

СУЧАСНІ КОМБІНОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗАМОРОЖУВАННЯ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ЯКІСТЬ ФРУКТІВ І ОВОЧІВ

В. В. ЧОРНЕНЬКИЙ, здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти (доктор філософії)

В. В. ШУТЮК, доктор технічних наук

Національний університет харчових технологій

Розглянуто комбіновані способи заморожування фруктів та овочів, які є одними з найбільш перспективних технологій у сучасній харчовій промисловості. Проаналізовано вплив акустичної кавітації на швидкість нуклеації та ріст кристалів льоду, а також її вплив на якість заморожених плодів і овочів. Окрему увагу приділено дослідженню впливу ультразвукової обробки під час заморожування на розподіл розмірів кристалів льоду в тканинах рослинної сировини. Показано, що застосування осмотичної дегідратації фруктів та ягід перед заморожуванням дає змогу знизити температуру початку кристалізації та підвищити швидкість заморожування плодів.

Ключові слова: заморожування, фрукти, овочі, ультразвук, мікрохвилі, дегідратація, магнітне поле, високий тиск

Вступ. Овочі та фрукти належать до групи швидкопсувних харчових продуктів через високу масову частку вологи, яка для більшості видів становить 88–92 %. Це робить їх вразливими до дії мікроорганізмів, зокрема бактерій, грибів, а також до активності ферментів [1, 2]. Заморожування фруктів і овочів є однією з найбільш перспективних технологій у харчовій промисловості, оскільки дозволяє зберігати рослинну сировину протягом тривалого часу, у тому числі поза межами сезону її збирання, що сприяє подовженню терміну споживання продукції [3]. Разом з тим ринок заморожених фруктів зростає повільніше порівняно з ринком свіжої або охолодженої продукції, що пов'язано з погіршенням їх зовнішнього вигляду після заморожування. Проте зростаючий попит на здорові продукти харчування, а також на зручні у використанні харчові продукти, які відповідають потребам сучасного способу життя, зумовлює поступове підвищення популярності заморожених фруктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні методи заморожування харчових продуктів полягають у зниженні їх температури значно нижче 0°C. Згідно з міжнародними стандартами температура зберігання заморожених продуктів становить близько -18 °C. За такої температури більша частина вологи, що міститься в продуктах, переходить у кристалічний стан [4].

Оскільки вода в харчових продуктах містить розчинені сухі речовини, у процесі заморожування концентрація розчинів зростає, що призводить до виникнення осмотичних явищ. Цей процес характеризується ушкоджувальною дією, зумовленою підвищенням концентрації електролітів у некристалізованій

клітинній рідині. Негативний вплив проявляється насамперед у денатурації білків. Ступінь розвитку денатураційних процесів залежить не лише від концентрації електролітів, але й від значення рН середовища [5, 6].

Швидкість зниження температури під час заморожування харчових продуктів має суттєвий вплив на інтенсивність ушкоджувальних процесів.

У процесі холодильного зберігання заморожених продуктів у рослинних тканинах відбуваються значні зміни, зокрема дегідратація клітин унаслідок локалізації нуклеації льоду, пошкодження розчинених речовин, спричинені підвищенням концентрації внутрішньоклітинної рідини, а також механічні пошкодження, викликані ростом і розширенням кристалів льоду. Для ефективнішого збереження структури рослинних тканин більш сприятливою є позаклітинна нуклеація льоду, що пов'язано з наявністю гетерогенних центрів кристалізації.

Нині опубліковано численні дослідження щодо впливу заморожування на вміст таких поживних речовин, як вітамін С, антоціани та інші фенольні сполуки. Основні втрати вітаміну С під час замороженого зберігання та розморожування пояснюються ферментативною активністю плодів і овочів [7–9]. Щодо зміни вмісту антоціанів і фенольних сполук під час заморожування, дослідники відзначають як збільшення, так і зменшення їх концентрації [7, 10–13]. Зазвичай повідомляється про значні втрати антоціанів під час розморожування, тоді як вміст неантоціанових фенольних сполук, як правило, істотно не змінюється [8]. Разом з тим встановлено, що ступінь деградації антоціанів під час розморожування може відрізнятися для окремих їх форм. При цьому вплив розморожування на вміст неантоціанових фенольних сполук практично не спостерігається [8].

Важливим фактором також є зміна активності ферментів, зокрема пероксидази та поліфенолоксидази, які беруть участь у деградації фенольних сполук, у тому числі антоціанів [13]. Активність цих ферментів може суттєво впливати на стабільність кольору та якість кінцевого продукту. Процес заморожування також впливає на смак плодів, який визначається зміною вмісту цукрів та органічних кислот. Зміни у складі цукрів [14, 15], головним чином стосуються вмісту сахарози при заморожуванні, так і після розморожування спостерігається зниження вмісту сахарози [16, 17]. Також під час холодильного зберігання може змінюватися кислотність плодів [9].

Мета дослідження. Метою дослідження є аналіз використання комбінованих способів заморожування фруктів і овочів з метою підвищення їх якості та зменшення структурних пошкоджень тканин плодів, спричинених утворенням кристалів льоду. Для досягнення поставленої мети необхідно розглянути та проаналізувати вплив додаткових факторів на зміну швидкості процесу заморожування та розподіл вологи в харчовій матриці продуктів.

Методика досліджень. Матеріалами дослідження є наукові публікації, присвячені сучасним технологіям заморожування продукції рослинного походження в харчовій промисловості. Метод дослідження – аналіз і узагальнення наукової літератури щодо використання додаткових фізичних

факторів впливу на швидкість процесу заморожування та підвищення якості кінцевої продукції.

Результати досліджень. Заморожування з використанням ультразвуку. Ультразвукові технології дедалі ширше застосовуються в харчовій промисловості як для аналізу, так і для модифікації властивостей харчових продуктів. Дія ультразвуку низької частоти (20–100 кГц) пов'язана з виникненням ефекту акустичної кавітації, що супроводжується утворенням і колапсом кавітаційних бульбашок у рідкому середовищі та виділенням значної кількості енергії [18].

Під час акустичної кавітації утворюються газові пухирці, що призводить до збільшення площі міжфазної поверхні та інтенсифікації процесів газової дифузії. Встановлено, що кавітаційні явища можуть впливати на швидкість процесу заморожування та сприяти прискоренню утворення кристалів льоду [19]. Подібно до традиційних процесів заморожування продукції рослинного походження, технологію заморожування з використанням ультразвуку умовно поділяють на три основні етапи: попереднє охолодження продукту, фазовий перехід води (кристалізація льоду) та подальше зниження температури замороженого продукту.

