strategy for reducing the negative impact of these compounds on living organisms.

Keywords: environmental impact, inulin, carbohydrates, chicory, trace elements, X-ray fluorescence analysis, derivatography thermal effects.

ВСТУП. Коренева частина цикорію є джерелом унікальних складових, таких як інулін, бета-каротин, тіамін, піродоксин, рибофлавін, фолієва кислота та різноманітні вітаміни. Інулін, як потужний пребіотик, сприяє підвищенню захисних функцій організму. Бета-каротин, як природний антиоксидант, нейтралізує вільні радикали, запобігаючи розвитку онкологічних захворювань (Kos et al., 2021). Фолієва кислота та вітамін Е підвищують функціональність серцево-судинної та імунної системи. Тіамін та піродоксин сприяють поліпшенню обміну речовин, витривалості і роботі нервової системи. Холін сприяє очищенню печінки від зайвого жиру, а рибофлавін регулює життєдіяльність клітин і впливає на репродуктивні функції. Проте багато структурних елементів цикорію представляють певну екологічну небезпеку, концентрація яких залежить переважно від особливостей місцевості, де вирощується ця рослина.

Утилізація відходів виробництв агропромислового комплексу призводять до антропогенного забруднення повітря, води та, відповідно, ґрунту. Серед екологічно небезпечних сполук відзначаються катіони металів, різноманітні шкідливі мікроелементи, важкі та токсичні метали, які здатні накопичуватися в структурі рослин та організмів людей та тварин. Взаємодія системи ґрунт-рослина призводить до інфільтрації вказаних елементів у кореневу систему рослин (Marangu, 2020; Zavadzka et al., 2023).

Згідно з даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, серед найнебезпечніших важких металів є свинець, ртуть і кадмій. Свинець може значно пригнічувати ріст та порушувати надходження заліза до клітин, що призводить до розвитку хлорозу (Palamarchuk *et al.*, 2023). Допустима концентрація свинцю у сільськогосподарських культурах для харчових продуктів становить 1-5 мг/кг сухої речовини, для овочевих і зернових культур – 0,3 мг/кг, для кормів – до 10 мг/кг. Кадмій, який має схожі хімічні властивості до цинку, може заміщувати його у багатьох біохімічних процесах, що призводить до порушення роботи ферментів і розвитку хлорозу листків, стебел та черешків. Це може призвести до нестачі цинку, пригнічення росту рослин та їх загибелі. Допустима концентрація кадмію у харчових продуктах складає 70 м/кг на добу для дорослих, а для дітей взагалі є недопустимою (Steiner *et al.*, 2018; Komar *et al.*, 2021).

За останні 5 років, дослідниками було виявлено високу токсичність таких біологічно активних елементів, як берилій, миш'як, селен, сурма, талій, нікель, олово, ванадій. Загалом, державні стандарти класифікують токсичні хімічні елементи за рівнями гігієнічної небезпеки (табл. 1).

Таблиця 1. Розподіл токсичних хімічних елементів за класами гігієнічної небезпеки (Kos *et al.*, 2021)

Токсичні елементи		
1-й клас	1-й клас	3-й клас
миш'як, берилій, ртуть, селен, кадмій, свинець, цинк, фтор	миш'як, берилій, ртуть, селен, кадмій, свинець, цинк, фтор	барій, ванадій, вольфрам, марганець, стронцій

Перевищення припустимої межі концентрації цинку на рівні вище 200-400 мг/кг сухої маси рослин може спричинити його фітотоксичність, що проявляється у втраті кольору та відмиранні листової тканини. Марганець має властивість призводити до радикальних змін, спричиняючи хлороз між жилками молодих листків, що призводить до їхнього забарвлення в жовті або блідо-білі відтінки з темно-коричневими або навіть практично білими плямами. Такі ж симптоми можуть бути також викликані дією магнію, калію та кальцію. При надмірній кількості кобальту, фосфору та кальцію у деяких рослин може спостерігатися некроз між жилками. Всі ці елементи містяться в цикорі (табл. 1) та можуть вважатися потенційно небезпечними для екосистеми.

Серед негативного вмісту шкідливих речовин у корисних рослин, спостерігається тенденція у харчовій промисловості до створення продуктів, які мають розширений спектр функціоналу. Ці продукти збагачуються корисними мінеральними компонентами та біологічно активними речовинами, що позитивно впливають на здоров'я. Використання рослин з різноманітним вуглеводним складом, зокрема цикорію, є важливим аспектом цієї тенденції (Felix, 2020). Цикорій виділяється серед інших рослин завдяки його високому вмісту інуліну та інших корисних сполук. Більше того, цикорій дозволяє впроваджувати різноманітні харчові технології завдяки його технологічній обробці, що робить його привабливим в різних харчових продуктах.

Інформація про хімічний склад цикорію, яка подана у науковій літературі, потребує додаткових наукових досліджень для розробки ефективних технологій. Зокрема, необхідно провести дослідження взаємодії інуліну та його структурних компонентів з мінеральними та органічними елементами рослинної сировини. Це дослідження впливає на процес виділення інуліну з цикорію та подальший процес гідролізу. Пошук оптимальних умов для перетворення інуліну цикорію на фруктозо-олігосахаридні продукти потребує детального дослідження як фізико-хімічних властивостей складу коренеплодів цикорію, так і взаємодії між їх компонентами. Це вивчення впливає на стабільність вихідних, проміжних та кінцевих продуктів гідролізу інуліну, а також на процес виділення інуліну з рослинної сировини та його подальшу фрагментацію (Xu *et al.*, 2016; Derevianko *et al.*, 2022).

Дослідження зміни вмісту мінеральних речовин та інших компонентів у коренях цикорію, які містять важкі або токсичні метали, потребують глибокого та комплексного аналізу. Ці елементи цикорію відіграють значну роль у поживних процесах та взаємодіють з органічними компонентами через різноманітні хімічні процеси, що відбуваються на різних етапах життєвого циклу рослини.

Мета даної роботи полягає в обґрунтуванні екологічної безпеки та в оцінці технологічних можливостей використання цикорію. Крім того, вона передбачає вивчення умов для стабілізації процесу утворення сахаридного комплексу в цикорію.

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ. Провівши аналіз результатів наукової роботи (Tereshchenko *et al.*, 2022) встановлено, що вміст рухомих форм металів визначає рівень їх токсичності. Тому для оцінки потенційної небезпеки ґрунтів доцільно використовувати валовий вміст важких металів у рослинах.

За результатами дослідження, проведеного авторами наукової статті (Carter *et al.*, 2019), було доведено, що такі рухливі сполуки шкодять біоценозу ґрунту. Згідно з експериментальними дослідженнями авторів (Pyas *et al.*, 2019; Bulygin *et al.*, 2020), встановлено, що гранично допустимий вміст міді, цинку та нікелю в рослинах коливається в межах 100, 50 та 300 мг на 1 кг сухої речовини; в той час як автори статті (Zheplinska *et al.*, 2021a) стверджують, що максимально допустимий вміст міді, цинку та нікелю в рослинах коливається між 50, 4 та 23 мг на 1 кг сухої речовини. Значно нижчі концентрації регулюються для таких елементів, як берилій: 0,1 мг/кг; кадмій: 0,015 - 0,5; хром: 0,2 - 1,0; ртутний: 0,05 - 0,1; фтор: 0,3 - 0,4; свинець: 0,06; селен: 0,2 - 2,0; олово: 0,8 - 6,0 (Tkach *et al.*, 2022).

Протягом останнього десятиліття на фоні постійного зростання популярності альтернативних цукро замінників спостерігається активний розвиток виробництва вуглеводних замінників, серед яких особливе місце займають глюкозно-фруктозні сиропи та сиропи з високим вмістом фруктози (Zheplinska *et al.*, 2021b). У контексті загального світового виробництва цукру на рівні близько 130 мільйонів тон, обсяг виробництва цукрових замінників становить приблизно 15-20 мільйонів тон цукрового еквівалента (Shevchuk *et al.*, 2022). Рослини, багаті на інулін – природний полімер фруктози, які включають топінамбур і цикорій, стають об'єктом підвищеного інтересу серед вчених, які працюють над розробкою методів для отримання високофруктозних сиропів (Langenaeken *et al.*, 2019; Blahopoluchna *et al.*, 2023).