Застосування ультразвуку під час заморожування харчових продуктів має суттєвий вплив на оптимізацію цього процесу. Під час заморожування ультразвукове опромінення викликає ефекти акустичної кавітації та мікропотоків, які підвищують інтенсивність тепло- та масоперенесення. Це, у свою чергу, збільшує швидкість нуклеації та сприяє формуванню дрібних кристалів льоду, рівномірно розподілених у мікроструктурі харчового продукту, що суттєво зменшує структурні пошкодження тканин [20, 21].

Дослідниками встановлено, що збільшення інтенсивності ультразвуку зменшує час досягнення стадії переохолодження, що, у свою чергу, скорочує загальний час заморожування. Водночас це сприяє підвищенню швидкості нуклеації та росту кристалів льоду. Таким чином, застосування ультразвукової технології дозволяє підвищити якість заморожених фруктів і овочів, а також зменшити втрати поживних речовин під час подальшого розморожування [22, 23].

Встановлено, що загальний час заморожування, а також тривалість окремих етапів – попереднього охолодження, фазового переходу та переохолодження – для броколі значно скорочуються при використанні ультразвукового заморожування з потужністю 150 Вт (30 кГц) або 175 Вт (20 кГц) за оптимального поєднання параметрів процесу, зокрема часу експозиції, температури ультразвукового опромінення та імпульсного режиму. Дослідники університету Цзяннань зазначають, що вибір оптимальних умов ультразвукового заморожування броколі має вирішальне значення для досягнення високої якості кінцевого продукту [24].

Польські дослідники Е. Янішевська та П. Саковський показали, що застосування ультразвукових хвиль частотою 21 кГц протягом 30 хв суттєво впливає на процес заморожування морквяного соку. Подібні результати отримали іранські вчені Mortazavi A. та Tabatabaie F., які встановили, що під час ультразвукової обробки вершків протягом 20 хв час їх заморожування

скоротився з 20 до 13 хв [25]. Аналогічні дослідження проводили Zheng L. та Sun D. (Ірландія), які встановили, що застосування ультразвуку потужністю 15,85 Вт підвищує ефективність процесу заморожування картоплі та скорочує його тривалість [26]. На основі отриманих результатів дослідники зазначають, що ультразвук є ефективним методом інтенсифікації процесу заморожування харчових продуктів.

Застосування ультразвуку під час імерсійного заморожування показало незначний вплив на зміну кольору плодів. При цьому використання ультразвуку в поєднанні з імерсійним заморожуванням не призводило до суттєвих відмінностей у зміні кольорових характеристик продукту [18]. Отримані результати підтверджують, що застосування ультразвуку під час заморожування є перспективною технологією для збереження кольору та якості рослинної сировини.

Заморожування за допомогою мікрохвиль. Використання мікрохвильових технологій забезпечує ефективне регулювання процесу утворення кристалів льоду в клітинній структурі харчових продуктів. Мікрохвильове випромінювання дозволяє зменшити утворення великих кристалів льоду, що є характерним для традиційних методів заморожування [27].

Зменшення розміру кристалів льоду дослідники пов'язують із явищем обертання молекул води під дією змінного електричного поля, яке створюється мікрохвильовим випромінюванням. Обертання молекул призводить до порушення водневих зв'язків і може сприяти формуванню більш дрібної та рівномірної кристалічної структури льоду [28]. Крім того, температурні коливання, що виникають унаслідок підвищення потужності мікрохвильового випромінювання, можуть спричинити часткове плавлення вже сформованих кристалів льоду та призводити до збільшення кількості центрів вторинної нуклеації.

Дослідження проводили з метою вивчення впливу низькоенергетичного мікрохвильового випромінювання під час заморожування яблук і картоплі на зміну мікроструктури тканин та кольору плодів [29]. За показниками якості встановлено, що застосування мікрохвиль під час заморожування сприяє більш однорідному розподілу розмірів кристалів льоду з підвищеною часткою дрібних кристалів. Згідно з результатами досліджень [20], збільшення кількості дрібних кристалів у харчових матрицях становить приблизно 15–20 %.

Нині з'являються технологічні системи, що дозволяють мінімізувати попередню теплову обробку рослинної сировини з метою кращого збереження її первинної якості або взагалі відмовитися від неї. Однією з таких технологій є мікрохвильове бланшування овочів, яке забезпечує значно краще збереження поживних речовин порівняно з традиційними методами бланшування [30, 31].

Головною перевагою технології мікрохвильового бланшування є здатність генерувати тепло безпосередньо всередині продукту та забезпечувати більшу глибину проникнення енергії в тканини. Це сприяє кращому збереженню термолабільних сполук. Мікрохвильове бланшування також призводить до підвищення антиоксидантної активності та кращого збереження зеленого кольору продуктів [32], а також характеризується меншими втратами поживних речовин і високою якістю кінцевої продукції.

Завдяки таким перевагам, як скорочений час оброблення та підвищена ефективність нагрівання, мікрохвильове бланшування може бути перспективною альтернативою традиційним термічним методам. Крім того, цей спосіб вважається «сухим» методом оброблення, що дозволяє зменшити утворення відходів і втрати розчинних поживних речовин.

Встановлено, що порівняно з бланшуванням парою або гарячою водою мікрохвильове бланшування забезпечує вищу антиоксидантну активність та краще збереження зеленого кольору спаржі [30], потребує коротшого часу оброблення і сприяє кращому збереженню аскорбінової кислоти у зеленій квасолі [32]. Крім того, під час мікрохвильового бланшування перцю спостерігається підвищення антиоксидантної активності внаслідок утворення похідних фенольних сполук.

Під час сублімаційного сушіння також досліджували процес попереднього заморожування капусти та моркви [33, 34]. У цих дослідженнях вивчався вплив мікрохвильової (холодної) стерилізації під час процесу сушіння. Зокрема, було проаналізовано вплив таких параметрів, як тиск, товщина шару сировини та вхідна потужність мікрохвильового випромінювання, на тривалість процесу сушіння та рівень мікробіологічного забруднення продукту.

Використання осмотичної дегідратації під час заморожування. Застосування заморожування при консервуванні фруктів із високою масовою часткою вологи може призводити до небажаних змін кольору, текстури та фізико-хімічних властивостей продукту [35]. Осмотична дегідратація є одним із поширених методів попередньої обробки рослинної сировини, який широко використовується у харчових технологіях при розробленні нових продуктів, оскільки позитивно впливає на хімічний склад та органолептичні властивості плодів і овочів [38–40]. Використання осмотичної дегідратації фруктів і ягід перед заморожуванням дозволяє знизити вміст вологи в сировині, що заморожується, і водночас підвищити концентрацію розчинних сухих речовин. Це дає змогу знизити температуру початку заморожування та підвищити швидкість кристалізації води в тканинах плодів.

Підвищення вмісту сухих речовин, як правило, сприяє збільшенню температури склеювання продукту, що розширює діапазон температур зберігання, за яких продукт перебуває у склоподібному стані. Низка досліджень показала, що попередня обробка із застосуванням осмотичної дегідратації скорочує тривалість процесу заморожування ананасів і винограду [36], сприяє збереженню текстури огірків та вмісту вітаміну С у помідорах [35], а також покращує колір, текстуру та вміст ароматичних сполук у манго [37].

Зокрема, встановлено, що помідори в результаті осмотичного зневоднення втрачали понад 15 % вологи після 24 годин дегідратації в 55 %-му розчині мальтодекстрину при температурі 35 °С. При цьому в осмотично зневоднених зразках із підвищеним вмістом лікопену спостерігалось більш інтенсивне почервоніння. Після розморожування шматочки помідорів характеризувалися меншими втратами міжклітинного соку, краще зберігали колір і вміст лікопену порівняно з необробленими зразками [40].

Застосування осмотичної попередньої обробки суниці перед заморожуванням сприяє збільшенню вмісту ключових ароматичних сполук у плодах, що дозволяє уникнути втрати якості продукції [41]. Крім того, метод осмотичної дегідратації є економічно доцільним, оскільки передбачає використання відносно простого обладнання та характеризується невеликими витратами енергії.

Застосування магнітного поля. Розвиток нових холодильних технологій без використання різноманітних харчових добавок стимулював дослідження застосування магнітного поля для заморожування харчових продуктів. Зокрема, здійснюються спроби використання статичних, змінних, коливальних та імпульсних магнітних полів різної інтенсивності та частоти.

Останні дослідження показують, що технології охолодження та заморожування із застосуванням магнітного поля можуть покращувати збереження якості харчових продуктів за рахунок зменшення розміру кристалів льоду та пригнічення активності ферментів. Ця технологія має низку переваг, зокрема низьке енергоспоживання, керованість процесу та безпечність, що робить її перспективною для широкого застосування в харчовій промисловості [42]. Разом з тим нині цьому напряму ще бракує всебічного аналізу механізмів впливу магнітного поля на процеси охолодження та заморожування різних видів харчових продуктів, зокрема фруктів і овочів, м'яса, рису та емульсій.

Технологія вважається особливо ефективною для заморожування продуктів із високим вмістом вологи, таких як полуниця, помідори, огірки та листова зелень, які раніше вважалися малоприсадними для цього способу консервування. Водночас аналіз проведених досліджень свідчить про наявність певних технологічних труднощів при впровадженні методів заморожування з використанням магнітного поля у промислових масштабах, що визначає необхідність подальших досліджень у цьому напрямі.

Використання високого тиску під час заморожування. Застосування високого тиску під час заморожування має значний потенціал, оскільки цей фактор відіграє важливу роль у фазовому переході води в лід. Використання високого тиску позитивно впливає на збереження клітинної структури харчових продуктів завдяки швидкому виникненню центрів нуклеації, що сприяє рівномірному формуванню мікроскопічних кристалів льоду [43, 44–47].

Встановлено, що за тиску близько 200 МПа температура замерзання води становить приблизно -22 °С. За таких умов зменшується інтенсивність кристалізації води та збільшується ймовірність її вітрифікації під час заморожування. Досягнення подібних термодинамічних умов сприяє мінімізації текстурних пошкоджень, спричинених утворенням кристалів льоду в тканинах фруктів і овочів [44].

У дослідженнях персиків і манго було оцінено мікроструктурний вплив високотискового заморожування. Результати показали, що початкова структура плодів ефективно зберігається, а текстурні властивості продукції залишаються майже незмінними. Крім того, ця технологія значно зменшує ризик утворення тріщин і великих кристалів льоду, які часто спостерігаються під час традиційного

заморожування [45]. Подібні результати отримано і при застосуванні високотискового заморожування для моркви та китайської капусти [46, 47].

Застосування кріопротекторів під час заморожування. Кріозахист харчових продуктів є перспективним напрямом досліджень, що активно розвивається та має численні інноваційні застосування. Цей підхід широко використовується в різних галузях, зокрема у харчовій та фармацевтичній промисловості.

Хоча заморожування є ефективним способом збереження якості та свіжості харчових продуктів, воно може спричиняти пошкодження їх структури. Під час заморожування вільна вода в харчових продуктах, як правило, кристалізується першою, тоді як зв'язана вода у тканинах плодів меншою мірою піддається цьому процесу [48–50]. Пошкодження клітин і тканин у харчовій сировині значною мірою пов'язане з перекристалізацією льоду [51]. Перекристалізація відбувається тоді, коли льодові кристали стають нестабільними внаслідок незначної різниці температур плавлення та розчинності між великими і малими кристалами. У результаті цього в харчових матеріалах відбуваються структурні зміни, зокрема змінюються форма, кількість, розмір і орієнтація кристалів льоду [53].

Перехід води у лід супроводжується збільшенням об'єму приблизно на 9 %, що може призводити до деформації продуктів і руйнування тканин свіжих фруктів та овочів. Особливо негативний вплив на якість заморожених продуктів має утворення великих кристалів льоду, які можуть викликати розтріскування тканин [52, 54, 55]. У випадку фруктів і овочів утворення внутрішньоклітинних та позаклітинних кристалів льоду може порушувати цілісність клітин, зокрема клітинних мембран, що призводить до розм'якшення тканин і втрати тургору [56]. Такі структурні пошкодження зумовлюють втрати води, мінеральних речовин і вітамінів під час розморожування, що ще більше погіршує текстуру продукту [55]. У зв'язку з цим дослідники активно вивчають використання кріопротекторів, які здатні зменшувати негативні наслідки заморожування та підвищувати стабільність структури харчових продуктів під час кріоконсервації [57].

Однією з груп кріопротекторів є гідроколоїди, які можуть бути отримані природним шляхом із рослинної, тваринної або мікробної сировини. До прикладів таких речовин належать рослинні екsudати, камеді насіння рослин, крохмаль, пектин, модифікований крохмаль та желатин [58]. Встановлено, що використання ксантанової камеді (0,4 %) ефективно зменшує втрати текстури під час заморожування попередньо нарізаної моркви. Дослідження із застосуванням кріопротекторів при заморожуванні огірків, моркви та кабачків показали підвищення їх свіжості після розморожування [59].