Розробка технологій для виготовлення високофруктозних сиропів – складний і міждисциплінарний процес, який може об'єднувати дослідження вчених за різними галузями, таких як агрономія, переробка, біологія та ензимологія (Palamarchuk *et al.*, 2022). Особливо це стосується виробництва високофруктозних сиропів, які отримують методом промислової хроматографії, що вимагає використання складного та вартісного обладнання (Hamouda *et al.*, 2018). Щоб забезпечити безперебійну роботу цього обладнання, необхідно провести ретельне очищення вуглеводних сиропів за допомогою полімерних іонообмінних смол. Це означає, що процес виробництва високо-фруктозних сиропів включає послідовне застосування двох хроматографічних методів, які потребують уважного нагляду та контролю з багатьох параметрів для забезпечення оптимальних результатів (Maslova *et al.*, 2019).

Відповідно до рукопису (Duke *et al.*, 2018; Mineralova, Parfeniuk and Mineralov, 2021), було встановлено кількість (у мг) мінеральних складових, таких як натрій (4,4 мг), калій (1,92 мг), марганець (12 мг), кальцій (26 мг), залізо (0,7 мг) та фосфор (25 мг). Таким чином, автори прагнули експериментально з'ясувати компонентний склад кореня цикорію та його вплив на хімічні перетворення в технологічному процесі.

Оцінка екологічної безпеки та технологічних характеристик цикорію на основі мікробіологічних та дериватографічних досліджень, наочно свідчить про важливість цих досліджень у сучасній науці. Результати мікробіологічного аналізу дозволять оцінити рівень безпеки використання цикорію як продукту, а дериватографічні дослідження розкривають його

хімічний склад та властивості. Це забезпечує наукову базу для подальших досліджень щодо оптимізації технологічних процесів виробництва та регулювання впливу цикорію на довкілля та здоров'я людини. Такий комплексний підхід дозволяє забезпечити якість продукції та зберегти екологічну стійкість у вирощуванні та використанні цикорію.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ. Проводили розширене дослідження вмісту хімічних елементів у свіжих коренях цикорію за допомогою рентгено-флуоресцентного спектрометра-аналізатора від Elvateх (із використанням програмного забезпечення Elva X) в автоматичному режимі для виявлення 60 елементів, які вважалися найбільш важливими.

Перед аналізом зразки матеріалу були попередньо висушені та подрібнені. Детектування характеризується двома режимами роботи рентгенівської трубки: зі струмом 15 мкА і 35 мкА. Також було проведено порівняння елементного складу надземної (листя, стебла) та підземної (коренів) частин цикорію з метою вивчення розподілу мікро- та макроелементів у функціональних частинах рослини.

Додатково, для оцінки впливу термічної обробки на вміст мінеральних компонентів, елементний склад висушених зразків порівнювали зі складом аналогічних зразків зольної фази.

Аналіз елементного складу вуглеводневмісної сировини методом рентгенофлуоресценції. Виявлення вмісту металів є ключовим аспектом оцінки якості рослинної сировини, існування чого визначається як проблема. Традиційні методи аналізу зазвичай потребують значних зусиль і часу. У зв'язку з цим, пошук та застосування недеструктивних методів, таких як рентгенофлуоресцентний аналіз, стають логічним кроком. Останнім часом цей метод набуває все більшої популярності. Це досягається шляхом детального аналізу мікроелементного складу рослинної сировини з використанням розробленого методу неруйнівного аналізу. Цей метод відрізняється від інших тим, що використовує вуглеводи як матрицю для вимірювань, що забезпечує більш точні результати та високу надійність даних. Такий підхід дозволяє виявити складні взаємозв'язки між хімічними компонентами цикорію та забезпечити більш глибоке розуміння його фізіологічних та технологічних властивостей.

У рентгенофлуоресцентному аналізі проба піддається первинному рентгенівському випромінюванню від трубки. Це призводить до виникнення вторинного рентгенівського випромінювання від проби, характер якого залежить від кількісного та якісного складу зразка. Механізм збудження рентгенівської флуоресценції пояснюється наступним чином: рентгенівські фотони первинного випромінювання трубки вибивають електрони з атомів, що знаходяться на К-оболонці, найближчій до атомного ядра. Електрони з більш віддалених від ядра оболонок (L, M та інші) заповнюють вакантні місця, що виникають в результаті цього процесу, що призводить до виникнення вторинного рентгенівського випромінювання.

Існує зв'язок між довжиною хвилі спостереженого випромінювання, квантовими числами та атомним номером елементу (1):

$$\lambda^{-1} = R \cdot (Z - k)^2 [n_1^{-1} - n_2^{-1}] \quad (1)$$

де, λ – довжина хвилі спостережуваного рентгенівського випромінювання;

Z – атомний номер елемента;

n_1 і n_2 – основні квантові числа ($n_2 < n_1$), що визначають енергетичні рівні, на які і з яких переноситься електрон відповідно;

$k = 1-1,5$, що означає, що для обраної К-серії візьмемо $k = 1$;

$R = 1,09 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ – постійна Рідберга.

З представленої рівняння закону Мослі, де величина, обернена довжині хвилі спостережуваної рентгенівської лінії ($v/s = \lambda$), пропорційна квадрату атомного номера елемента, можна зробити висновок, що визначивши довжину хвилі рентгенівського випромінювання, відповідну конкретному електронному переходу, наприклад, $L \rightarrow K$, $M \rightarrow K$ і т. д., можна легко визначити атомні номери елементів у зразку. Це дозволяє проводити якісний аналіз зразка, визначати характерні рентгенівські лінії та їх довжини. Для якісного рентгенофлуоресцентного аналізу енергія поліхроматичного випромінювання рентгенівської трубки повинна бути рівною або більшою за енергію, необхідну для вибивання К-електронів елементів, що входять у склад зразка. При цьому спектр вторинного рентгенівського випромінювання міститиме характерні рентгенівські лінії, довжина яких відповідає даним в довідкових таблицях.

Для кількісного аналізу методом рентгенофлуоресценції важливо виміряти інтенсивність характерних ліній випромінювання. Інтенсивність цього виду випромінювання від зразка, що аналізується, має прямий вплив на оцінку кількісного складу матеріалу і залежить від декількох чинників: потужності випромінювання рентгенівської трубки та її спектрального складу; концентрації відповідного елемента у зразку, яка визначається загальною кількістю його атомів; товщини зразка (при невеликій товщині півки зразка інтенсивність зростає, оскільки більше атомів зразка стають в стан збудження, а в оптимальних межах інтенсивність пропорційна товщині); природи матеріалу зразка, яка включає характер і вміст домішок – так званий матричний ефект, що обумовлений поглинанням частини первинного випромінювання домішками.

Рівняння Вольфа-Брегга використовується для обчислення довжин хвиль аналізованих елементів (2):

$$\lambda = 2d \sin \theta \quad (2)$$

де, λ – довжина хвилі випромінювання аналізованого елемента;

d – міжплоскощинна відстань плоскої системи, яку можна визначити як товщину напівпрозорого матеріалу;

θ – кут відбиття первинного рентгенівського випромінювання від кристала.

Метод тонкошарової хроматографії в фіксованому шарі. Необхідність контролювати склад продуктів гідролізу інуліну створює потребу у методиках контролю, які є легкими у використанні, дозволяють отримувати стабільні результати та мають низький час виконання одного експерименту.

Хроматографічні методи якісного та кількісного аналізу вуглеводів, такі як паперова, газова, рідинна, газорідинна, колонкова та тонкошарова хроматографія, найбільше відповідають цим вимогам. Вони є простими в обладнанні, зручними та точними.

Після проведення порівняльного аналізу різних видів хроматографії ми вирішили використовувати тонкошарову хроматографію. Це обрано через те, що хроматографічний процес у тонкому шарі сорбента дозволяє ефективно розділяти аналізовані суміші на їх компоненти, що базується на різниці у швидкості руху компонентів у шарі адсорбента.