Дослідження впливу різних способів заморожування малини показали, що найбільш ефективним є шокове заморожування ягід розсіпом у цукровому сиропі з додаванням аскорбінової кислоти. За таких умов покращуються органолептичні, біохімічні та мікробіологічні показники якості замороженої продукції. Використання цукрового сиропу концентрацією 18–23 % сприяє підвищенню швидкості заморожування та зменшенню змін мікроструктури продукту. Водночас підвищення концентрації сиропу понад 23 % хоча й

покращує органолептичні властивості замороженої малини, однак призводить до збільшення собівартості продукції. Заморожування сировини здійснюється при температурі $-30...-40$ °С протягом 3–15 хв, що забезпечує інтенсивне формування дрібних кристалів льоду.

Табл. 1. Вплив комбінованих технологій на якість продукції

Технологія	Основний механізм дії	Вплив на якість
Ультразвукова обробка	Акустична кавітація	Формування дрібних кристалів льоду
Мікрохвильове випромінювання	Обертання дипольних молекул води	Однорідна структура
Осмотична дегідратація	Зниження вологості	Менше пошкоджень тканин
Магнітне поле	Контроль нуклеації	Покращення текстури
Високий тиск	Інтенсифікація фазового переходу	Збереження структури

Висновки. Подальший розвиток холодильних технологій пов'язаний із застосуванням комбінованих методів заморожування та охолодження фруктів і овочів, спрямованих насамперед на зменшення структурних пошкоджень тканин плодів, спричинених утворенням кристалів льоду. Серед таких технологій використовують додаткові фізичні фактори впливу, зокрема ультразвук, високий тиск та мікрохвильове випромінювання, що дозволяє отримувати заморожені фрукти та овочі високої якості без застосування сторонніх інгредієнтів. У цих технологіях покращення якості продукції досягається завдяки зміні механізмів розподілу води у харчовій матриці продуктів та формуванню більш дрібних і рівномірно розподілених кристалів льоду. Разом із тим широке впровадження таких технологій поки що обмежується високою вартістю обладнання та технологічними особливостями їх використання для окремих видів харчової продукції. Натомість застосування осмотичної дегідратації та магнітного поля під час заморожування є більш доступними та економічно доцільними технологіями. Такі комбіновані способи не потребують складного обладнання та значних енергетичних витрат, що робить їх перспективними для практичного використання.

Отже, комбіновані технології заморожування є перспективним напрямом розвитку індустрії заморожених продуктів. Подальші дослідження мають бути спрямовані на поглиблене вивчення механізмів впливу таких методів на структуру та якість фруктів і овочів, а також на оптимізацію параметрів процесу заморожування та адаптацію технологій до конкретних видів рослинної сировини. Отримані результати мають як теоретичне, так і практичне значення для розроблення енергоефективних технологій, узагальнюють сучасні наукові підходи до інтенсифікації процесів заморожування та можуть бути використані при розробленні високоякісних технологій збереження рослинної сировини.

Література:

1. Da Silva D. L., Silveira A. S., Ronzoni A. F., Hermes C. J. L. Effect of freezing rate on the quality of frozen strawberries (*Fragaria × ananassa*). *International Journal of Refrigeration*. 2022. Vol. 144. P. 46–54. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2022.07.006.
2. Khan M. I. H., Wellard R. M., Nagy S. A., Joardder M. U. H., Karim M. A. Experimental investigation of bound and free water transport process during drying of hygroscopic food material. *International Journal of Thermal Sciences*. 2017. Vol. 117. P. 266–273. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2017.04.006.
3. Bilbao-Sainz C., Sinrod A., Powell-Palm M. J., Dao L., Takeoka G., Williams T., McHugh T. Preservation of sweet cherry by isochoric freezing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2019. Vol. 52. P. 108–115. DOI: 10.1016/j.ifset.2018.10.016.
4. Ojha K. S., Kerry J. P., Tiwari B. K., O'Donnell C. Freezing for food preservation. Reference Module in Food Science. Amsterdam : Elsevier, 2016. DOI: 10.1016/B978-0-08-100596-5.03108-5.
5. Neri L., Faieta M., Di Mattia C., Sacchetti G., Mastrocola D., Pittia P. Antioxidant activity in frozen plant foods: effect of cryoprotectants, freezing process and frozen storage. *Foods*. 2020. Vol. 9, No. 12. P. 1886. DOI: 10.3390/foods9121886.
6. De Michelis A. J. Congelación de frutas, hortalizas, hongos, carnes y masas: procedimientos hogareños y comerciales de pequeña escala. Buenos Aires : Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 2015.
7. Bulut M., Bayer Ö., Kırtıl E., Bayındırlı A. Effect of freezing rate and storage on the texture and quality parameters of strawberry and green bean frozen in home-type freezer. *International Journal of Refrigeration*. 2018. Vol. 88. P. 360–369. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2018.02.030.
8. Holzwarth M., Korhummel S., Carle R., Kammerer D. R. Evaluation of the effects of different freezing and thawing methods on color, polyphenol and ascorbic acid retention in strawberries (*Fragaria × ananassa* Duch.). *Food Research International*. 2012. Vol. 48, No. 1. P. 241–248. DOI: 10.1016/j.foodres.2012.04.004.
9. Sahari M. A., Boostani F. M., Hamidi E. Z. Effect of low temperature on the ascorbic acid content and quality characteristics of frozen strawberry. *Food Chemistry*. 2004. Vol. 86, No. 3. P. 357–363. DOI: 10.1016/j.foodchem.2003.09.008.
10. Kamiloglu S. Effect of different freezing methods on the bioaccessibility of strawberry polyphenols. *International Journal of Food Science & Technology*. 2019. Vol. 54, No. 8. P. 2652–2660. DOI: 10.1111/ijfs.14249.
11. Ngo T., Wrolstad R. E., Zhao Y. Color quality of Oregon strawberries: impact of genotype, composition, and processing. *Journal of Food Science*. 2007. Vol. 72, No. 1. P. C025–C032. DOI: 10.1111/j.1750-3841.2006.00200.x.
12. Oszmiański J., Wojdyło A., Kolniak J. Effect of L-ascorbic acid, sugar, pectin and freeze–thaw treatment on polyphenol content of frozen strawberries. *LWT – Food Science and Technology*. 2009. Vol. 42, No. 2. P. 581–586. DOI: 10.1016/j.lwt.2008.07.009.
13. Chisari M., Barbagallo R. N., Spagna G. Characterization of polyphenol oxidase and peroxidase and influence on browning of cold-stored strawberry fruit. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2007. Vol. 55, No. 9. P. 3469–3476. DOI: 10.1021/jf063402k.