У порівнянні з колоночною хроматографією, у тонкошаровій хроматографії (ТШХ) речовини, які розділяються, можуть дифундувати не лише вздовж колонки, але й в поперечному напрямку. Основними силами, які впливають на рух у ТШХ, є капілярні сили та сили дифузії. Порівняно з паперовою хроматографією, дифузія в тонкому шарі менше впливає на розширення плям, що покращує розділення компонентів суміші.

Методика визначення вмісту вуглеводів у розчинах за допомогою ТШХ широко відома і описана в багатьох літературних джерелах (Hamouda et al., 2018).

Спектрофотометричні методи дослідження складу складних сполук неорганічних іонів з органічними лігандами. Серед різноманітних методів спектрофотометричного аналізу

комплексних сполук, описаних у науковій літературі, було обрано метод Асмуса, відомий як прямолінійний метод. Цей метод використовується для визначення складу низькостабільних комплексів. Очікується, що при взаємодії інуліну та його структурних компонентів з іонами кальцію та магнію утворюються відповідні комплекси. Важливою умовою застосування цього методу є відсутність поглинання в цій спектральній області вихідними компонентами.

Метод Асмуса видається передусім перспективним у порівнянні з іншими методами, оскільки він дозволяє правильно визначити склад комплексу навіть у випадках, коли концентрація вихідних розчинів реагуючих компонентів не встановлена або абсолютно невідома. Іншою перевагою є здатність працювати з забрудненими препаратами, за умови, що самі домішки не утворюють комплексів з компонентами основної реакції. Крім того, метод відрізняється простотою виконання вимірювань і наступних розрахунків.

Оскільки утворені комплекси не мали забарвлення, ми вирішили використати методику Асмуса не для вимірювання зміни оптичної щільності, а для аналізу зміни поляризації розчинів.

Дериватографічні методи дослідження, або комбіновані методи термічного аналізу, дозволяють одночасно отримувати в автоматичному режимі дані про зміну маси речовини і швидкості цієї зміни, а також отримувати фізико-хімічні характеристики таких процесів, що в свою чергу використовується для вивчення термічної стабільності хімічних сполук, їх реакцій в твердій фазі, процеси зневоднення, термічного руйнування полімерів та ін.

Комбінований метод DTA-TG-TNP включає диференціальний термічний аналіз (DTA), динамічну термогравіметрію (TG) та похідну термогравіметрію (DNP). Принцип методу ДТА полягає в зіставленні термічних властивостей зразків досліджуваної речовини і термічно інертного речовини, яке вважається еталоном. Зафіксований параметр - це різниця їх температур, яка виникає в процесі нагрівання зразка з постійною швидкістю.

При наявності фазових переходів у системі, які супроводжуються поглинанням або виділенням тепла під час нагрівання досліджуваної речовини, на кривій зміни температури можуть спостерігатися відхилення від плавного ходу в залежності від характеру цих перетворень.

Це можуть бути як горизонтальні ділянки, так і різкі вигини температурної кривої. При цьому відхилення вниз від плавного ходу температурної кривої свідчать про наявність ендотермічних ефектів, а відхилення в бік збільшення - про екзотермічні ефекти. Зазвичай процеси адсорбції, кристалізації і структурно зв'язаної води характеризуються ендотермічними ефектами, а вторинні взаємодії продуктів руйнування - екзотермічними.

У динамічній термогравіметрії (ТГ) зміна маси зразка реєструється в залежності від температури, коли температура змінюється з постійною швидкістю (3):

$$m = f(T) \quad (3)$$

У методі похідної термогравіметрії записується похідна зміни маси з часом як функція температури (4) :

$$dm/d\tau = f(T) \quad (4)$$

Результуюча крива є першою похідною кривої зміни маси, де площа під піками на кривій пропорційна абсолютній зміні маси вибірки. Порівняння положень і площ піків на дериватограмах дозволяє порівняти термічну стабільність з'єднань, зокрема, зробити висновок про наявність комплексів і стабілізуючий ефект комплексоутворення.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ. Для досягнення оптимальних умов перетворення інуліну цикорію на продукти фруктозо-олігосахаридної природи необхідно провести комплексне дослідження як хімічного складу коренеплодів цикорію, так і взаємодії між їх складовими. Цей

аналіз впливає як на стійкість вихідних, проміжних та кінцевих продуктів гідролізу інуліну, так і на ефективність процесу виділення інуліну з рослинної сировини та його подальшу перетворення.

Огляд літератури за останні 3 роки виявив певні не відповідності у вивченні хімічного складу коренеплодів цикорію, зокрема стосовно мінеральних компонентів, тож потрібні додаткові дослідження та уточнення. Макро- та мікроелементи, присутні у його складі, не лише є важливими поживними речовинами, проте вони також можуть бути активно включені до перетворень органічних компонентів.

Також слід звернути увагу на можливу взаємодію органічних сполук у складі цикорію, зокрема біополімерів, які становлять значну частину маси коренів – вуглеводів і білкових сполук. Ця взаємодія практично не досліджувалася за звичайних умов, але може впливати на хід технологічних процесів переробки цикорної сировини.

Тому ми приділяємо особливу увагу дослідженню вмісту окремих хімічних елементів та сполук у коренеплодах цикорію, а також їх взаємодії.

На першому етапі досліджень ми здійснили якісне визначення вмісту хімічних елементів у свіжих коренях цикорію. Дослідження проводилися за допомогою рентгенівської спектральної флуоресцентної аналізу (РСФА) з використанням програмного забезпечення Elva X фірми "Elvatech" у автоматичному режимі для виявлення 60 елементів, які вважалися найбільш ймовірними.

Зразки матеріалу перед аналізом були попередньо висушені та подрібнені. Якісне виявлення проводили в двох режимах роботи рентгенівської трубки – зі струмом на рентгенівській трубці 15 μA і 35 μA .

Проведені дослідження показали, що у вивчених зразках було виявлено присутність від 13 до 15 елементів при струмі на рентгенівській трубці 15 μA та до 20 елементів з 60 заданих при струмі на рентгенівській трубці 35 μA . Даний факт свідчить про абсолютну відсутність нереєстрованих складових або їх присутність у незначних слідових кількостях.

За результатами проведених експериментів видно, що найбільш поширеними за кількістю є типові живильні елементи, такі як кальцій (Ca) та калій (K). У помітних кількостях також містяться залізо (Fe), марганець (Mn), мідь (Cu) та олово (Sn). Відносний вміст елементів, таких як свинець (Pb), кадмій (Cd) та телур (Te), становить менше 0,5% у рослинній сировині.

Для вивчення розподілу мікро- та макроелементів по функціональним частинам рослини цикорію ми порівнювали елементний склад надземної (листя, стебла) та підземної частини (коренів). Висушені зразки порівнювали з аналогічними озоленими зразками, щоб оцінити вплив термічної обробки на вміст мінеральних компонентів (рис. 1-4).

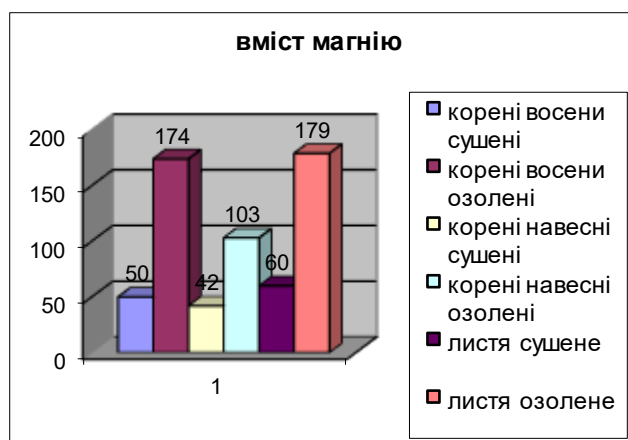


Рисунок 1. Вміст Mg в цикорії (*Cichorium*)

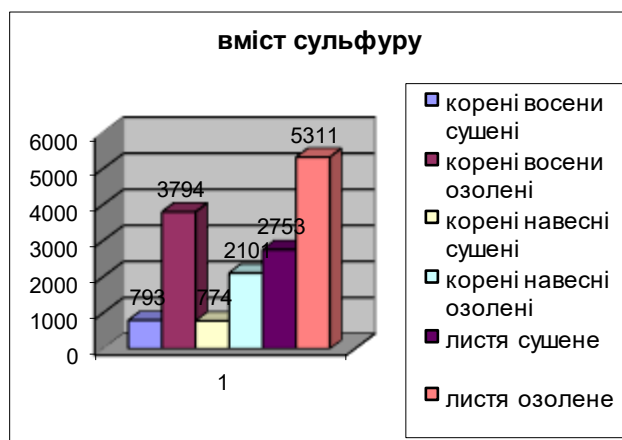


Рисунок 2. Вміст S в цикорії (*Cichorium*)

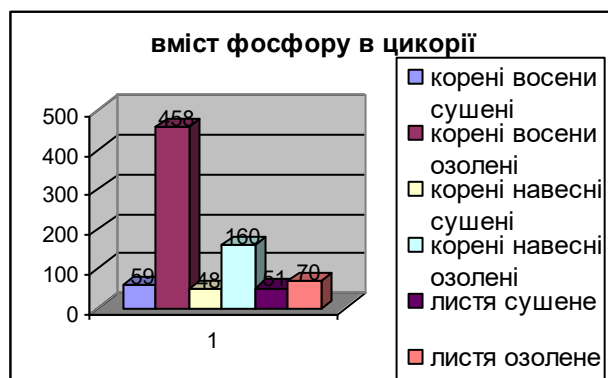


Рисунок 3. Вміст P в цикорії (Cichorium)

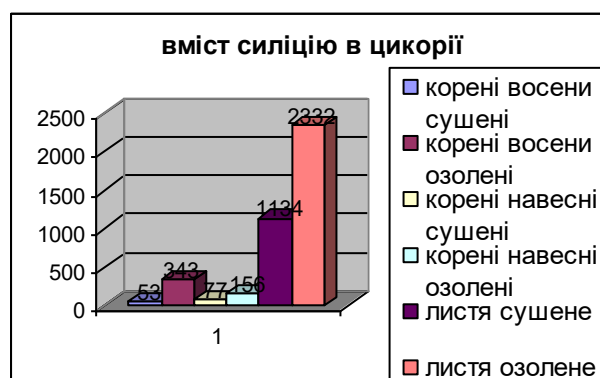


Рисунок 4. Вміст Si в цикорії (Cichorium)

В результаті проведених лабораторних експериментів виявлено цікаву тенденцію відносно змін у концентрації мікроелементів при різних температурних обробках, особливо в умовах високої температури. На графіках, представлених на рисунках 1-4, можна побачити варіації у вмісті живильних (тобто необхідних для здоров'я людини) елементів у різних частинах рослини цикорію. В усіх випадках спостерігалось збільшення кількості цих елементів під час термічної обробки. У той же час, для іншої групи елементів відбувалося зниження їх кількості в аналогічних умовах.

Отже, обробка коренів цикорію, зокрема їх обжарювання, має позитивний вплив на мінеральний склад цієї рослинної сировини.

Амінокислотний аналіз цикорію здійснювали за допомогою автоматичного аналізатора ТТТ 339. У таблиці 2 наведені одержані дані про амінокислотний склад свіжого цикорію та сушеного меленого порошку цикорію.

Таблиця 2 Амінокислотний склад свіжого цикорію та сушеного меленого порошку цикорію

Розрахунок на 100 см ³ зразка (10 см ³ у 20 см ³)						
Назва амінокислоти	Вміст амінокислоти, мг %					
	Свіжий цикорій			Порошок цикорію		
	Кількість, мг	% до мг	СКОР, %	Кількість, мг	% до мг	СКОР, %
Лізин	0,176	0,22	4	0,100	0,25	4
Гістидин	0,295	0,37		0,118	0,29	
Аргінін	1,208	1,53		0,806	1,99	
Аспарагінова кислота	1,538	1,95		1,131	2,79	
Треонін	1,322	1,67	42	0,416	1,02	26
Серін	0,772	0,98		0,309	0,76	
Глутамінова кислота	42,875	54,29		30,625	75,52	
Пролін	2,236	2,83		1,597	3,94	
Гліцин	0,668	0,85		0,436	1,08	
Аланін	3,847	4,87		0,804	1,98	
Цистин	0,133	0,17	11	0,080	0,20	13
Валін	6,201	7,85	157	1,447	3,57	71
Метіонін	0,173	0,22		0,104	0,26	
Ізолейцин	10,323	13,07	327	1,153	2,84	71
Лейцин	4,039	5,11	73	0,801	1,97	28

Тирозин	0,527	0,67	67	0,188	0,46	26
Фенілаланін	2,633	3,33		0,439	1,08	
Сума	78,967			40,553		

У живих організмах, так і в технологічних процесах, більшість перетворень хімічних, харчових та біоорганічних сполук відбувається за участю проміжних комплексних сполук різного ступеня стійкості. Зазвичай такі проміжні комплекси, які визначають механізм реакції у кожному конкретному випадку, є досить нестійкими. Однак за допомогою спеціальних методів контролю, що враховують особливості перебігу реакції у кожному випадку, можна виявити утворення таких проміжних сполук.

Для підтвердження взаємодії кальцію та магнію з інуліном, його полімергомологами та структурними компонентами, ми також провели дослідження методом дериватографії.

Подібні дослідження проводили науковці Українського державного університету харчових технологій стосовно крохмалю та модифікованих крохмалів (Hamouda *et al.*, 2018).

Загальновідомий факт, що кальцій має важливу роль у метаболічних процесах в людському організмі, наша увага спрямована переважно на взаємодію інуліну та його гідролізованих продуктів з цим елементом (Hamouda *et al.*, 2018; Kutovenko *et al.*, 2020).

Термограми досліджуваних зразків були записані за допомогою дериватографічної системи Paulic, Paulic, Erdey в температурному діапазоні від 20 до 500 °С. Отримані результати представлені в таблиці 2, а приклади дериватограм показані на рисунку 5. профіль кривої деформації та зменшення масових витрат порівняно з чистим інуліном.

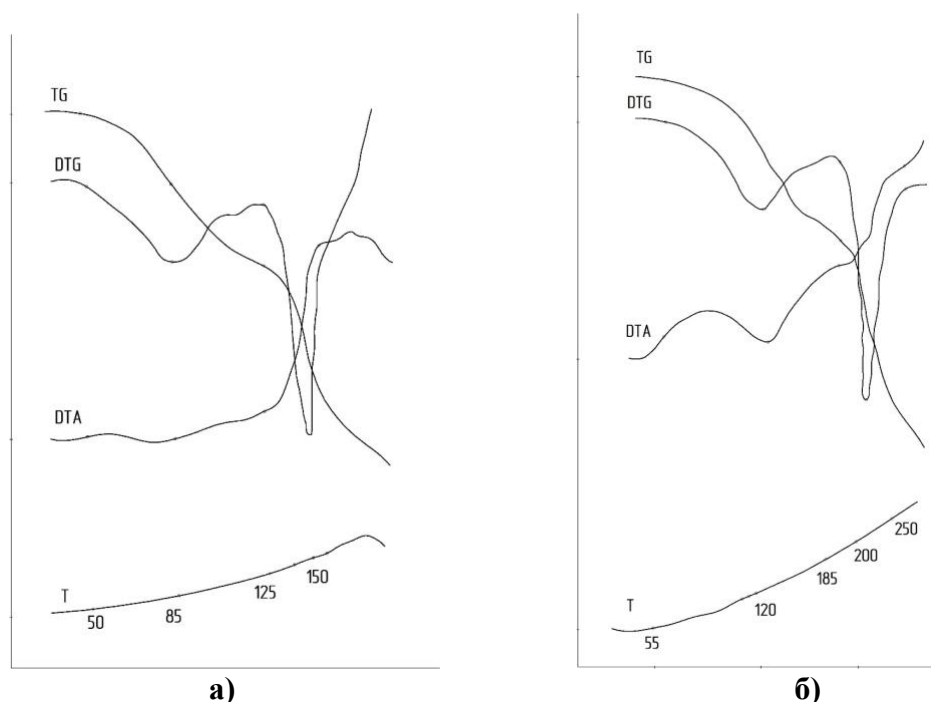


Рисунок 5. Графіки дериватограм для чистого інуліну (а) та інуліну з додаванням 4% іонів кальцію (б).