14. Castro I., Gonçalves O., Teixeira J. A., Vicente A. A. Comparative study of selva and camarosa strawberries for the commercial market. *Journal of Food Science*. 2002. Vol. 67, No. 6. P. 2132–2137. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2002.tb09515.x.
15. Moraga G., Martínez-Navarrete N., Chiralt A. Compositional changes of strawberry due to dehydration, cold storage and freezing-thawing processes. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2006. Vol. 30, No. 4. P. 458–474. DOI: 10.1111/j.1745-4549.2006.00079.x.
16. Skrede G. Changes in sucrose, fructose and glucose content of frozen strawberries with thawing. *Journal of Food Science*. 1983. Vol. 48, No. 4. P. 1094–1096. DOI: 10.1111/j.1365-2621.1983.tb09168.x.
17. Loayza-Salazar S., Siche R., Vegas C., Chávez-Llerena R. T., Encina-Zelada C. R., Calla-Florez M., Comettant-Rabanal R. Novel technologies in the freezing process and their impact on the quality of fruits and vegetables. *Food Engineering Reviews*. 2024. Vol. 16, No. 3. P. 371–395.
18. Qiu L., Zhang M., Chitrakar B., Bhandari B. Application of power ultrasound in freezing and thawing processes: effect on process efficiency and product quality. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2020. Vol. 68. P. 105230. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2020.105230.
19. Yu H., Mei J., Xie J. New ultrasonic assisted technology of freezing, cooling and thawing in solid food processing: a review. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2022. Vol. 90. P. 106185. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2022.106185.
20. Köprüalan Aydın Ö., Yüksel Sarioğlu H., Dirim S. N. et al. Recent advances for rapid freezing and thawing methods of foods. *Food Engineering Reviews*. 2023. DOI: 10.1007/s12393-023-09356-0.
21. Jiang Q., Zhang M., Mujumdar A. S., Chen B. Comparative freezing study of broccoli and cauliflower: effects of electrostatic field and static magnetic field. *Food Chemistry*. 2022. Vol. 397. P. 133751. DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.133751.
22. Cao X., Wang Z., Bai G., Zhu D., Lü C. Effect of ultrasound on freezing characteristics of fruits with different porosities. *Food Science*. 2021. Vol. 42, No. 7. P. 128–133.
23. Nowak K. W., Zielińska M., Waszkielis K. M. The effect of ultrasound and freezing/thawing treatment on the physical properties of blueberries. *Food Science and Biotechnology*. 2019. Vol. 28, No. 3. P. 741–749. DOI: 10.1007/s10068-018-0528-5.
24. Xin Y., Zhang M., Adhikari B. Effects of ultrasound-assisted freezing on freezing time and quality of broccoli (*Brassica oleracea* L.). *International Journal of Refrigeration*. 2014. Vol. 41. P. 82–91. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2013.12.016.
25. Mortazavi A., Tabatabaie F. Study of ice cream freezing process after treatment with ultrasound. *World Applied Sciences Journal*. 2008. Vol. 4, No. 2. P. 188–190.
26. Zheng L. Y., Sun D. W. Innovative applications of power ultrasound during food freezing process. *Food Science and Technology*. 2006. Vol. 17. P. 16–23.
27. Jackson T. H., Ugan A., Critser J. K., Gao D. Novel microwave technology for cryopreservation of biomaterials by suppression of apparent ice formation. *Cryobiology*. 1997. Vol. 34, No. 4. P. 363–372. DOI: 10.1006/cryo.1997.2016.
28. Sadot M., Curet S., Chevallier S., Le-Bail A., Rouaud O., Havet M. Microwave-assisted freezing: impact of microwave energy and duty cycle on ice

crystal size distribution. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2020. Vol. 62. P. 102359. DOI: 10.1016/j.ifset.2020.102359.

29. Jha P. K., Chevallier S., Xanthakis E., Jury V., Le-Bail A. Effect of microwave-assisted freezing on quality attributes of apples and potatoes. *Food Chemistry*. 2020. Vol. 309. P. 125594. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.125594.

30. Gunes B., Bayindirli A. Peroxidase and lipoxygenase inactivation during blanching of green beans, peas and carrots. *Food Science and Technology*. 1993. Vol. 26. P. 406–410.

31. Kidmose U., Martens H. J. Changes in texture, microstructure and nutritional quality of carrot slices during blanching and freezing. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 1999. Vol. 79. P. 1747–1753.

32. Sun T., Tang J., Powers J. R. Antioxidant activity and quality of asparagus affected by microwave processing. *Food Chemistry*. 2007. Vol. 100. P. 813–819.

33. Duan X., Zhang M., Mujumdar A. S. Microwave freeze drying and sterilization characteristics of cabbage. *Drying Technology*. 2007. Vol. 25, No. 10. P. 1725–1731. DOI: 10.1080/07373930701591044.

34. Yan W. Q., Zhang M., Huang L. L., Tang J., Mujumdar A. S., Sun J. C. Combined microwave drying of carrot pieces. *International Journal of Food Science & Technology*. 2010. Vol. 45, № 10. P. 2141–2148. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2010.02380.x.

35. Giannakourou M. C., Dermesonlouoglou E. K., Taoukis P. S. Osmodehydrofreezing: integrated process for food preservation. *Foods*. 2020. Vol. 9, No. 8. P. 1042. DOI: 10.3390/foods9081042.

36. Ramallo L. A., Mascheroni R. H. Dehydrofreezing of pineapple. *Journal of Food Engineering*. 2010. Vol. 99. P. 269–275. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2010.02.026.

37. Zhao J. H., Liu F., Pang X. L., Xiao H. W., Wen X., Ni Y. Y. Effects of osmo-dehydrofreezing treatments on mango quality. *International Journal of Food Science & Technology*. 2016. Vol. 51, No. 6. P. 1441–1448. DOI: 10.1111/ijfs.13113.

38. Ahmed I., Qazi I. M., Jamal S. Developments in osmotic dehydration for fruits and vegetables preservation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2016. Vol. 34. P. 29–43. DOI: 10.1016/j.ifset.2016.01.003.

39. Khan M. R. Osmotic dehydration technique for fruits preservation: a review. *Pakistan Journal of Food Science*. 2012. Vol. 22. P. 71–85.