Порівняння дериватограм чистого інуліну, фруктози, глюкози, сахарози та тих же вуглеводів з додаванням солей кальцію підтвердило, що утворюються стабільні комплекси цих сахаридів з вказаними елементами. Наприклад, на отриманій кривій термоаналізу (ДТА) інуліну спостерігається слабо виражений ендотермічний пік близько 100 °С, пов'язаний з втратою

адсорбційної води і супроводжується незначною втратою маси. Помітна втрата маси починається приблизно з 185 °С. Додавання 4% і більше солі кальцію призводить до зміни

Таким чином, утворення комплексів з кальцієм сприяє зупинці деструкції полісахариду на ранній стадії, а зі зростанням кількості доданої солі кальцію спостерігається значна зміна положення і співвідношення цих екзотермічних максимумів через вторинну взаємодію продуктів термолізу інуліну з кальцієм.

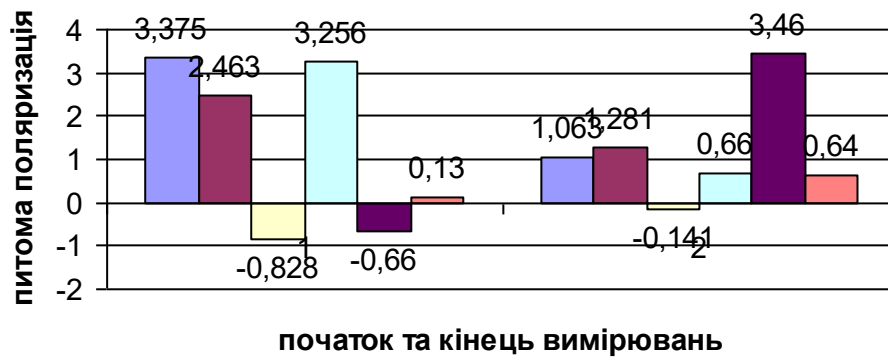
Для вивчення взаємодії вуглеводів з білковими речовинами, які зустрічаються в значних кількостях у майже всіх типах харчової сировини, ми створили модельні суміші «вуглевод-амінокислота» та «вуглевод-білок». Для цього ми випробували інулін та продукти його гідролізу, такі як моносахариди фруктоза і глюкоза, а також дисахарид сахароза. Для отримання більш повної інформації про вплив будови молекули вуглеводу, включаючи довжину ланцюга глікозних залишків, відновлювальну здатність тощо, на взаємодію з амінокислотами і білками та встановлення загальних закономірностей, ми додали до ряду продуктів безпосереднього гідролізу інуліну цикорію (фруктоза, глюкоза, сахароза) відновлювальний дисахарид лактозу, а також трисахарид рафінозу.

Для моніторингу змін у поведінці вуглеводів у присутності амінокислот та білків ми використовували вимірювання кута обертання площини поляризації у серіях досліджуваних сумішей. Ми припускали, що будь-які взаємодії оптично активної речовини з іншими речовинами призведуть до зміни значення поляризації вихідної сполуки. Тобто, зміни у поляризації розчину вуглеводу (при додаванні білкових речовин), які відрізняються від поляризації при звичайному розведенні, свідчать про наявність взаємодії між вуглеводом та доданою речовиною.

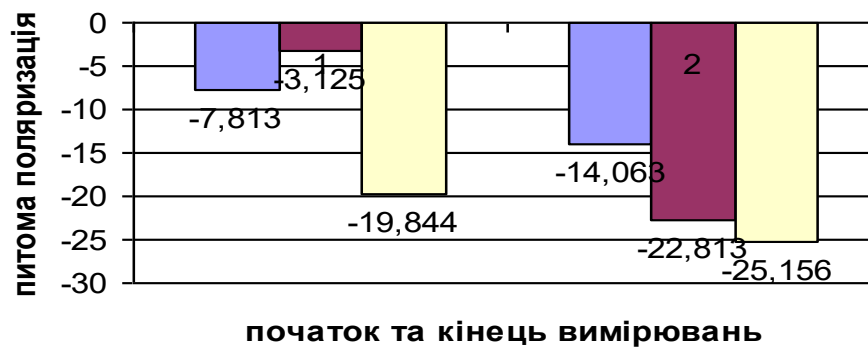
З метою уникнення помилок, що можуть виникнути внаслідок впливу інших оптично активних речовин при оцінці поляризації таких сумішей, на початкових етапах наших досліджень ми аналізували взаємозв'язок між вуглеводами та оптично неактивною амінокислотою – гліцином. Крім того, для того, щоб уникнути можливих змін у поляризації розчину внаслідок звичайної мутаротації, що характерна для моносахаридів та відновлювальних дисахаридів, ми досліджували взаємодію гліцину з сахарозою.

Взаємодію «вуглевод-амінокислота» в цілому вивчали у сумішах з молярними співвідношеннями 1:1, 1:2 та 2:1. У випадках, коли компонентами були біополімери, такі як інулін та альбумін, ми використовували відповідні масові співвідношення, враховуючи різницю у молекулярних масах полімеру та мономера. З іншого боку, у цих серіях дослідів, наприклад, глюкоза з альбуміном або гліцин з інуліном, мономер повинен взаємодіяти одночасно з кількома молекулами мономера по окремих ланках полімерного ланцюга.

Вимір поляризації проводили окремо у кожному розчині: спочатку відразу після їх змішування, а потім після кількох годин стояння при кімнатній температурі. Для прискорення взаємодії у деяких випадках реакційну суміш нагрівали. На рисунку 6 представлені діаграми залежності питомої поляризації систем "вуглевод-амінокислота" для інуліну та його основної структурної одиниці – фруктози під час взаємодії з оптично неактивною амінокислотою гліцином.



а)

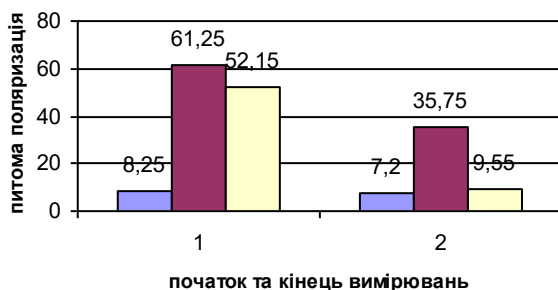


б)

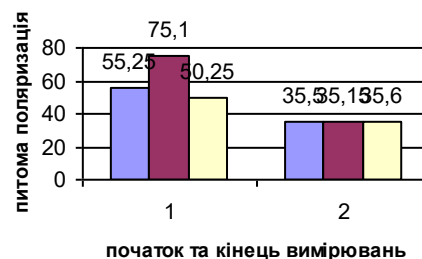
Рисунок 6. Графік змін питомої поляризації від складу системи: (а) інουλін – гліцин та (б) фруктоза – гліцин

Джерело: авторська розробка

Приклад діаграми залежності питомої поляризації системи «вуглевод-білок» наведений на рис. 7.



а)



б)

Рисунок 7. Взаємодія інуліну та окремої ланки макромолекули з білком: (а) – фруктоза-альбумін та (б) – інулін-альбумін

З порівняння результатів вимірювання поляризації зазначених розчинів очевидно, що в усіх досліджених сумішах помітно збільшується різниця між значеннями поляризації розчинів після певного часу реакції у порівнянні з початковими даними. Особливо вагомим є цей ефект у випадку сумішей амінокислоти з фруктозою, яка є ключовою структурною складовою молекули інуліну.

Оскільки вимірювання поляризації сумішей, в яких вуглевод та білкова сполука мають різні співвідношення, показує істотні відмінності, можна припустити, що утворюються комплекси вуглеводів з білками різного складу. Ці комплекси мають різні фізико-хімічні характеристики, включаючи оптичну активність

Цікавим є той факт, що перед досягненням певного сталого значення поляризації суміші вуглеводів з білками пройшли циклічні зміни. Іншими словами, криві змін значень поляризації в часі мають характер циклічних (рис. 8).