40. Li J., Chotiko A., Kyereh E., Zhang J., Liu C., Reyes V. V., Bankston D., Sathivel S. Combined osmotic dehydration and freezing process for fruits and vegetables. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2017. Vol. 41. P. e12926.

41. Talens P., Escriche I., Martínez-Navarrete N., Chiralt A. Influence of osmotic dehydration and freezing on strawberries. *Journal of Food Science*. 2002. Vol. 67, No. 5. P. 1648–1653. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2002.tb08699.x.

42. Kaur M., Kumar M. Magnetic field-assisted freezing of fruits and vegetables: a review. *Food Reviews International*. 2020. Vol. 36, No. 8. P. 761–780. DOI: 10.1080/87559129.2019.1683746.

43. Li D., Zhu Z., Sun D. W. Effects of freezing on cell structure of foods: a review. *Trends in Food Science & Technology*. 2018. Vol. 75. P. 46–55. DOI: 10.1016/j.tifs.2018.02.019.

44. Van Buggenhout S., Messagie I., Van der Plancken I., Hendrickx M. High-pressure freezing effects on fruit and vegetable enzymes. *European Food Research and Technology*. 2006. Vol. 223, No. 4. P. 475–485.

45. Otero L., Martino M., Zaritzky N., Solas M., Sanz P. D. Microstructure preservation in peach and mango during high-pressure freezing. *Journal of Food Science*. 2000. Vol. 65, No. 3. P. 466–470.
46. Fuchigami M., Kato N., Teramoto A. I. High-pressure freezing effects on Chinese cabbage. *Journal of Food Science*. 1998. Vol. 63, No. 1. P. 122–125.
47. Fuchigami M., Kato N., Teramoto A. I. High-pressure freezing effects on carrots. *Journal of Food Science*. 1997. Vol. 62, No. 4. P. 804–808.
48. Sun X., Wu Y., Song Z., Chen X. Natural polysaccharides for food cryoprotection. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*. 2022. Vol. 27. P. 100291. DOI: 10.1016/j.bcdf.2021.100291.
49. Deng Q., Wang Y., Sun L., Li J., Fang Z., Gooneratne R. Migration of water in shrimp muscle after freezing. *Journal of Food Science*. 2018. Vol. 83, No. 7. P. 1810–1815.
50. Popkin B. M., D’Anci K. E., Rosenberg I. H. Water hydration and health. *Nutrition Reviews*. 2010. Vol. 68, No. 8. P. 439–458.
51. Carvajal P. A., Lanier T. C., MacDonald G. A. Stabilization of proteins in surimi. Surimi and surimi seafood / ed. by J. W. Park. Boca Raton : CRC Press, 2005. P. 163–225.
52. Dalvi-Isfahan M., Hamdami N., Xanthakis E., Le-Bail A. Control of ice nucleation by ultrasound and fields. *Journal of Food Engineering*. 2017. Vol. 195. P. 222–234.
53. James C., Purnell G., James S. J. Novel food freezing technologies. *Food and Bioprocess Technology*. 2015. Vol. 8, No. 8. P. 1616–1634.
54. Ersus Bilek S., Degirmenci A., Tekin I., Yılmaz F. M. Combined freezing methods for cherry tomato quality. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2019. Vol. 13, No. 3. P. 2218–2229.
55. Zhu Z., Zhou Q., Sun D.-W. Measuring and controlling ice crystallization in frozen foods: a review. *Trends in Food Science & Technology*. 2019. Vol. 90. P. 13–25. DOI: 10.1016/j.tifs.2019.05.012.
56. Rahman M. S. Food stability determination by macro–micro region concept in the state diagram and by defining a critical temperature. *Journal of Food Engineering*. 2009. Vol. 90, No. 4. P. 541–552. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2008.07.011.
57. Liu X., Pan Y., Liu F., He Y., Zhu Q., Liu Z. et al. Cryoprotectants: mechanisms and applications. *Journal of Nanomaterials*. 2021. DOI: 10.1155/2021/9990709.
58. Maity T., Saxena A., Raju P. S. Hydrocolloids as cryoprotectants. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2018. Vol. 58, No. 3. P. 420–435. DOI: 10.1080/10408398.2016.1182892.
59. Kim M., Jin E. S., Sim D. W., Won H. S., Kim E. K., Jang S. et al. Cryoprotective effect of antifreeze proteins on vegetables. *Food Hydrocolloids*. 2019. Vol. 94. P. 585–591.

References:

1. Da Silva, D. L., Silveira, A. S., Ronzoni, A. F., & Hermes, C. J. L. (2022). Effect of freezing rate on the quality of frozen strawberries (*Fragaria* × ananassa). *International Journal of Refrigeration*, 144, 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.07.006>
2. Khan, M. I. H., Wellard, R. M., Nagy, S. A., Joardder, M. U. H., & Karim, M. A. (2017). Experimental investigation of bound and free water transport

process during drying of hygroscopic food material. *International Journal of Thermal Sciences*, 117, 266–273. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.04.006>

3. Bilbao-Sainz, C., Sinrod, A., Powell-Palm, M. J., Dao, L., Takeoka, G., Williams, T., & McHugh, T. (2019). Preservation of sweet cherry by isochoric freezing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 52, 108–115. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.10.016>

4. Ojha, K. S., Kerry, J. P., Tiwari, B. K., & O'Donnell, C. (2016). Freezing for food preservation. *Reference Module in Food Science*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.03108-5>

5. Neri, L., Faieta, M., Di Mattia, C., Sacchetti, G., Mastrocola, D., & Pittia, P. (2020). Antioxidant activity in frozen plant foods: Effect of cryoprotectants, freezing process and frozen storage. *Foods*, 9(12), 1886. <https://doi.org/10.3390/foods9121886>

6. De Michelis, A. J. (2015). Congelación de frutas, hortalizas, hongos, carnes y masas: procedimientos hogareños y comerciales de pequeña escala. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

7. Bulut, M., Bayer, Ö., Kırtıl, E., & Bayındırlı, A. (2018). Effect of freezing rate and storage on the texture and quality parameters of strawberry and green bean frozen in home-type freezer. *International Journal of Refrigeration*, 88, 360–369. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.02.030>

8. Holzwarth, M., Korhummel, S., Carle, R., & Kammerer, D. R. (2012). Evaluation of the effects of different freezing and thawing methods on color, polyphenol and ascorbic acid retention in strawberries (*Fragaria × ananassa* Duch.). *Food Research International*, 48(1), 241–248. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.04.004>