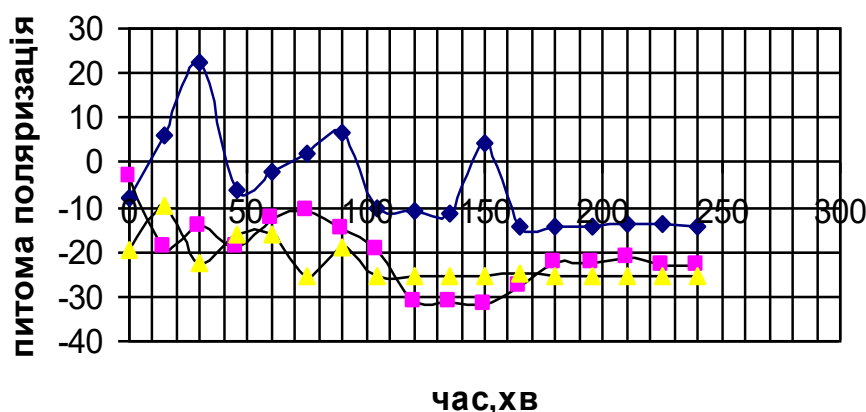


Рисунок. 8. Зміна поляризації суміші «фруктоза – гліцин» у часі.

Отже, на підставі результатів дослідження поляризації розчинів сумішей вуглеводів з амінокислотами та білками можна зробити висновок про взаємодію між цими біоорганічними сполуками. Ця взаємодія проявляється утворенням комплексів з різними співвідношеннями складових, що підтверджується різними значеннями питомого обертання таких сумішей.

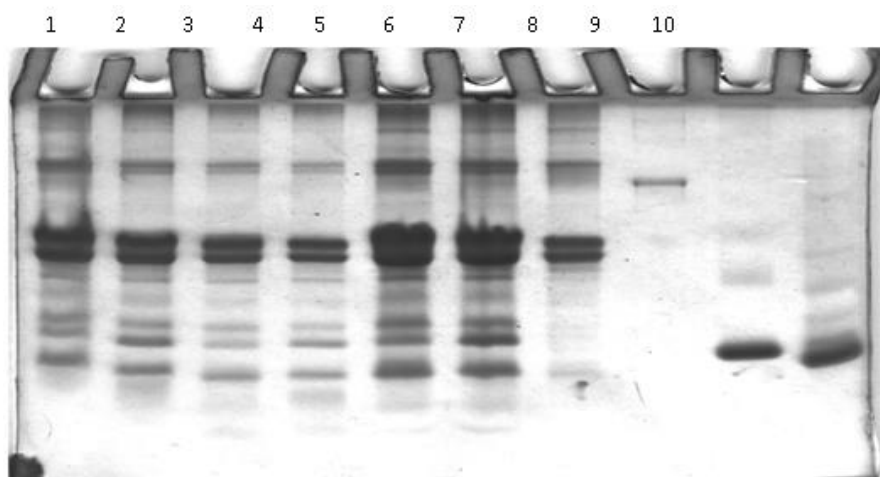


Рисунок 9. Електрофореграма результатів аналізу зразків з екстрактом цикорію (2, 4, 6 треки) і без нього (1, 3, 5 треки);

7 трек – препарат казеїну; 8 трек – альбумін (67 кДа); 9 трек – лізоцим (14,3 кДа); 10 трек – α-лактоглобулін (14,2 кДа).

Джерело: авторська розробка

Додатковим підтвердженням взаємодії вуглеводів, зокрема вуглеводів цикорію, з амінокислотами та білковими сполуками є результати електрофоретичних досліджень амінокислотного та білкового складу молока під час пастеризації в присутності екстракту цикорію.

Порівняння електрофоретичних характеристик молока з екстрактом цикорію і без нього показує, що за винятком білкових смуг з молекулярними масами в діапазоні 19-18, 104-102, 112-107, 120-118 кДа, у зразку молока з екстрактом цикорію відповідні білки мають меншу концентрацію порівняно зі зразком молока без екстракту. Відповідні дані наведені на рисунку 9.

Можна припустити, що внесення цикорію спричиняє дестабілізацію структури білків, що під час теплової обробки призводить до більшої денатурації та осадження їх порівняно зі звичайним молоком.

Збільшення концентрації окремих білкових смуг у зразку з екстрактом може свідчити про стабілізуючу дію цикорію саме на ці білкові зони під час теплової обробки, що призводить збільшення терміну зберігання.

Для підтвердження основних висновків досліджень було використано квантово-хімічне моделювання та оптимізацію геометрії молекули інуліну та інулоолігосахаридів за допомогою програмного забезпечення «HyperChem» версії 7.7. Встановлено, що інулоолігосахариди з 6–8 фруктозними ланками в основному мають спіралеподібну структуру, яка стабілізується за рахунок водневих зв'язків. Подальше збільшення розміру полімерного ланцюга призводить до формування глобулярної структури. Перехід молекул інуліну та інулоолігосахаридів у водний розчин спричиняє перетворення глобулярної структури у спіралевидну форму.

Просторова організація молекул інуліну та його полімергомологів має безпосередній вплив на ці перетворення, зокрема на процес гідролізу (рис. 10).

Була оптимізована геометрія структурних елементів молекули інуліну та розраховано розподіл ефективних зарядів на атомах кисню та водню, що дозволяє оцінити їх реакційну здатність, зокрема при гідролізі (рис.11).

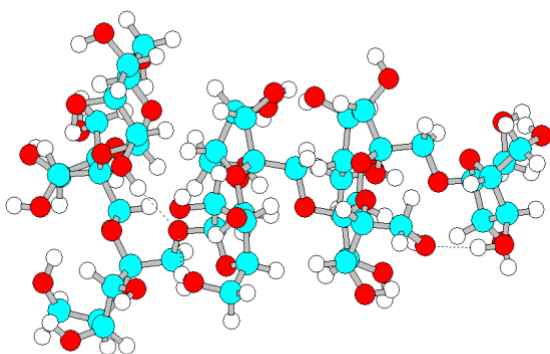


Рисунок 10. Геометрія молекули олігосахариду з 6 нарощеними залишками фруктози була оптимізована. На графічному зображенні пунктирними лініями показані водневі зв'язки

Джерело: авторська розробка

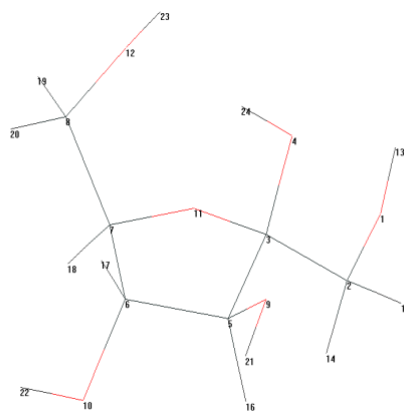


Рисунок 11. Результати квантово-хімічної оптимізації геометрії молекули β -D-фруктофуранози методом PM3.

Джерело: авторська розробка

Науковцями Національного університету харчових технологій (м. Київ) вивчали деякі фізико-хімічні властивості інуліну, зокрема дисперсні та фізико-механічні характеристики. Структуру інуліну, екстрагованого з топінамбура, вивчали спектроскопічними методами з використанням ізотопного H/D-обміну (Luo et al., 2019).

Автори з Нідерландів (Lv *et al.*, 2019, Rahim *et al.*, 2021) висловили думку, що деградація полімерів відбувається при більшості перетворень інуліну. А для з'ясування механізмів такої деградації потрібна інформація про молекулярну структуру як самого інуліну, так і його полімерних гомологів та його вплив на фізико-хімічні властивості та перетворення біополімеру.

Одним з аспектів таких досліджень є структурний аналіз інуліну та його структурних складових одиниць (фруктози, кетози, ністози, сахарози) методом ЯМР на ядрах дейтерію. Авторами проведено як експериментальні дослідження згаданих сполук, так і комп'ютерне моделювання спектральних характеристик ЯМР, що продемонструвало хорошу узгодженість з отриманими результатами.