9. Sahari, M. A., Boostani, F. M., & Hamidi, E. Z. (2004). Effect of low temperature on the ascorbic acid content and quality characteristics of frozen strawberry. *Food Chemistry*, 86(3), 357–363. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.09.008>

10. Kamiloglu, S. (2019). Effect of different freezing methods on the bioaccessibility of strawberry polyphenols. *International Journal of Food Science & Technology*, 54(8), 2652–2660. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14249>

11. Ngo, T., Wrolstad, R. E., & Zhao, Y. (2007). Color quality of Oregon strawberries: Impact of genotype, composition, and processing. *Journal of Food Science*, 72(1), C025–C032. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2006.00200.x>

12. Oszmiański, J., Wojdyło, A., & Kolniak, J. (2009). Effect of L-ascorbic acid, sugar, pectin and freeze–thaw treatment on polyphenol content of frozen strawberries. *LWT – Food Science and Technology*, 42(2), 581–586. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2008.07.009>

13. Chisari, M., Barbagallo, R. N., & Spagna, G. (2007). Characterization of polyphenol oxidase and peroxidase and influence on browning of cold-stored strawberry fruit. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(9), 3469–3476. <https://doi.org/10.1021/jf063402k>

14. Castro, I., Gonçalves, O., Teixeira, J. A., & Vicente, A. A. (2002). Comparative study of selva and camarosa strawberries for the commercial market. *Journal of Food Science*, 67(6), 2132–2137. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb09515.x>

15. Moraga, G., Martínez-Navarrete, N., & Chiralt, A. (2006). Compositional changes of strawberry due to dehydration, cold storage and freezing-thawing processes. *Journal of Food Processing and Preservation*, 30(4), 458–474. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2006.00079.x>

16. Skrede, G. (1983). Changes in sucrose, fructose and glucose content of frozen strawberries with thawing. *Journal of Food Science*, 48(4), 1094–1096. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1983.tb09168.x>
17. Loayza-Salazar, S., Siche, R., Vegas, C., Chávez-Llerena, R. T., Encina-Zelada, C. R., Calla-Florez, M., & Comettant-Rabanal, R. (2024). Novel technologies in the freezing process and their impact on the quality of fruits and vegetables. *Food Engineering Reviews*, 16(3), 371–395.
18. Qiu, L., Zhang, M., Chitrakar, B., & Bhandari, B. (2020). Application of power ultrasound in freezing and thawing processes: Effect on process efficiency and product quality. *Ultrasonics Sonochemistry*, 68, 105230. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105230>
19. Yu, H., Mei, J., & Xie, J. (2022). New ultrasonic assisted technology of freezing, cooling and thawing in solid food processing: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 90, 106185. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106185>
20. Köprüalan Aydın, Ö., Yüksel Sarioğlu, H., Dirim, S. N., et al. (2023). Recent advances for rapid freezing and thawing methods of foods. *Food Engineering Reviews*. <https://doi.org/10.1007/s12393-023-09356-0>
21. Jiang, Q., Zhang, M., Mujumdar, A. S., & Chen, B. (2022). Comparative freezing study of broccoli and cauliflower: Effects of electrostatic field and static magnetic field. *Food Chemistry*, 397, 133751. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133751>
22. Cao, X., Wang, Z., Bai, G., Zhu, D., & Lü, C. (2021). Effect of ultrasound on freezing characteristics of fruits with different porosities. *Food Science*, 42(7), 128–133.
23. Nowak, K. W., Zielińska, M., & Waszkielis, K. M. (2019). The effect of ultrasound and freezing/thawing treatment on the physical properties of blueberries. *Food Science and Biotechnology*, 28(3), 741–749. <https://doi.org/10.1007/s10068-018-0528-5>
24. Xin, Y., Zhang, M., & Adhikari, B. (2014). Effects of ultrasound-assisted freezing on freezing time and quality of broccoli (*Brassica oleracea* L.). *International Journal of Refrigeration*, 41, 82–91. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.12.016>
25. Mortazavi, A., & Tabatabaie, F. (2008). Study of ice cream freezing process after treatment with ultrasound. *World Applied Sciences Journal*, 4(2), 188–190.
26. Zheng, L. Y., & Sun, D. W. (2006). Innovative applications of power ultrasound during food freezing process. *Food Science and Technology*, 17, 16–23.
27. Jackson, T. H., Ungan, A., Critser, J. K., & Gao, D. (1997). Novel microwave technology for cryopreservation of biomaterials by suppression of apparent ice formation. *Cryobiology*, 34(4), 363–372. <https://doi.org/10.1006/cryo.1997.2016>
28. Sadot, M., Curet, S., Chevallier, S., Le-Bail, A., Rouaud, O., & Havet, M. (2020). Microwave-assisted freezing: Impact of microwave energy and duty cycle on ice crystal size distribution. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 62, 102359. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102359>
29. Jha, P. K., Chevallier, S., Xanthakis, E., Jury, V., & Le-Bail, A. (2020). Effect of microwave-assisted freezing on quality attributes of apples and potatoes. *Food Chemistry*, 309, 125594. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125594>
30. Gunes, B., & Bayindirli, A. (1993). Peroxidase and lipoxygenase inactivation during blanching of green beans, peas and carrots. *Food Science and Technology*, 26, 406–410.

31. Kidmose, U., & Martens, H. J. (1999). Changes in texture, microstructure and nutritional quality of carrot slices during blanching and freezing. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 79, 1747–1753.
32. Sun, T., Tang, J., & Powers, J. R. (2007). Antioxidant activity and quality of asparagus affected by microwave processing. *Food Chemistry*, 100, 813–819.
33. Duan, X., Zhang, M., & Mujumdar, A. S. (2007). Microwave freeze drying and sterilization characteristics of cabbage. *Drying Technology*, 25(10), 1725–1731. <https://doi.org/10.1080/07373930701591044>
34. Yan, W. Q., Zhang, M., Huang, L. L., Tang, J., Mujumdar, A. S., & Sun, J. C. (2010). Combined microwave drying of carrot pieces. *International Journal of Food Science & Technology*, 45(10), 2141–2148. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02380.x>
35. Giannakourou, M. C., Dermesonlouoglou, E. K., & Taoukis, P. S. (2020). Osmodehydrofreezing: Integrated process for food preservation. *Foods*, 9(8), 1042. <https://doi.org/10.3390/foods9081042>
36. Ramallo, L. A., & Mascheroni, R. H. (2010). Dehydrofreezing of pineapple. *Journal of Food Engineering*, 99, 269–275. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.02.026>
37. Zhao, J. H., Liu, F., Pang, X. L., Xiao, H. W., Wen, X., & Ni, Y. Y. (2016). Effects of osmo-dehydrofreezing treatments on mango quality. *International Journal of Food Science & Technology*, 51(6), 1441–1448. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13113>
38. Ahmed, I., Qazi, I. M., & Jamal, S. (2016). Developments in osmotic dehydration for fruits and vegetables preservation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 34, 29–43. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.01.003>
39. Khan, M. R. (2012). Osmotic dehydration technique for fruits preservation: A review. *Pakistan Journal of Food Science*, 22, 71–85.
40. Li, J., Chotiko, A., Kyereh, E., Zhang, J., Liu, C., Reyes, V. V., Bankston, D., & Sathivel, S. (2017). Combined osmotic dehydration and freezing process for fruits and vegetables. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41, e12926.
41. Talens, P., Escriche, I., Martínez-Navarrete, N., & Chiralt, A. (2002). Influence of osmotic dehydration and freezing on strawberries. *Journal of Food Science*, 67(5), 1648–1653. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb08699.x>
42. Kaur, M., & Kumar, M. (2020). Magnetic field-assisted freezing of fruits and vegetables: A review. *Food Reviews International*, 36(8), 761–780. <https://doi.org/10.1080/87559129.2019.1683746>
43. Li, D., Zhu, Z., & Sun, D. W. (2018). Effects of freezing on cell structure of foods: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 75, 46–55. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.02.019>
44. Van Buggenhout, S., Messagie, I., Van der Plancken, I., & Hendrickx, M. (2006). High-pressure freezing effects on fruit and vegetable enzymes. *European Food Research and Technology*, 223(4), 475–485.
45. Otero, L., Martino, M., Zaritzky, N., Solas, M., & Sanz, P. D. (2000). Microstructure preservation in peach and mango during high-pressure freezing. *Journal of Food Science*, 65(3), 466–470.
46. Fuchigami, M., Kato, N., & Teramoto, A. I. (1998). High-pressure freezing effects on Chinese cabbage. *Journal of Food Science*, 63(1), 122–125.
47. Fuchigami, M., Kato, N., & Teramoto, A. I. (1997). High-pressure freezing effects on carrots. *Journal of Food Science*, 62(4), 804–808.

48. Sun, X., Wu, Y., Song, Z., & Chen, X. (2022). Natural polysaccharides for food cryoprotection. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 27, 100291. <https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2021.100291>
49. Deng, Q., Wang, Y., Sun, L., Li, J., Fang, Z., & Gooneratne, R. (2018). Migration of water in shrimp muscle after freezing. *Journal of Food Science*, 83(7), 1810–1815.
50. Popkin, B. M., D'Anci, K. E., & Rosenberg, I. H. (2010). Water hydration and health. *Nutrition Reviews*, 68(8), 439–458.
51. Carvajal, P. A., Lanier, T. C., & MacDonald, G. A. (2005). Stabilization of proteins in surimi. In J. W. Park (Ed.), *Surimi and surimi seafood* (pp. 163–225). CRC Press.
52. Dalvi-Isfahan, M., Hamdami, N., Xanthakis, E., & Le-Bail, A. (2017). Control of ice nucleation by ultrasound and fields. *Journal of Food Engineering*, 195, 222–234.
53. James, C., Purnell, G., & James, S. J. (2015). Novel food freezing technologies. *Food and Bioprocess Technology*, 8(8), 1616–1634.
54. Ersus Bilek, S., Degirmenci, A., Tekin, I., & Yılmaz, F. M. (2019). Combined freezing methods for cherry tomato quality. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13(3), 2218–2229.
55. Zhu, Z., Zhou, Q., & Sun, D.-W. (2019). Measuring and controlling ice crystallization in frozen foods: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 90, 13–25. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.05.012>
56. Rahman, M. S. (2009). Food stability determination by macro–micro region concept in the state diagram and by defining a critical temperature. *Journal of Food Engineering*, 90(4), 541–552. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.07.011>
57. Liu, X., Pan, Y., Liu, F., He, Y., Zhu, Q., Liu, Z., et al. (2021). Cryoprotectants: Mechanisms and applications. *Journal of Nanomaterials*. <https://doi.org/10.1155/2021/9990709>
58. Maity, T., Saxena, A., & Raju, P. S. (2018). Hydrocolloids as cryoprotectants. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(3), 420–435. <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1182892>
59. Kim, M., Jin, E. S., Sim, D. W., Won, H. S., Kim, E. K., Jang, S., et al. (2019). Cryoprotective effect of antifreeze proteins on vegetables. *Food Hydrocolloids*, 94, 585–591.

Annotation

Chornenky V., Shutyuk V.

Modern combined freezing technologies and their impact on the quality of fruits and vegetables

This study examines modern combined methods of freezing fruits and vegetables, which are among the most promising technologies in the contemporary food industry. The relevance of the research is determined by the need to preserve the quality of plant raw materials during long-term storage and to minimize structural damage caused by ice crystal formation during freezing and subsequent thawing.

The aim of the study is to analyze the influence of additional physical factors, including ultrasound, microwave radiation, osmotic dehydration, magnetic field, and

high pressure, on the freezing process and the quality characteristics of plant-based food products.

The methodology is based on a comprehensive analysis and systematization of recent scientific publications devoted to innovative freezing technologies. Particular attention is paid to the mechanisms of ice nucleation, crystal growth, and moisture redistribution within plant tissues under the influence of external physical factors.

The results demonstrate that ultrasound induces cavitation effects, which intensify heat and mass transfer and accelerate nucleation, leading to the formation of smaller and more uniformly distributed ice crystals. Microwave radiation ensures a more homogeneous energy distribution, reducing the formation of large ice crystals. Osmotic dehydration prior to freezing decreases moisture content, increases the concentration of dissolved solids, and enhances structural stability. The application of magnetic fields and high pressure promotes controlled crystallization and reduces mechanical damage to plant tissues.

The combined application of these technologies significantly improves the quality of frozen fruits and vegetables by preserving their texture, color, and nutritional value. The scientific novelty of the study lies in the systematization of the effects of combined freezing methods on the structural and physicochemical properties of plant materials. The practical significance is associated with the potential implementation of energy-efficient combined freezing technologies in the food industry to improve product quality and extend shelf life.

Key words: *freezing, fruits, vegetables, ultrasound, microwaves, dehydration, magnetic field, high pressure.*