Досліджено вплив цикорію на біотехнологічні властивості стислих дріжджів авторами (Sinkovič *et al.*, 2020; Zheplinska *et al.*, 2020c). Використання рослинних харчових добавок помітно підвищує ферментативну активність хлібопекарських дріжджів: зимазна активність зростає на 24–43 %, а мальтазна – на 24–42 %. Додавання таких речовин збагачує хлібобулочні вироби вітамінами, макро- і мікроелементами, а також поліпшує якість хліба

Результати досліджень (Ipirangama *et al.*, 2022) підтверджують ефективність використання інуліну для поліпшення якості готових виробів при додаванні у дозі 5 % до маси борошна. Для ще більшого збагачення хлібобулочних виробів харчовими волокнами рекомендується застосовувати дозування інуліну 10 % до маси борошна, проте потрібно вживати технологічні заходи для забезпечення якості продуктів. Було встановлено, що зменшення об'єму виробів та збільшення пружних характеристик м'якушки обмежують можливості застосування інуліну у рецептурі виробів у кількості понад 10 % до маси борошна. Дослідники виявили, що додавання інуліну з цикорію підвищує пружність тіста, особливо при застосуванні дозування інуліну понад 10 %. Проте збільшення дози інуліну з цикорію до 15 % і більше разом з підвищенням пружних характеристик призводить до зниження еластичності тіста, що значно погіршує об'єм виробів.

Згідно з результатами дослідження (Moscatello *et al.*, 2023), можна зробити висновок, що для забезпечення переробних заводів достатньою кількістю коренів цикорію важливо використовувати науково обґрунтовану технологію вирощування та комплексний підхід до її впровадження. Зокрема, необхідно вдосконалити найбільш трудомісткий процес збирання, що призведе до зменшення пошкодження коренеплодів цикорію та втрат урожаю під час збирання.

У дослідженні, проведеному авторами (Ivanišová *et al.*, 2020), підтверджено перспективність використання порошку цикорію для створення нових сортів борошняних кондитерських виробів з підвищеною харчовою цінністю. Ці вироби рекомендовані як для широкого споживання, так і як продукти функціонального харчування. Дослідники встановили оптимальний відсоток додавання цикорієвого порошку, при якому зразок з вмістом 3% такої добавки відзначається кращими органолептичними та фізико-хімічними показниками. Додавання порошку кореня цикорію у кількості 3% призводить до підвищення міцності клейковини. Крім того, розроблено технологічну схему виробництва печива з використанням цикорієвого порошку. Отримані результати можуть бути використані для розробки та впровадження нового продукту функціонального призначення в масове виробництво.

Наші дослідження дозволили уточнити методи з'єднання моносхаридних ланок і їх взаємне розташування в молекулі полісахариду і його нижчих полімерних гомологах. Це безперечно впливає на перетворення цих біополімерів.

Дослідження з оцінки екологічної безпеки та технологічних характеристик цикорію за результатами мікробіологічних та дериватографічних досліджень відкривають широкий спектр перспектив для подальших досліджень. Ось кілька напрямків, які можна виокремити:

Дослідження впливу умов вирощування на якість цикорію: аналіз впливу різних агроекологічних умов, таких як ґрунтові властивості, кліматичні умови, використання добрив та обробіток, на екологічну безпеку та технологічні характеристики цикорію. Це допоможе оптимізувати методи вирощування для забезпечення високої якості продукції.

Створення нових сортів: використання результатів досліджень для розробки нових сортів цикорію з покращеними технологічними характеристиками та стійкістю до шкідливих мікроорганізмів. Це може включати селекцію на основі мікробіологічних досліджень для підвищення стійкості до хвороб або розробку гібридних сортів з покращеними властивостями.

Вивчення впливу обробки та зберігання на якість продукції: дослідження впливу різних методів обробки та зберігання на якість та екологічну безпеку цикорію. Це може включати дослідження різних методів сушіння, зберігання та пакування з метою збереження корисних властивостей рослини та запобігання забруднення.

Дослідження біологічної активності та медичного застосування: вивчення біологічно активних сполук, які містяться в цикорії, та їх впливу на здоров'я людини. Це може включати аналіз потенційного застосування цикорію у медицині та фармації для лікування різних захворювань або як дієтичний додаток.

Вплив на навколишнє середовище та сталість вирощування: вивчення екологічного впливу систем вирощування цикорію на навколишнє середовище, включаючи водні ресурси, ґрунти та біорізноманіття. Розробка більш стійких та сталіших систем вирощування може допомогти зменшити негативний вплив сільськогосподарської діяльності на довкілля.

Вказані напрямки досліджень можуть відігравати ключову роль у подальшому розвитку сільсько-господарської промисловості. По-перше, використання порошку цикорію для створення нових продуктів з підвищеною харчовою цінністю дозволяє розширити асортимент сільськогосподарської продукції і задовольнити попит споживачів на більш функціональні та здорові продукти. Подальші дослідження в цьому напрямку можуть призвести до створення ще більш ефективних формул та технологій, що позитивно впливає на якість продукції.

Зменшення негативного впливу на навколишнє середовище також є важливою складовою цих досліджень. Використання цикорієвого порошку як добавки може сприяти зменшенню використання штучних добавок та хімічних речовин у продукції. Крім того, оптимізація технологічних процесів та виробничих схем дозволяє зменшити витрати ресурсів та енергії, що сприяє зменшенню екологічного відбитку агропро-мислового сектору.

Отже, вказані напрямки досліджень не лише сприятимуть покращенню якості продукції, але й сприятимуть створенню більш стійких, екологічно чистих і ефективних практик у сільському господарстві.

ВИСНОВКИ. Істотною проблемою є забруднення рослинної сировини для харчової промисловості іонами важких і токсичних металів, серед яких можна відзначити кадмій, олово і свинець, концентрації яких в цикорії становлять 0,483 відповідно; 0.379; 2.319%. Вміст 20 макро- і мікроелементів в коренях цикорію визначали методом рентгено-флуоресцентного аналізу.

Було розроблено метод неруйнівного аналізу для вимірювання вмісту мінеральних компонентів у рослинній сировині, використовуючи вуглеводи як матрицю для проведення вимірювань. Застосування хіміко-аналітичних та дериватографічних методів дозволило детально вивчити комплексне утворення компонентів рослинної сировини цикорію. Зокрема, були проаналізовані полісахарид інулін та його структурні складові одиниці з іонами кальцію.

Наявні в літературі дані з фундаментальних досліджень будови інуліну і його полімерних гомологів розрізнені і недостатні для того, щоб стати основою для розробки науково обґрунтованих технологій гідролізу інуліну.

Останнім часом тенденція в харчовій промисловості до випуску функціональних продуктів, збагачених цінними мінеральними компонентами і біологічно активними сполуками, привертає увагу до використання для цієї мети носіїв інуліну. Зокрема, необхідно вивчити взаємодію інуліну і його структурних складових одиниць з мінеральними і органічними компонентами рослинної сировини, що впливає на вивільнення інуліну з цикорію і подальший процес гідролізу.

References

- Kos, T., Kuznietsova, I., Sheiko, T., et al. 2021. An improved method for determining the mass fraction of calcium carbonate in the carbonate bedrock. In *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 15, 877–890.
- Marangu, J. M. 2020. Effects of sulfuric acid attack Marangu on hydrated calcined clay-limestone cement mortars. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials* 1, 1-15.
- Palamarchuk, I., Tsurkan, O., Sevin, S., Palamarchuk, V., Vasylyv, V. 2023. Analysis of energy characteristics of vibration mixing of multicomponent mixtures of agricultural raw materials. *Animal Science and Food Technology*, 14(1), 65-79. doi: 10.31548/animal.1.2023.65
- Steiner, F., Zuffa, A., Machado, R. 2018. Could the supply of boron and zinc improve the resistance of potatoes to early blight? *Potato Research*, 61(2), 169-182 doi: 10.1007/s11540-018-9365-4
- Xu, J., Wang, X., Liu, X., Xia, J., Zhang, T., Xiong, P. 2016. Enzymatic in situ saccharification of lignocellulosic biomass in ionic liquids using an ionic liquid-tolerant cellulase. *Biomass and Bioenergy*, 93, 180-186. doi: 10.1016/j.biombioe.2016.07.019
- Tereshchenko, N., Kovshun, L., Bobunov, O. 2022. A hybrid technique for measuring the content of xenobiotics in wild and cultivated blueberries. *Plant and Soil Science*, 13(1), 51-59. doi: 10.31548/agr.13(1).2022.51-59
- Zavadska, O., Gunko, S., Bober, A., Yashchuk, N., Bondareva, L. 2023. Pumpkin fruit selection of different types and varieties for the production of functional food products. *Plant and Soil Science*, 14(3), 60-74. doi: 10.31548/plant3.2023.60
- Carter, C., Saitone, T. L., Schaefer, K. 2019. Managed trade: The US–Mexico sugar suspension agreements. *Canadian Journal of Economics/Revue canadienne d'économique*, 52(3), 1195-1222. doi: 10.1111/caje.12393
- Ilyas, R., Sapuan, S., Ibrahim, R., et al. 2019, Effect of sugar palm nano fibrillated cellulose concentrations on morphological, mechanical, and physical properties of biodegradable films based on agro-waste sugar palm (*Arenga pinnata* (Wurmb.) Merr) starch. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(5), 4819-4830. doi: 10.1016/j.jmrt.2019.08.028
- Zheplinska, M., Mushtruk, M., & Salavor, O. 2021a. Cavitation Impact on Electrical Conductivity in the Beet Processing Industry. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 755–762. doi: 10.1007/978-3-030-68014-5_73
- Tkach, O., Ovcharuk, V., Ovcharuk, O., Mazurenko, B., Niemiec, M. 2022. The chemical composition of chicory root ash (*Cichorium intybus* L.) depends on the yield level. *Plant and Soil Science*, 13(2), 35-44.
- Zheplinska, M., Mushtruk, M., Vasylyv, V., Slobodyanyuk, N., & Boyko, Y. 2021b. The Main Parameters of the Physalis Convection Drying Process. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 306–315. Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-030-77823-1_31
- Shevchuk, L., Vintskovska, Y., Babenko, S., Mazur, B., Havryliuk, O. 2022. Nutritional components of fresh and frozen fruits of highbush blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.). *Plant and Soil Science*, 13(4), 57-67. doi: 10.31548/agr.13(4).2022.57-67
- Langenaeken, N., De Schepper, C., De Schutter, D., Courtin, C. 2019. Different gelatinization characteristics of small and large barley starch granules impact their enzymatic hydrolysis and sugar production during mashing. *Food Chemistry*, 295, 138-146. doi: 10.1016/j.foodchem.2019.05.045
- Palamarchuk, I., Kiurchev, S., Verkholtantseva, V., Borodych, B., Lebska, T. 2022. Justification of power parameters of the process of semi-fluidisation freezing of fruit and berry products. *Animal Science and Food Technology*, 13(1), 39-46. doi: 10.31548/animal.13(1).2022.39-46
- Hamouda, R. A., Sherif, S. A., Ghareeb, M. M. 2018. Bioethanol production by various hydrolysis and fermentation processes with micro and macro green algae. *Waste and Biomass Valorization*, 9(9), 1495-1501. doi: 10.1007/s12649-017-9936-7

- Kutovenko, V., Kostenko, N., Yermilov A., Kutovenko V. 2020. Morphological-biometric assessment of asparagus hybrids (*asparagus officinalis* L.) in the steppe of Ukraine. Plant and Soil Science, 11(2), 67-73. doi: 10.31548/agr2020.02.067
- Maslova, O., Stepanov, N., Senko, O., Efremenko, E. 2019. Production of various organic acids from different renewable sources by immobilized cells in the regimes of separate hydrolysis and fermentation (SHF) and simultaneous saccharification and fermentation (SFF). Bioresource Technology, 272, 1-9 (2019). doi: 10.1016/j.biortech.2018.09.143
- Duke, S., Henson, C., Bockelman, H. 2018. Comparisons of Modern US and Canadian Malting Barley Cultivars with Those from Pre-Prohibition: III. Wort Sugar Production during Mashing. Journal of the American Society of Brewing Chemists, 76(2), 96-111. doi: 10.1080/03610470.2017.1402582
- Blahopoluchna, A., et al. 2023. The influence of chitosan on the raspberry quality during the storage process. Potravinárstvo Slovak Journal of Food Sciences, 17, 529-549). doi: 10.5219/1875
- Mineralova, V., Parfeniuk, A., Mineralov, O. 2021. Phytopathogenic mycobioma in organic production of raspberry (*Rubus idaeus* L.) cultivars J Jay and Himbo-Top. Plant and Soil Science, 12(1), 94-101. doi:10.31548/agr2021.01.0094
- Bulygin, S., Vitvitsky, S., Kucher, L., Bohdanovych, R., Zhuk, O. 2020. Influence of non-root fertilizer by microelements on ginseng yield. Plant and Soil Science, 11(1), 42-51. doi: 10.31548/agr202.01.042
- Felix, O. E. 2020. Production of Malt-based Sugar Syrup from Enzymatic Hydrolysis of Malted Sorghum and Millet Grains. Asian Food Science Journal, 1-17. doi: 10.9734/afsj/2020/v14i430134
- Zheplinska, M., Mushtruk, M., Vasylyv, V., et al. 2021c. The micronutrient profile of medicinal plant extracts. Potravinárstvo Slovak Journal of Food Sciences, 15, 528-535. doi: 10.5219/1553
- Luo, Q., Zhang, Y., Qi, L., & Scott, S. L. 2019. Glucose Isomerization and Epimerization over Metal-Organic Frameworks with Single-Site Active Centers. ChemCatChem, 11(7), 1903-1909. doi:10.1002/cctc.201801889
- Komar, O., Fedosiy, I., Siedova, O. 2021. The influence of abiotic factors on the growth and development of parsnip plants. Plant and Soil Science, 12(3), 100-110. doi: 10.31548/10.31548/agr2021.03.01
- Lv, S., Wang, R., Xiao, Y., et al. 2019. Growth, yield formation, and inulin performance of a non-food energy crop, Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.), in a semi-arid area of China. Industrial Crops and Products, 134, 71-79. doi: 10.1016/j.indcrop.2019.03.064
- Rahim, M. A., Saeed, F., Khalid, W., et al.: 2021. Functional and nutraceutical properties of fructooligosaccharides derivatives: a review. International Journal of Food Properties, 24(1), 1588-1602. doi:10.1080/10942912.2021.1986520
- Derevianko, O., Maherramzade, N., Derevianko, S. 2022. Evaluation of the biological effect of Zn nanocarboxylates and MoS₂ nanoparticles on corn sprouts (*Zea mays* L.). Plant and Soil Science, 13(2), 7-13. doi: 10.31548/agr.13(2).2022.7-13
- Sinkovič, L., Jamnik, P., Korošec, M., Vidrih, R., & Meglič, V. 2020. In-vitro and in-vivo antioxidant assays of chicory plants (*Cichorium intybus* L.) as influenced by organic and conventional fertilisers. BMC plant biology, 20, 1-10.
- Ilippangama, A. U., Jayasena, D. D., Jo, C., & Mudannayake, D. C. 2022. Inulin as a functional ingredient and their applications in meat products. Carbohydrate Polymers, 275, 118706.
- Moscatello, S., Battistelli, A., Mattioni, M., & Proietti, S. 2023). Yield, Fructans Accumulation, and Nutritional Quality of Young Chicory Plants as Related to Genotype and Nitrogen Fertilization. Agronomy, 13(7), 1752.
- Ivanišová, E., Drevková, B., Tokár, M., Terentjeva, M., Krajčovič, T., & Kačániová, M. 2020. Physicochemical and sensory evaluation of biscuits enriched with chicory fiber. Food science and technology international, 26(1), 38-43.

Отримано в редакцію 05.04.2024 р., прийнято до публікації 08.05.2024 р.